

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego
nr 4, zadanie nr 7

Autorzy:
Grochowina Mateusz
Winnicki Konrad
Zgorzelski Jan

Warszawa, 5 czerwca 2019

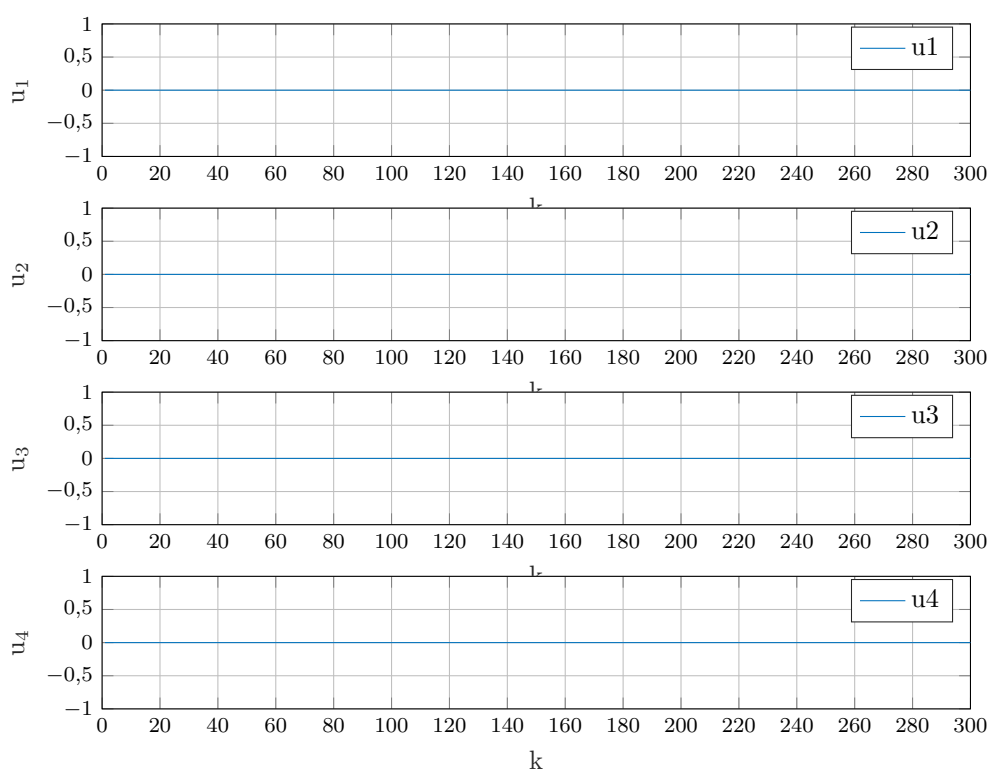
Spis treści

1. Projekt	2
1.1. Poprawność podanego punktu pracy	2
1.2. Odpowiedzi skokowe 12 torów procesów	4
1.3. Program do symulacji algorytmu cyfrowego PID i DMC w najprostszej wersji analitycznej	7
1.3.1. Program do symulacji algorytmu cyfrowego PID	7
1.3.2. Program do symulacji algorytmu DMC w najprostszej wersji analitycznej	10
1.4. Eksperymentalne dobranie konfiguracji i parametrów regulatorów PID i DMC	14
1.4.1. Konfiguracja i dobór parametrów regulatorów PID	14
1.4.2. Dobór parametrów regulatorów DMC	22
1.5. Optymalizacja parametrów regulatorów PID i DMC	28
1.5.1. Optymalizacja PID	28
1.5.2. Optymalizacja DMC	36
1.5.3. Wnioski	38
1.6. Implementacja algorytmu DMC w wersji klasycznej	39
1.6.1. Program do symulacji algorytmu DMC w wersji klasycznej	39
1.6.2. Porównanie implementacji regulatorów DMC	44
1.6.3. Wnioski	49
2. Laboratorium	50
2.1. Stanowisko grzejąco-chłodzące	50
2.1.1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy	50
2.1.2. Zabezpieczenia stanowiska	51
2.1.3. Implementacja oraz dobór nastaw dwupętlowego regulatora PID	52
2.1.4. Implementacja i dobór parametrów regulatora DMC 2x2	57
2.1.5. Panel operatora	64
2.1.6. Automat stanów	66
2.2. Stanowisko INTECO - zbiorniki wodne	68
2.2.1. Konfiguracja sterownika stanowiska Inteco	68
2.2.2. Zabezpieczenia stanowiska	69
2.2.3. Charakterystyka statyczna	70
2.2.4. Dostosowanie i dobieranie parametrów regulatorów PID	71
2.2.5. Automat stanów	72
2.2.6. Wizualizacja procesu	73
2.3. Porównanie regulatorów PID	74

1. Projekt

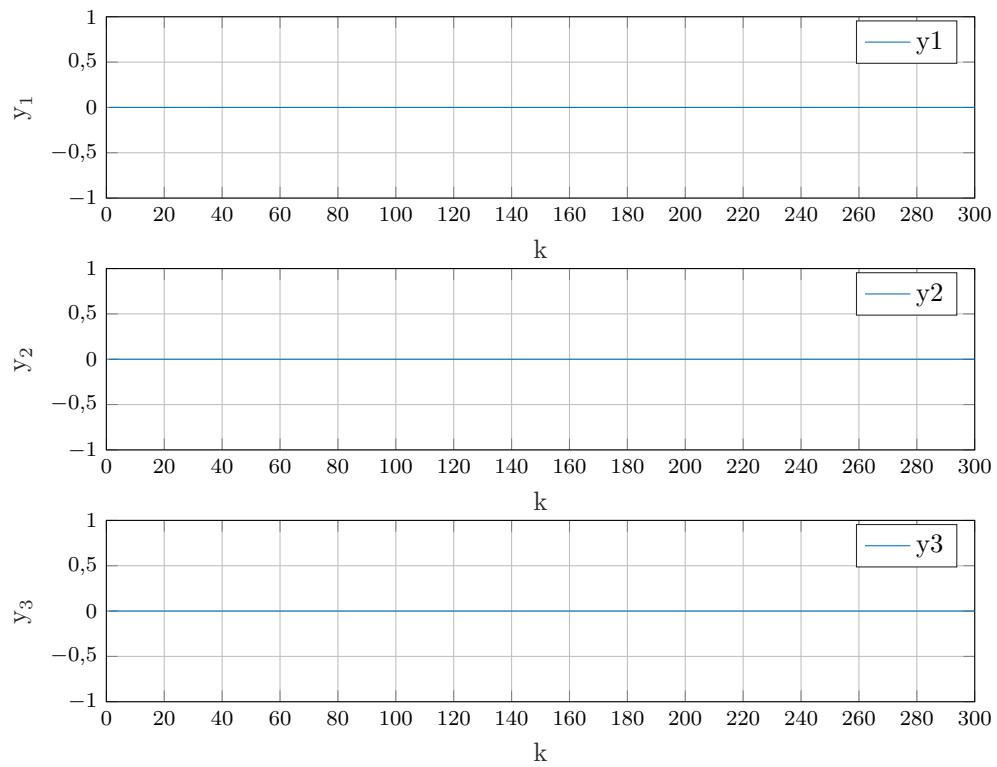
1.1. Poprawność podanego punktu pracy

Zasymulowano odpowiedź procesu w punkcie pracy dla sterowania $u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = 0$



Rys. 1.1. Przebieg sygnałów wejściowych

Wyjścia obiektu wynoszą $y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = 0$.

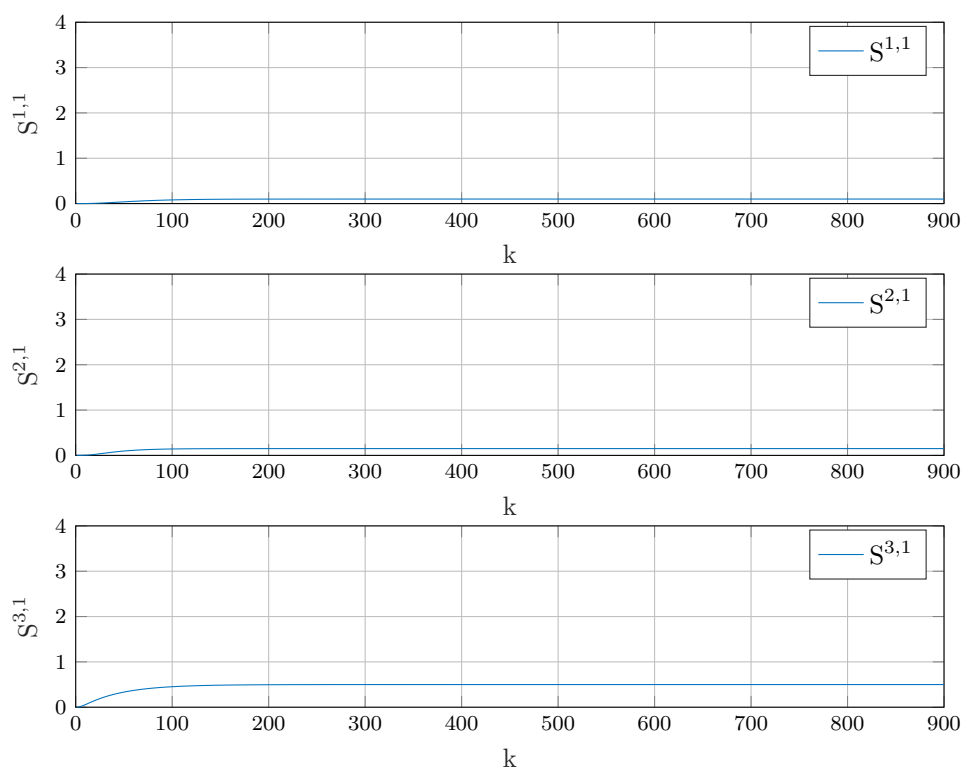


Rys. 1.2. Przebieg sygnałów wyjściowych

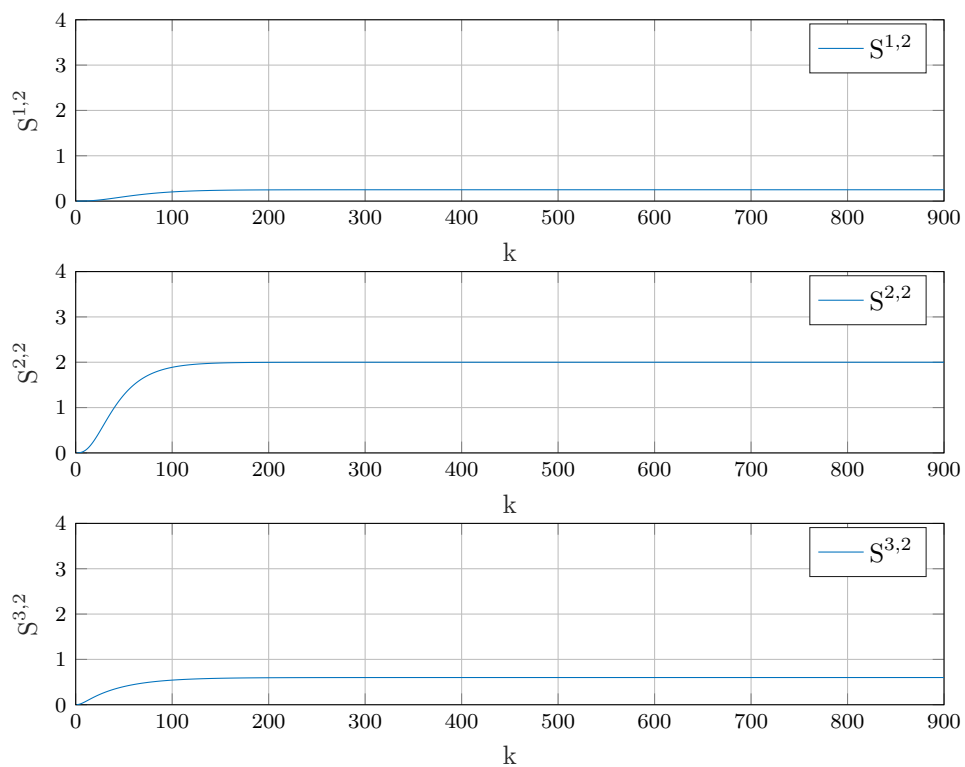
Podany punkt pracy jest poprawny.

1.2. Odpowiedzi skokowe 12 torów procesów

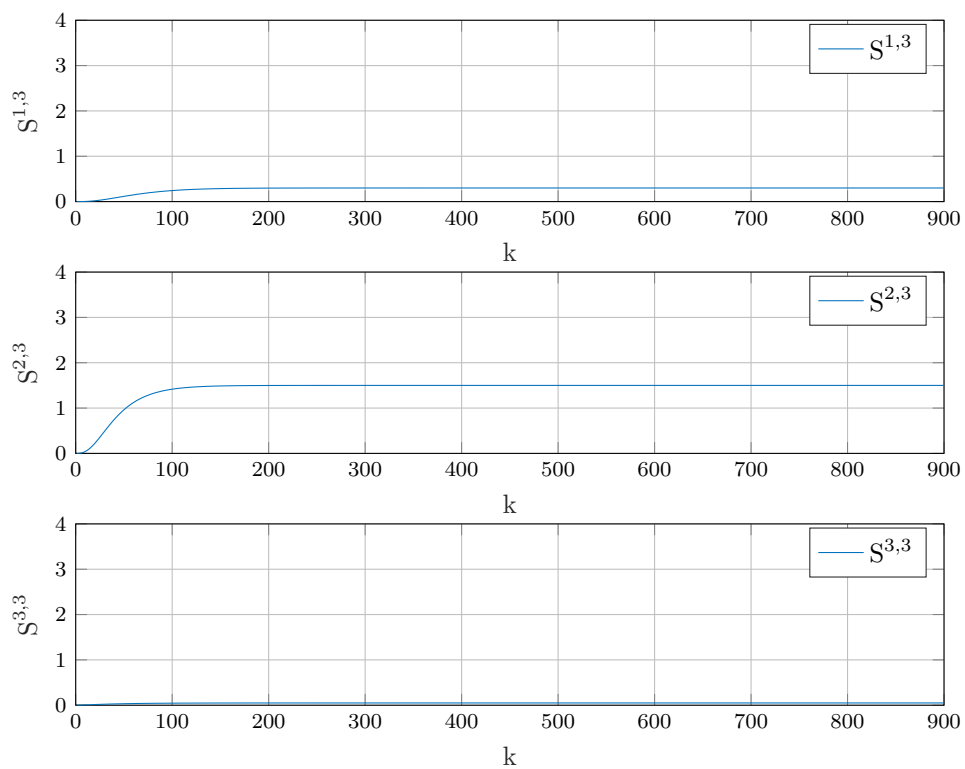
Wyznaczono odpowiedzi skokowe dla 12 torów procesu to znaczy zestaw liczb $s_1^{m,n}, s_2^{m,n}, \dots$ dla $m = 1, 2, 3$, gdzie m oznacza numer wyjścia y i $n = 1, 2, 3, 4$, gdzie n oznacza numer sterowania u przy pojedynczych skokach jednostkowych odpowiednich sygnałów sterujących od chwili $k = 0$ włącznie sygnał wymusza ma wartość 1, w przeszłości jest zerowy.



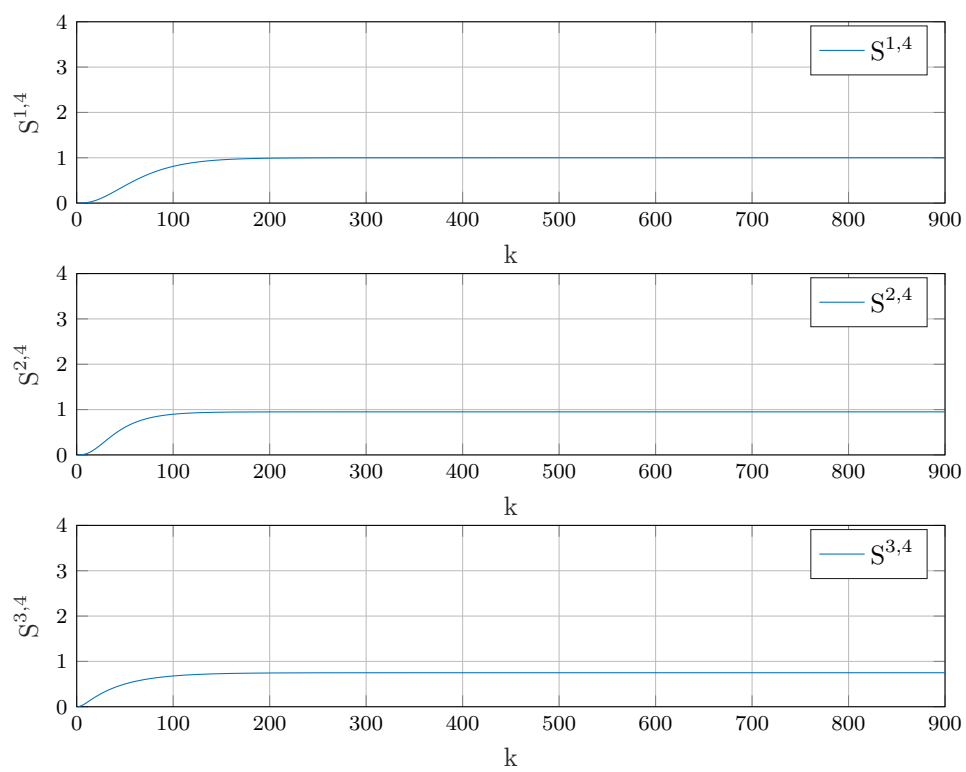
Rys. 1.3. Odpowiedzi skokowe wyjść na skok sterowania wejścia 1



Rys. 1.4. Odpowiedzi skokowe wyjść na skok sterowania wejścia 2



Rys. 1.5. Odpowiedzi skokowe wyjść na skok sterowania wejścia 3



Rys. 1.6. Odpowiedzi skokowe wyjść na skok sterowania wejścia 4

1.3. Program do symulacji algorytmu cyfrowego PID i DMC w najprostszej wersji analitycznej

Zaimplementowano cyfrowy algorytm PID oraz algorytm DMC w najprostszej wersji analitycznej)

1.3.1. Program do symulacji algorytmu cyfrowego PID

Inicjalizacja

Listing 1.1. "Inicjalizacja"

```
%zadanie 3 i 4 - Skrypt realizujący algorytm cyfrowego
%                               wielowymiarowego regulatora PID
%inicjalizacja
clear all

E = 0;%współczynnik jakości regulacji
ny = 3;
nu = 4;

Tp = 0.5;%czas próbkowania
ster = 4;%odrzućany sygnał sterujący
```

Nastawy regulatorów eksperymentalnie

Listing 1.2. "Nastawy regulatorów"

```
%nastawy regulatorow

% %eksperymentalnie
% if ster == 1
%     Kr1 = 1.5; Ti1 = 2; Td1 = 0.01;%u2 dla y3
%     Kr2 = 5.5; Ti2 = 0.4; Td2 = 0.2;%u3 dla y2
%     Kr3 = 2; Ti3 = 9; Td3 = 1;%u4 dla y1
% elseif ster == 2
%     Kr1 = 0.7; Ti1 = 0.2; Td1 = 0.3;%u1 dla y3
%     Kr2 = 3.5; Ti2 = 0.2; Td2 = 0.2;%u3 dla y2
%     Kr3 = 3; Ti3 = 7.5; Td3 = 0.8;%u4 dla y1
% elseif ster == 3
%     Kr1 = 0.7; Ti1 = 0.2; Td1 = 0.3;%u1 dla y3
%     Kr2 = 0.7; Ti2 = 1.8; Td2 = 0.6;%u2 dla y2
%     Kr3 = 1.4; Ti3 = 5.5; Td3 = 0.6;%u4 dla y1
% elseif ster == 4
%     Kr1 = 0.7; Ti1 = 0.2; Td1 = 0.3;%u1 dla y3
%     Kr2 = 0.6; Ti2 = 0.3; Td2 = 0.05;%u2 dla y2
%     Kr3 = 0.8; Ti3 = 0.4; Td3 = 0.4;%u3 dla y1
% end
```


Optymalizacja

Listing 1.3. "Optymalizacja"

```
%optymalizacja
if ster == 1
    Kr1 = 2.4380; Ti1 = 3.2542; Td1 = 0;%u2 dla y3
    Kr2 = 8.8647; Ti2 = 0.2623; Td2 = 0;%u3 dla y2
    Kr3 = 3.1042; Ti3 = 16.8144; Td3 = 1.0262;%u4 dla y1
elseif ster == 2
    Kr1 = 2.2901; Ti1 = 0.5102; Td1 = 0.0187;%u1 dla y3
    Kr2 = 0.0219; Ti2 = 0.0006; Td2 = 39.5656;%u3 dla y2
    Kr3 = 4.8545; Ti3 = 17.6086; Td3 = 0.4969;%u4 dla y1
elseif ster == 3
    Kr1 = 2.4231; Ti1 = 0.6438; Td1 = 0;%u1 dla y3
    Kr2 = 1.3759; Ti2 = 1.1730; Td2 = 0;%u2 dla y2
    Kr3 = 6.4637; Ti3 = 13.3023; Td3 = 0.0984;%u4 dla y1
elseif ster == 4
    Kr1 = 2.5885; Ti1 = 0.5918; Td1 = 0;%u1 dla y3
    Kr2 = 1.4396; Ti2 = 0.6631; Td2 = 0;%u2 dla y2
    Kr3 = 13.4882; Ti3 = 4.4987; Td3 = 0.0290;%u3 dla y1
end
```

Parametry symulacji

Listing 1.4. "Parametry symulacji"

```
%parametry symulacji
kk = 1600;
start = 10;
e = zeros(1, kk);
u1 = zeros(1, kk);
u2 = zeros(1, kk);
u3 = zeros(1, kk);
u4 = zeros(1, kk);
y1 = zeros(1, kk);
y2 = zeros(1, kk);
y3 = zeros(1, kk);

Ey = zeros(ny, 1);

y1_zad = zeros(1, kk);
y1_zad(start:400) = 1;
y1_zad(400:800) = 1.5;
y1_zad(800:1200) = 0.6;
y1_zad(1200:kk) = 2.5;

y2_zad = zeros(1, kk);
y2_zad(start:400) = 2;
y2_zad(400:800) = 1.2;
y2_zad(800:1200) = 0;
y2_zad(1200:kk) = 1.5;

y3_zad = zeros(1, kk);
y3_zad(start:400) = 1.5;
y3_zad(400:800) = 0.8;
y3_zad(800:1200) = 2;
y3_zad(1200:kk) = 0.2;
```

Główna pętla symulacyjna

Listing 1.5. "Główna pętla symulacyjna"

```
%główna pętla symulacyjna
for k = start:kk
    %symulacja obiektu
    [y1(k),y2(k),y3(k)] = symulacja_obiektu7(...
        u1(k-1),u1(k-2),u1(k-3),u1(k-4),...
        u2(k-1),u2(k-2),u2(k-3),u2(k-4),...
        u3(k-1),u3(k-2),u3(k-3),u3(k-4),...
        u4(k-1),u4(k-2),u4(k-3),u4(k-4),...
        y1(k-1),y1(k-2),y1(k-3),y1(k-4),...
        y2(k-1),y2(k-2),y2(k-3),y2(k-4),...
        y3(k-1),y3(k-2),y3(k-3),y3(k-4));

    %uchyb regulacji
    e(1,k) = y1_zad(k) - y1(k);
    e(2,k) = y2_zad(k) - y2(k);
    e(3,k) = y3_zad(k) - y3(k);

    if ster == 1
        u2(k) = r21*e(3,k-2)+r11*e(3,k-1)+...
            r01*e(3,k)+u2(k-1); %y3 od u2
        u3(k) = r22*e(2,k-2)+r12*e(2,k-1)+...
            r02*e(2,k)+u3(k-1); %y2 od u3
        u4(k) = r23*e(1,k-2)+r13*e(1,k-1)+...
            r03*e(1,k)+u4(k-1); %y1 od u4
    elseif ster == 2
        u1(k) = r21*e(3,k-2)+r11*e(3,k-1)+...
            r01*e(3,k)+u1(k-1); %y3 od u1
        u3(k) = r22*e(2,k-2)+r12*e(2,k-1)+...
            r02*e(2,k)+u2(k-1); %y2 od u3
        u4(k) = r23*e(1,k-2)+r13*e(1,k-1)+...
            r03*e(1,k)+u4(k-1); %y1 od u4
    elseif ster == 3
        u1(k) = r21*e(3,k-2)+r11*e(3,k-1)+...
            r01*e(3,k)+u1(k-1); %y3 od u1
        u2(k) = r22*e(2,k-2)+r12*e(2,k-1)+...
            r02*e(2,k)+u2(k-1); %y2 od u2
        u4(k) = r23*e(1,k-2)+r13*e(1,k-1)+...
            r03*e(1,k)+u4(k-1); %y1 od u4
    elseif ster == 4
        u1(k) = r21*e(3,k-2)+r11*e(3,k-1)+...
            r01*e(3,k)+u1(k-1); %y3 dla u1
        u2(k) = r22*e(2,k-2)+r12*e(2,k-1)+...
            r02*e(2,k)+u2(k-1); %y2 dla u2
        u3(k) = r23*e(1,k-2)+r13*e(1,k-1)+...
            r03*e(1,k)+u3(k-1); %y1 dla u3
    end
end
```

1.3.2. Program do symulacji algorytmu DMC w najprostszej wersji analitycznej

Nastawy regulatora DMC dobrane eksperymentalnie i optymalizacyjnie

Listing 1.6. "Nastawy regulatora DMC dobrane eksperymentalnie i optymalizacyjnie"

```
%zadanie 3 i 4 - Skrypt relizujacy algorytm DMC regulatora
%                uproszczonego wielowymiarowego
clear all

%nastawy regulatora DMC
D = 350;%horyzont dynamiki

N = 200;%horyzont predykcji
Nu = 10;%horyzont sterowania

%dobrane eksperymentalnie

% lambda1 = 0.15;
% lambda2 = 0.2;
% lambda3 = 0.7;
% lambda4 = 0.1;
% psi1 = 1;
% psi2 = 1;
% psi3 = 1;

%optymalizacja

lambda1 = 0.9004;
lambda2 = -5.5093;
lambda3 = 12.1642;
lambda4 = -0.0569;
psi1 = -0.5147;
psi2 = -9.3173;
psi3 = 3.2215;
```

Wyznaczanie macierzy S, Mp i M regulatora DMC

Listing 1.7. "Wyznaczanie macierzy S Mp i M regulatora DMC"

```
%warunki poczatkowe
nu = 4;
ny = 3;
load('s.mat')
%Macierz odpowiedzi skokowych
for i = 1:D
    S(i)=[s11(i) s12(i) s13(i) s14(i);...
          s21(i) s22(i) s23(i) s24(i);...
          s31(i) s32(i) s33(i) s34(i)];
end

% Macierz predykcji
for i = 1:N
    for j = 1:D-1
        if i+j <= D
            Mp{i,j} = S{i+j}-S{j};
        else
            Mp{i,j} = S{D}-S{j};
        end
    end
end

% Macierz M
for i=1:Nu
    M(i:N,i)=S(1:N-i+1);
    M(1:i-1,i)=[0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
end
```

Wyznaczanie macierzy Lambda, Psi i K regulatora DMC

Listing 1.8. "Wyznaczanie macierzy Lambda Psi i K regulatora DMC"

```
%Macierz lambda
for i=1:Nu
    for j=1:Nu
        if i==j
            Lambda{i,j}=[lambda1 0 0 0; 0 lambda2 0 0;...
                          0 0 lambda3 0; 0 0 0 lambda4];
        else
            Lambda{i,j}=[0 0 0 0; 0 0 0 0;...
                          0 0 0 0; 0 0 0 0];
        end
    end
end

%Macierz Psi
for i=1:N
    for j=1:N
        if i==j
            Psi{i,j}=[psi1 0 0; 0 psi2 0; 0 0 psi3];
        else
            Psi{i,j}=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 0];
        end
    end
end

%Macierz K
for i = 1:Nu
    size(i) = nu;
end
for i=1:N
    size2(i) = ny;
end

M_temp = cell2mat(M);
M_temp_tr = M_temp';
Psi_temp = cell2mat(Psi);
M_temp_tr = M_temp_tr * Psi_temp;
M_temp = mat2cell(M_temp_tr*M_temp,size,size);
for i=1:Nu
    for j=1:Nu
        L{i,j} = M_temp{i,j}+Lambda{i,j}; %Dodanie Lambdy
    end
end
L_temp = cell2mat(L);
L_temp_rev = mat2cell(L_temp^(-1),size,size);
L_temp_rev = cell2mat(L_temp_rev);

K = mat2cell(L_temp_rev * M_temp_tr,size,size2);
```

Wyznaczanie macierzy Ku oszczędnego regulatora DMC

Listing 1.9. "Wyznaczanie macierzy Ku oszczędnego regulatora DMC"

```
%oszczedny DMC
Mp_tmp = cell2mat(Mp);
K1 = cell2mat(K(1,:));
Ku = K1*Mp_tmp;
for i = 1:nu
    for j = 1:ny
        Ke(i,j) = sum(K1(i,j:3:N*ny));
    end
end
```

Inicjalizacja macierzy do przechowywania danych

Listing 1.10. "Inicjalizacja macierzy do przechowywania danych"

```
%Macierze do przechowywania danych
u_d = zeros(nu,1);
for i = 1:D-1
    u_delta(i,1) = {u_d};
end

y_z = zeros(ny,1);
for i = 1:N
    y_zad_mod(i,1) = {y_z};
end

Y_dmc = zeros(ny,1);
for i=1:N
    y_mod(i,1)={Y_dmc};
end

for i=1:N
    Y0(i,1)={[0;0]};
end

du = zeros(nu,1);
for i=1:Nu
    dU_mod(i,1)={du};
end
```

Parametry symulacji

Listing 1.11. "Parametry symulacji"

```
%parametry symulacji
kk = 1600;
start = 10;
u1 = zeros(1, kk);
u2 = zeros(1, kk);
u3 = zeros(1, kk);
u4 = zeros(1, kk);
y1 = zeros(1, kk);
y2 = zeros(1, kk);
y3 = zeros(1, kk);

Ey = zeros(ny, 1);

y1_zad = zeros(1, kk);
y1_zad(start:400) = 1;
y1_zad(400:800) = 1.5;
y1_zad(800:1200) = 0.6;
y1_zad(1200:kk) = 2.5;

y2_zad = zeros(1, kk);
y2_zad(start:400) = 2;
y2_zad(400:800) = 1.2;
y2_zad(800:1200) = 0;
y2_zad(1200:kk) = 1.5;

y3_zad = zeros(1, kk);
y3_zad(start:400) = 1.5;
y3_zad(400:800) = 0.8;
y3_zad(800:1200) = 2;
y3_zad(1200:kk) = 0.2;
```

Główna pętla symulacyjna

Listing 1.12. "Główna pętla symulacyjna"

```
% Symulacja
for k = start:kk
    %symulacja obiektu
    [y1(k),y2(k),y3(k)] = symulacja_obiektu7(...
        u1(k-1),u1(k-2),u1(k-3),u1(k-4),...
        u2(k-1),u2(k-2),u2(k-3),u2(k-4),...
        u3(k-1),u3(k-2),u3(k-3),u3(k-4),...
        u4(k-1),u4(k-2),u4(k-3),u4(k-4),...
        y1(k-1),y1(k-2),y1(k-3),y1(k-4),...
        y2(k-1),y2(k-2),y2(k-3),y2(k-4),...
        y3(k-1),y3(k-2),y3(k-3),y3(k-4));

    %Regulator
    delta_y(1) = y1_zad(k) - y1(k);
    delta_y(2) = y2_zad(k) - y2(k);
    delta_y(3) = y3_zad(k) - y3(k);

    K1_tmp = Ke*delta_y';

    %obliczanie dU
    u_delta_tmp = cell2mat(u_delta);
    Ku_tmp = Ku*u_delta_tmp;
    du = K1_tmp - Ku_tmp;

    for n = D-1:-1:2
        u_delta(n) = u_delta(n-1);
    end

    u1(k) = u1(k-1) + du(1);
    u2(k) = u2(k-1) + du(2);
    u3(k) = u3(k-1) + du(3);
    u4(k) = u4(k-1) + du(4);
    u_delta(1,1) = {du};

    %bledy
    Ey(1) = Ey(1) + (y1_zad(k) - y1(k))^2;
    Ey(2) = Ey(2) + (y2_zad(k) - y2(k))^2;
    Ey(3) = Ey(3) + (y3_zad(k) - y3(k))^2;
end
```

1.4. Eksperymentalne dobranie konfiguracji i parametrów regulatorów PID i DMC

Dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnałów zadanych (kilka skoków o różnej amplitudzie) dobrano nastawy regulatora PID i parametry algorytmu DMC metodą eksperymentalną. Jakość regulacji oceniano jakościowo (na podstawie rysunków przebiegów sygnałów) oraz ilościowo, wyznaczając wskaźnik jakości regulacji

$$E = \sum_{k=1}^{k_{konc}} \sum_{m=1}^3 (y_{zad}(k) - y(k))^2$$

gdzie k_{konc} oznacza koniec symulacji (zawsze taki sam). Poniżej zamieszczono wybrane wyniki symulacji (przebiegi sygnałów wejściowych i wyjściowych procesu oraz wartości wskaźnika E). W przypadku algorytmu PID przedstawiono kilka możliwych konfiguracji regulatora.

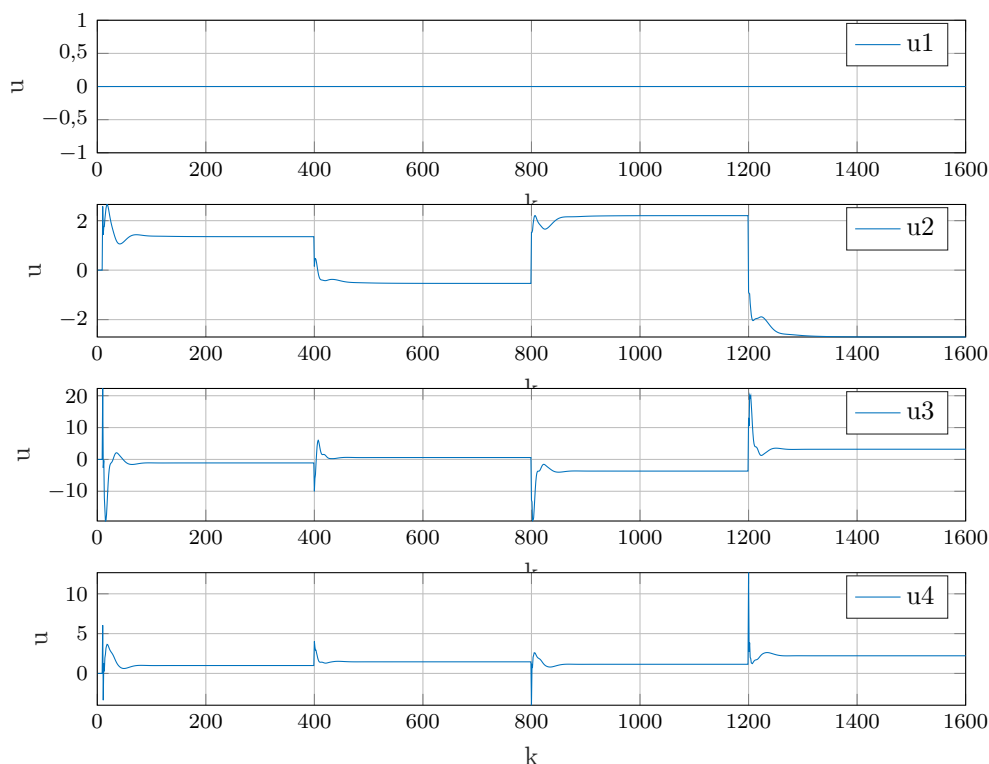
1.4.1. Konfiguracja i dobór parametrów regulatorów PID

Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_1

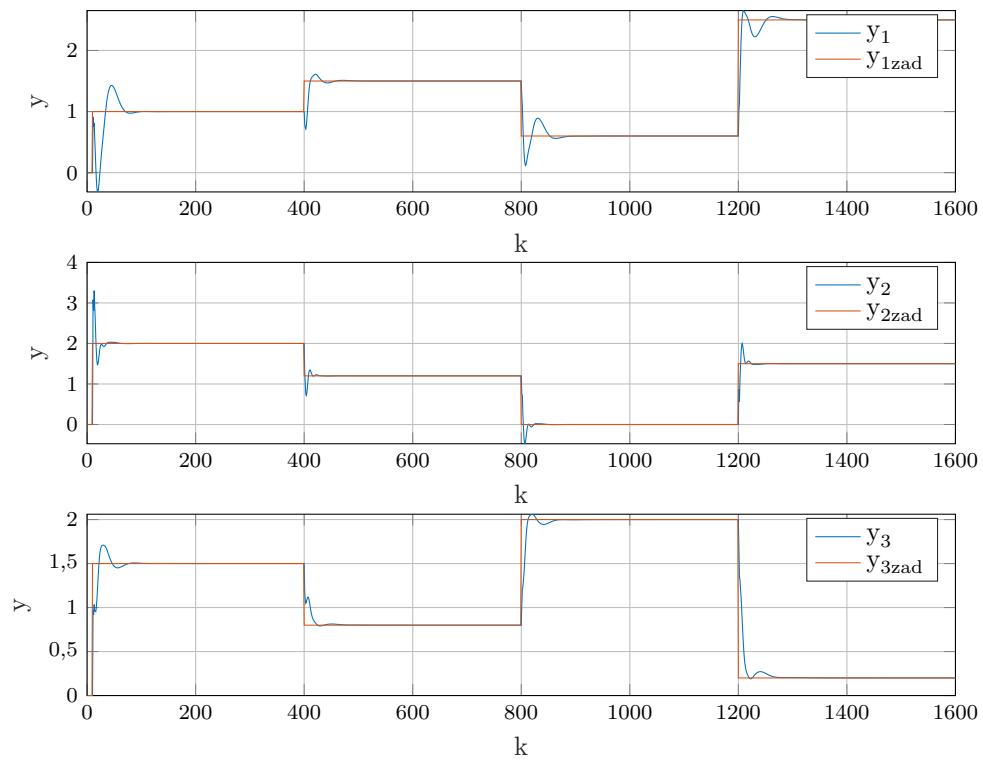
	Kr	Ti	Td
PID1	—	—	—
PID2	1.5	2	0.01
PID3	5.5	0.4	0.2
PID4	2.0	9.0	1.0

Tab. 1.1. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID1

Wartość wskaźnika $E = 79,893$.



Rys. 1.7. Przebieg sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID1

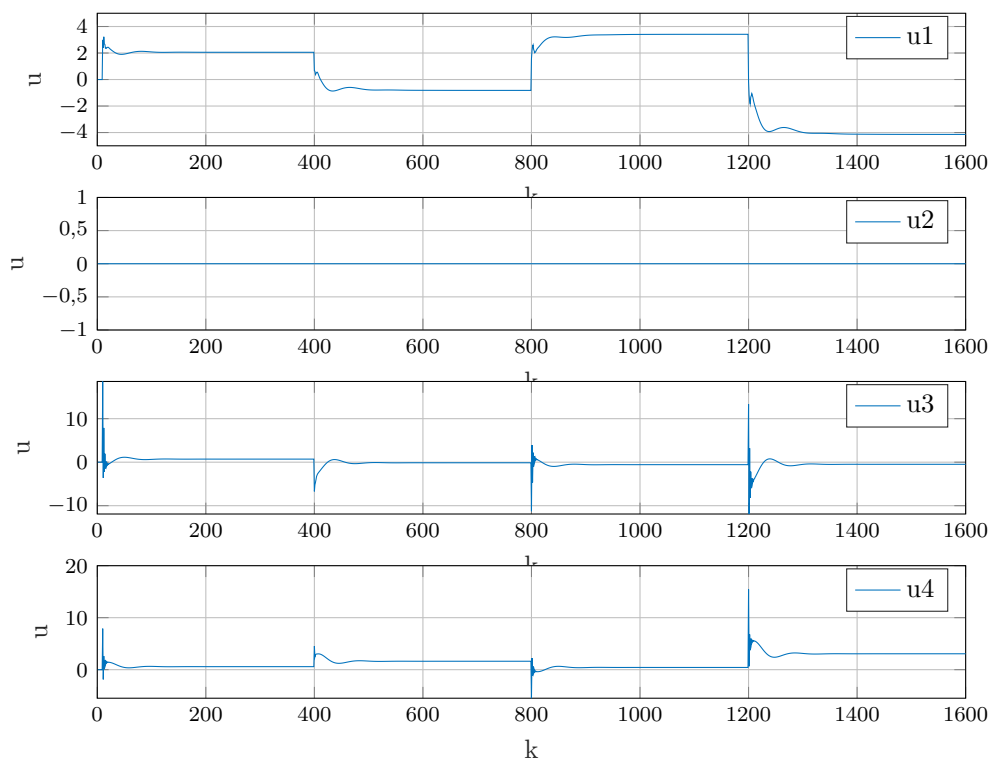


Rys. 1.8. Przebieg sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID1

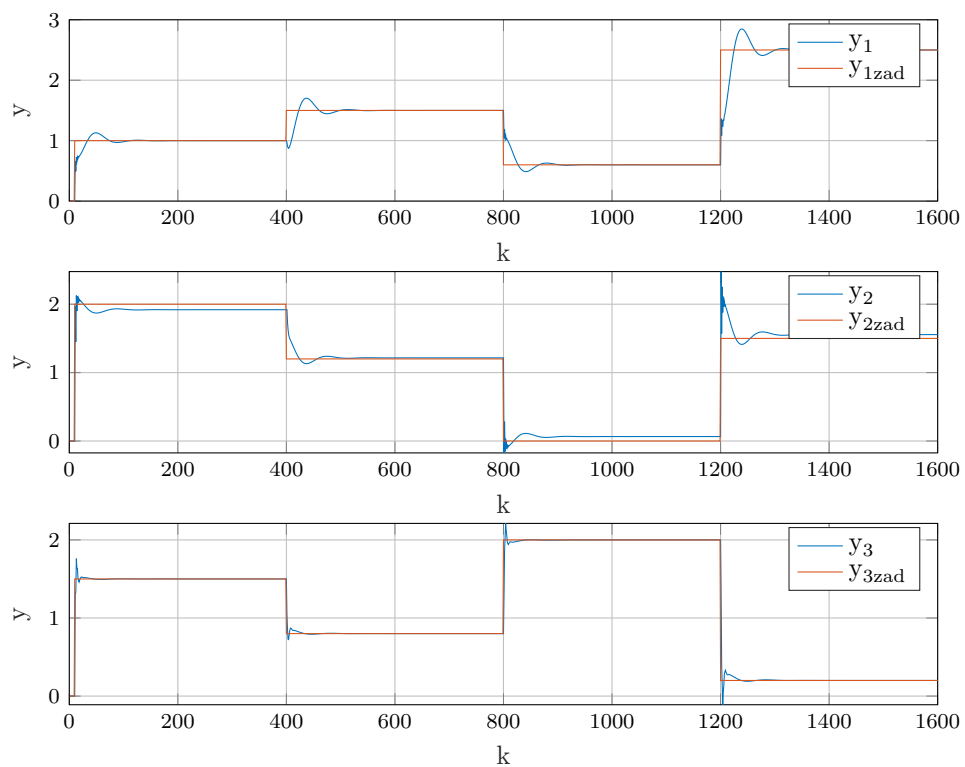
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_2

	Kr	Ti	Td
PID1	0.7	0.2	0.3
PID2	—	—	—
PID3	3.5	0.2	0.2
PID4	3.0	7.5	0.8

Tab. 1.2. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID2



Rys. 1.9. Przebieg sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID2



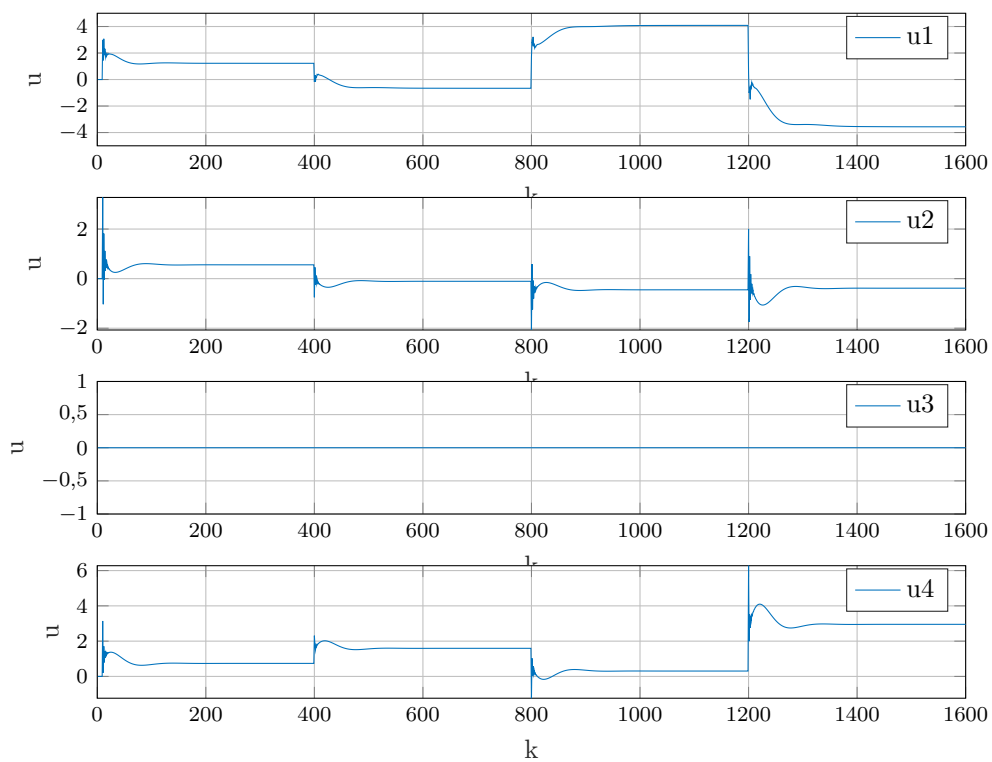
Rys. 1.10. Przebieg sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID2

Wartość wskaźnika $E = 64,3445$.

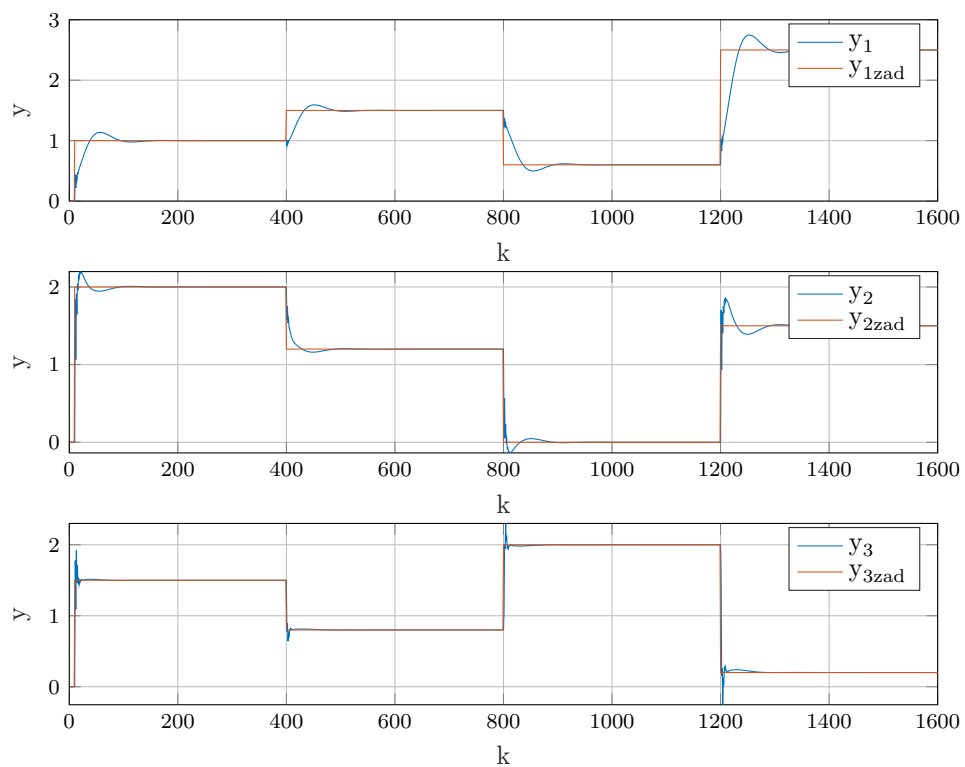
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_3

	Kr	Ti	Td
PID1	0.7	0.2	0.3
PID2	0.7	1.8	0.6
PID3	—	—	—
PID4	1.4	5.5	0.6

Tab. 1.3. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID3



Rys. 1.11. Przebieg sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID3



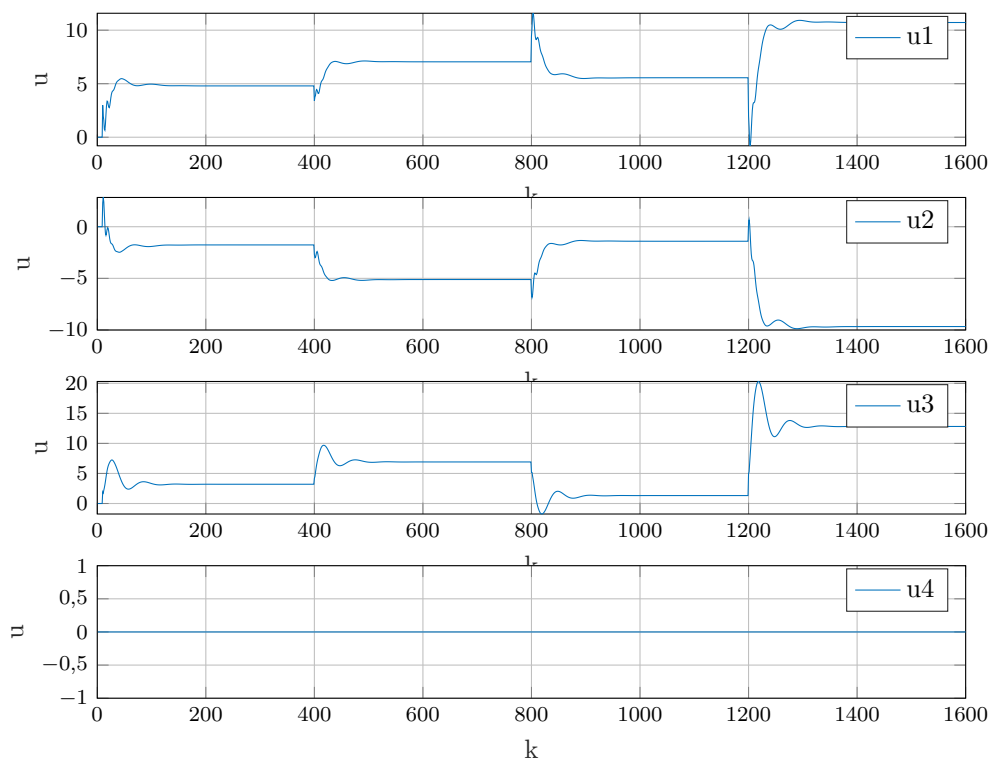
Rys. 1.12. Przebieg sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID3

Wartość wskaźnika $E = 74,1529$.

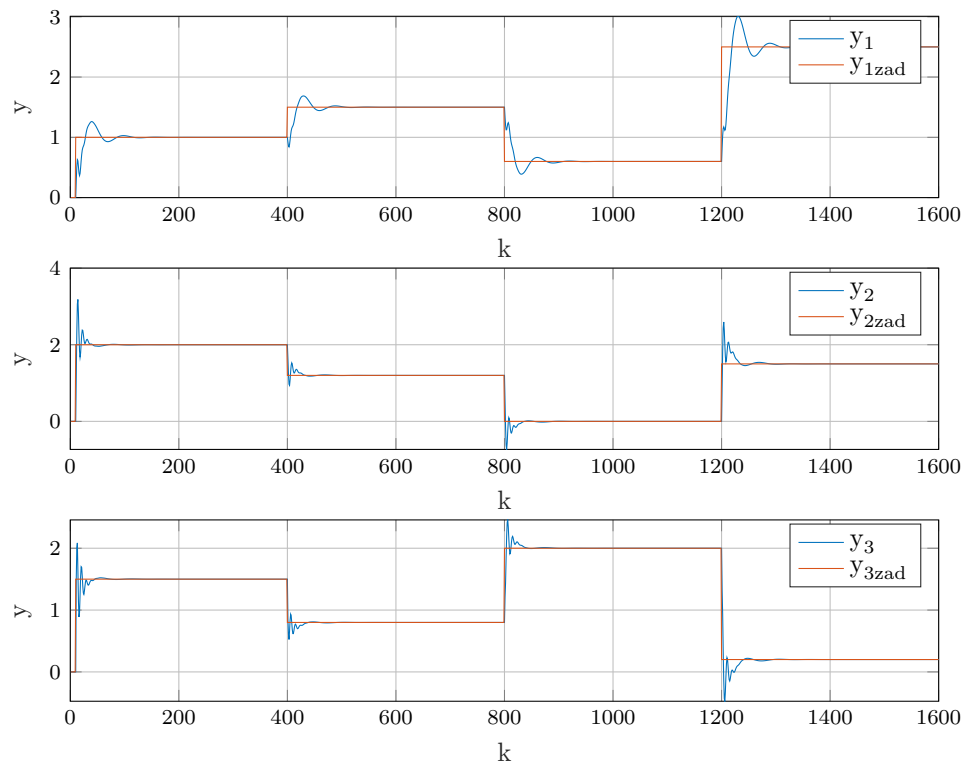
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_4

	Kr	Ti	Td
PID1	0.7	0.2	0.3
PID2	0.6	0.3	0.05
PID3	0.8	0.4	0.4
PID4	—	—	—

Tab. 1.4. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID4



Rys. 1.13. Przebieg sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID4



Rys. 1.14. Przebieg sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID4

Wartość wskaźnika $E = 79,2468$.

1.4.2. Dobór parametrów regulatorów DMC

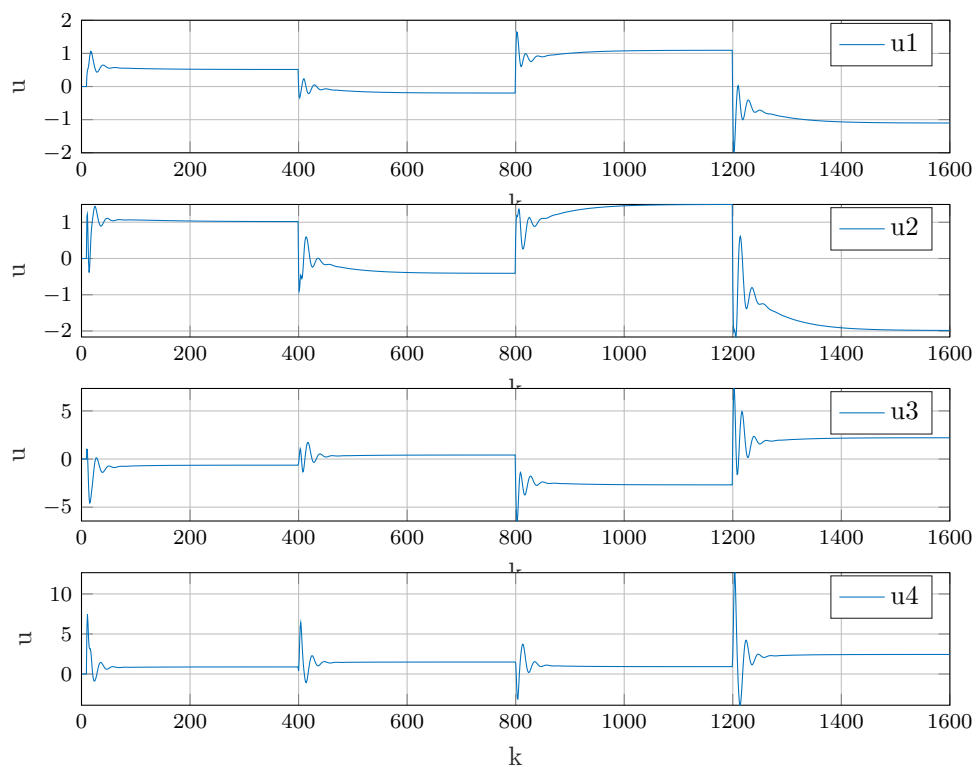
W regulatorze DMC dobierano współczynniki $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, natomiast horyzonty D, N, N_u przyjęto stałe.

Pierwszy eksperyment

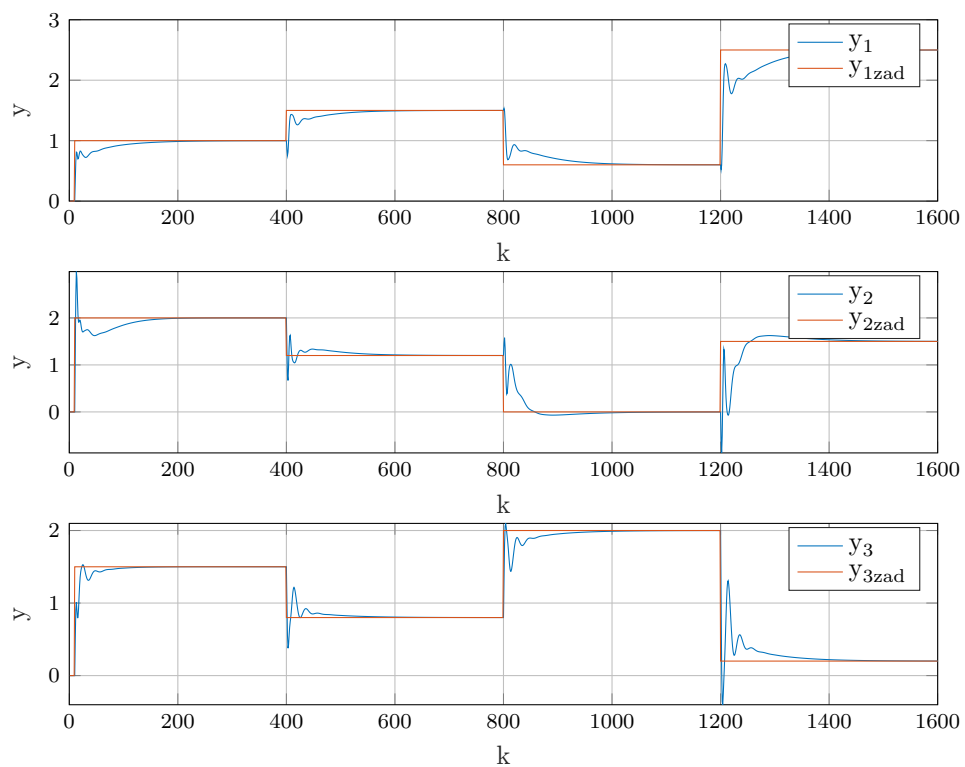
$$D = 350 \quad N = 100 \quad N_u = 15$$

$$\psi_1 = 1 \quad \psi_2 = 0,54 \quad \psi_3 = 1,3$$

$$\lambda_1 = 0,9 \quad \lambda_2 = 0,5 \quad \lambda_3 = 0,2 \quad \lambda_4 = 0,1$$



Rys. 1.15. Przebieg sygnałów sterujących DMC - pierwszy eksperyment



Rys. 1.16. Przebieg sygnałów wyjściowych DMC - pierwszy eksperyment

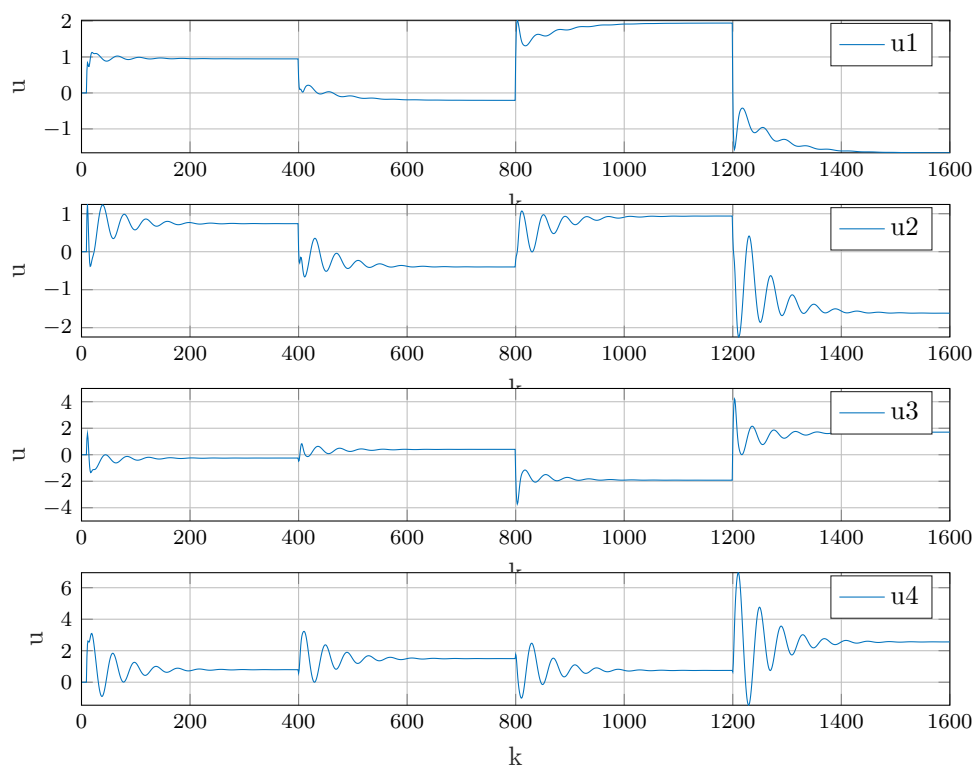
Wartość wskaźnika $E = 164,4355$

Drugi eksperyment

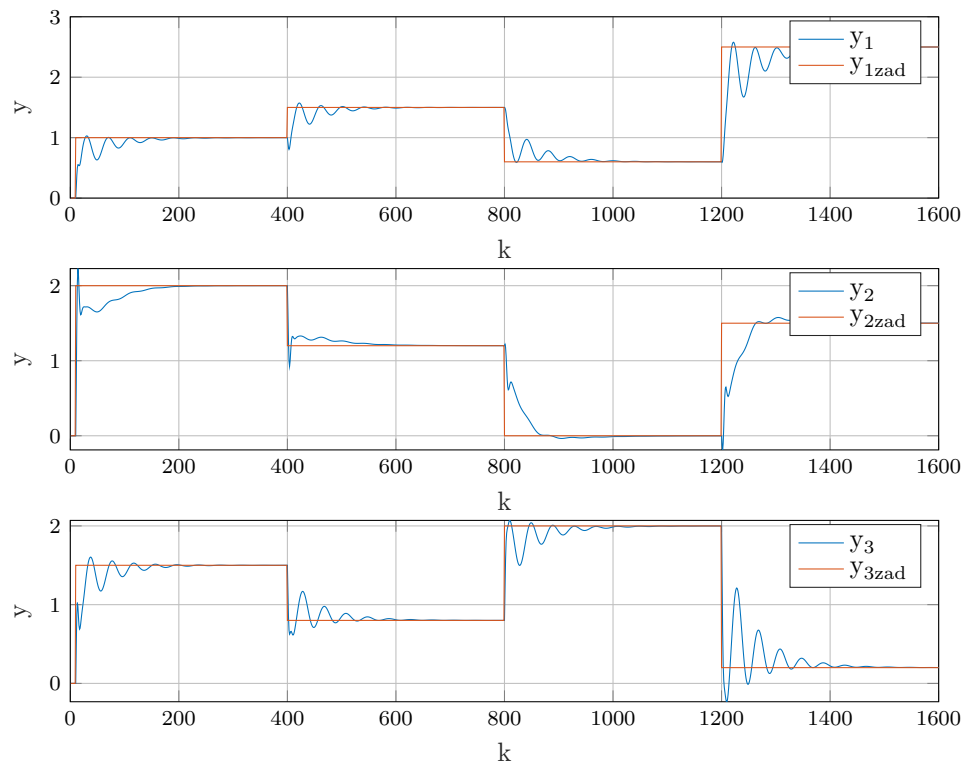
$$D = 350 \quad N = 30 \quad Nu = 5$$

$$\psi_1 = 0,89 \quad \psi_2 = 1,0 \quad \psi_3 = 1,5$$

$$\lambda_1 = 0,9 \quad \lambda_2 = 1,2 \quad \lambda_3 = 0,5 \quad \lambda_4 = 1,0$$



Rys. 1.17. Przebieg sygnałów sterujących DMC - drugi eksperyment



Rys. 1.18. Przebieg sygnałów wyjściowych DMC - drugi eksperyment

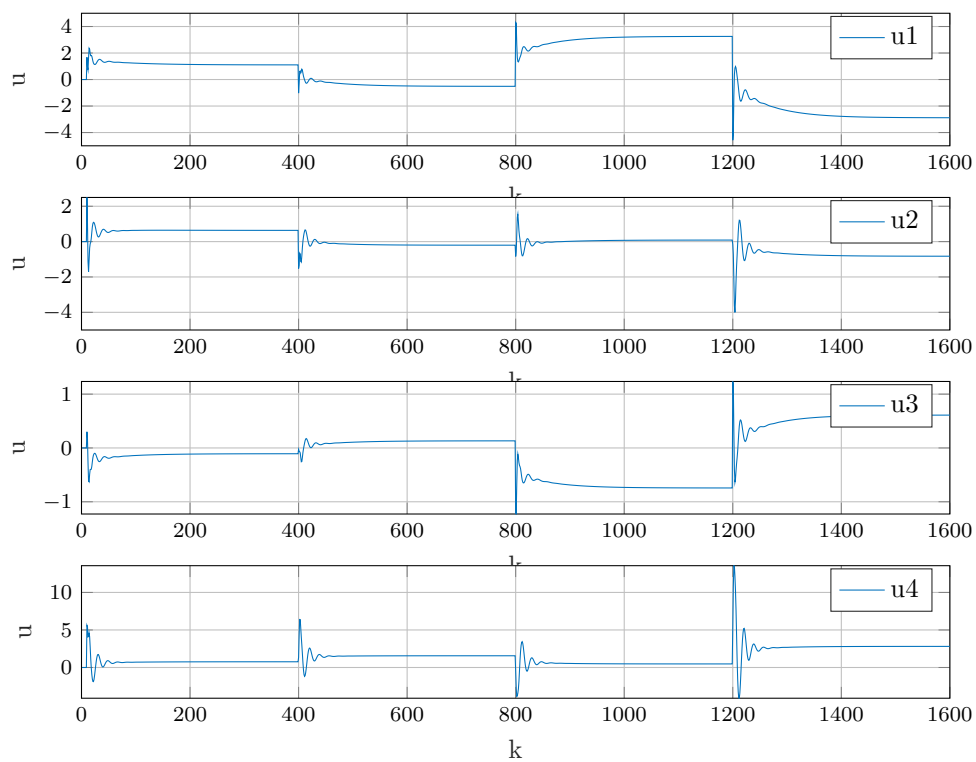
Wartość wskaźnika $E = 167,2731$

Trzeci eksperyment

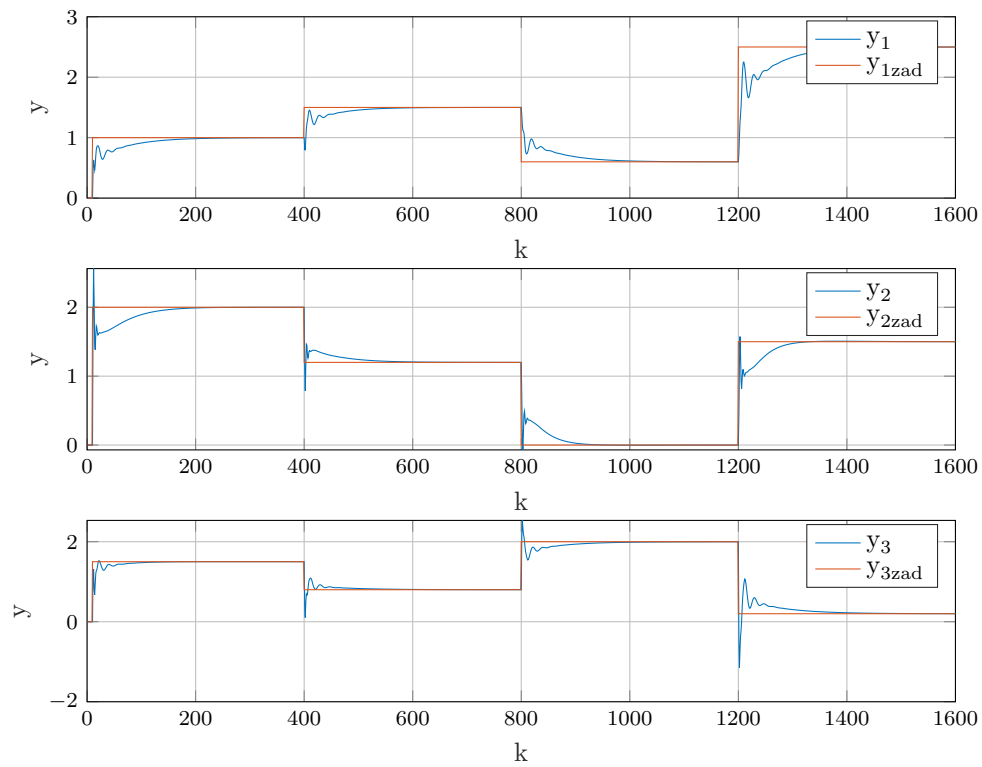
$$D = 350 \quad N = 200 \quad Nu = 10$$

$$\psi_1 = 1,0 \quad \psi_2 = 1,0 \quad \psi_3 = 1,0$$

$$\lambda_1 = 0,15 \quad \lambda_2 = 0,2 \quad \lambda_3 = 0,7 \quad \lambda_4 = 0,1$$



Rys. 1.19. Przebieg sygnałów sterujących DMC - trzeci eksperyment



Rys. 1.20. Przebieg sygnałów wyjściowych DMC - trzeci eksperyment

Wartość wskaźnika $E = 103,2769$

Nastawy regulatorów DMC z trzeciego eksperymentu dały najlepszą jakość regulacji.

1.5. Optimalizacja parametrów regulatorów PID i DMC

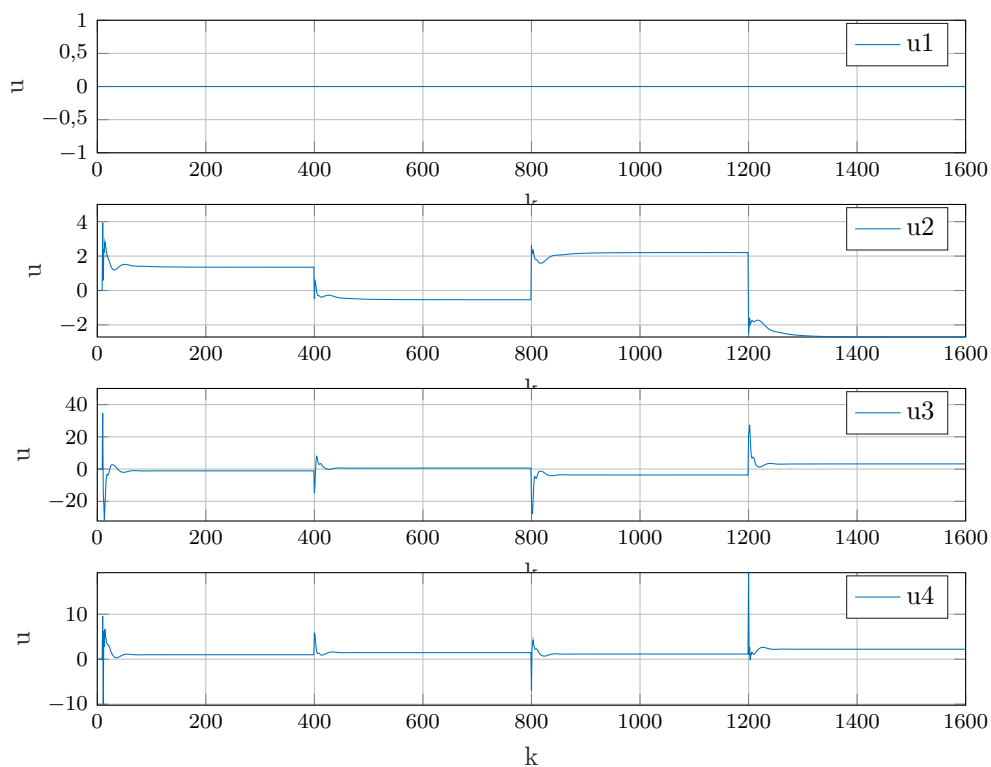
Dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnału zadanego dobrano nastawy regulatora PID w wyniku optymalizacji wskaźnika jakości regulacji E . Optymalizacji dokonano za pomocą wbudowanej funkcji MATLABa *fmincon*.

1.5.1. Optimalizacja PID

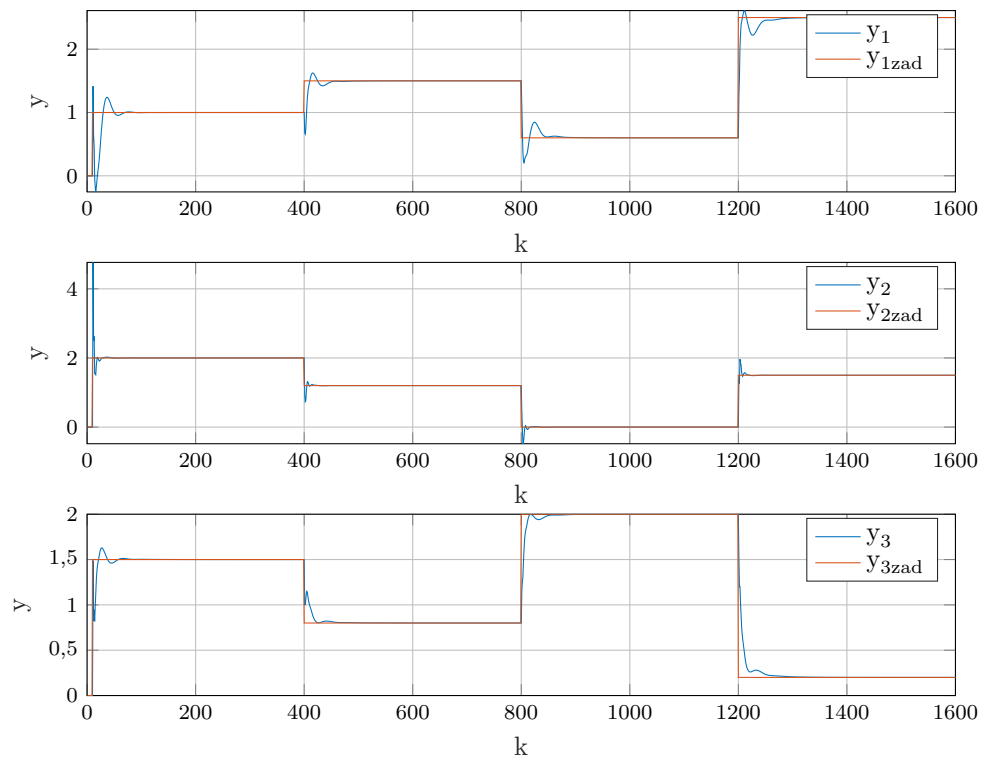
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_1

	Kr	Ti	Td
PID1	—	—	—
PID2	2.438	3.2542	0.0
PID3	8.8647	0.2623	0.0
PID4	3.1042	16.8144	1.0262

Tab. 1.5. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID1



Rys. 1.21. Przebiegi sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID 1



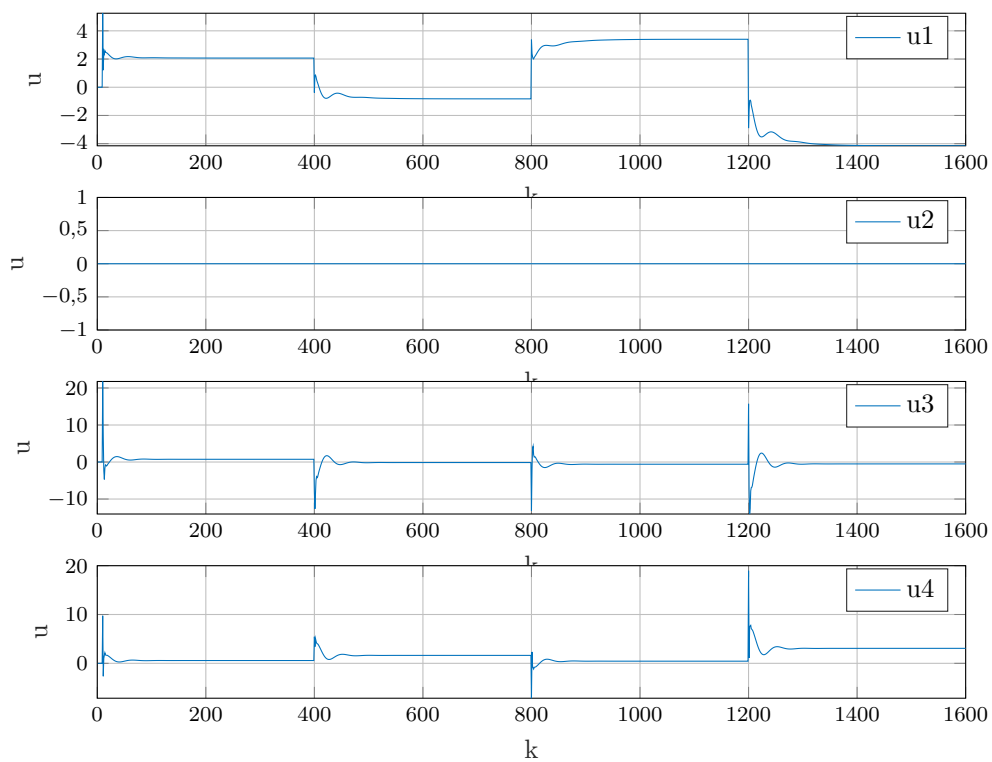
Rys. 1.22. Przebiegi sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID 1

Wartość wskaźnika $E = 64,2991$.

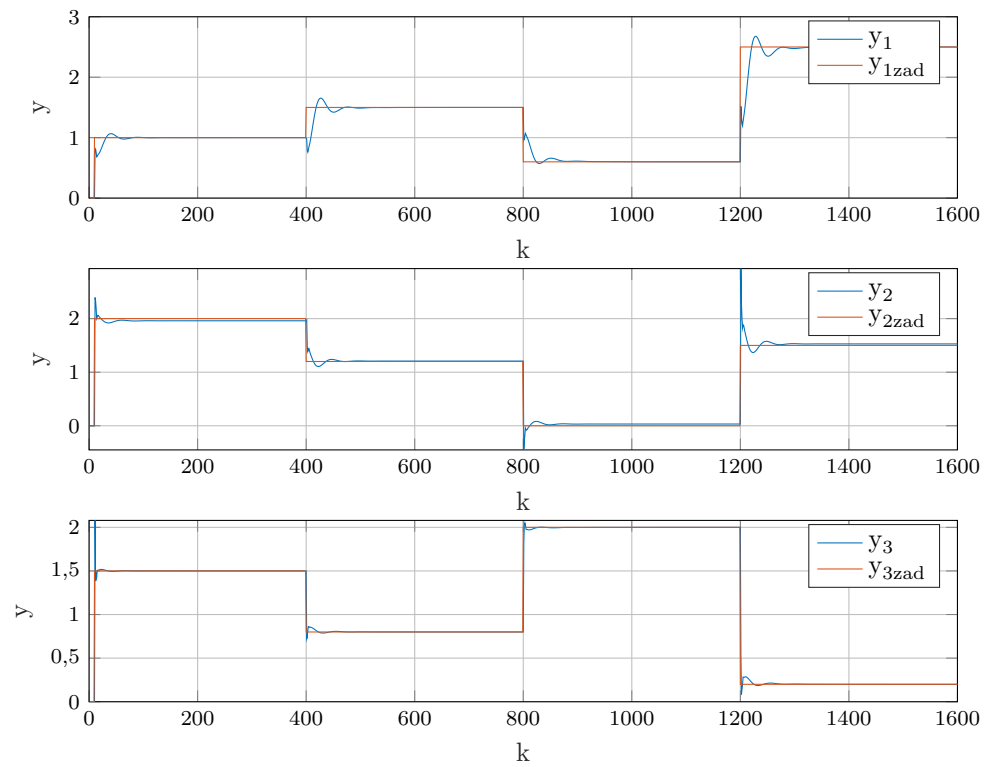
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_2

	Kr	Ti	Td
PID1	2.2901	0.5102	0.0187
PID2	—	—	—
PID3	0.0219	0.0006	39.5656
PID4	4.8545	17.6086	0.4969

Tab. 1.6. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID2



Rys. 1.23. Przebiegi sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID 2



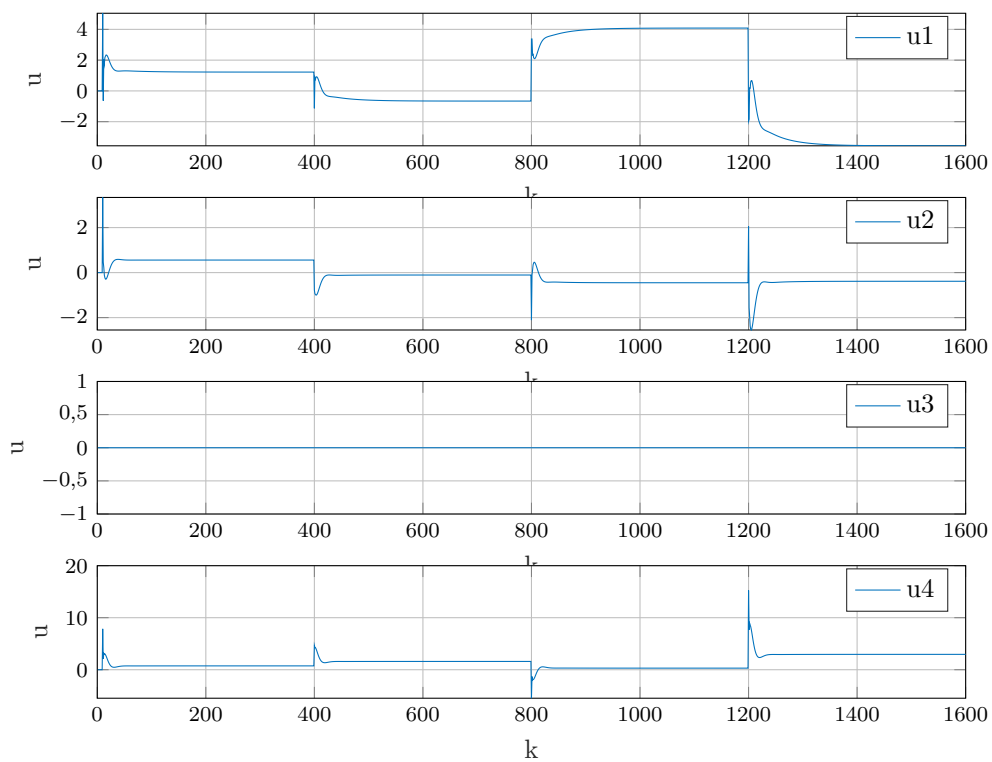
Rys. 1.24. Przebiegi sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID 2

Wartość wskaźnika $E = 51,5533$.

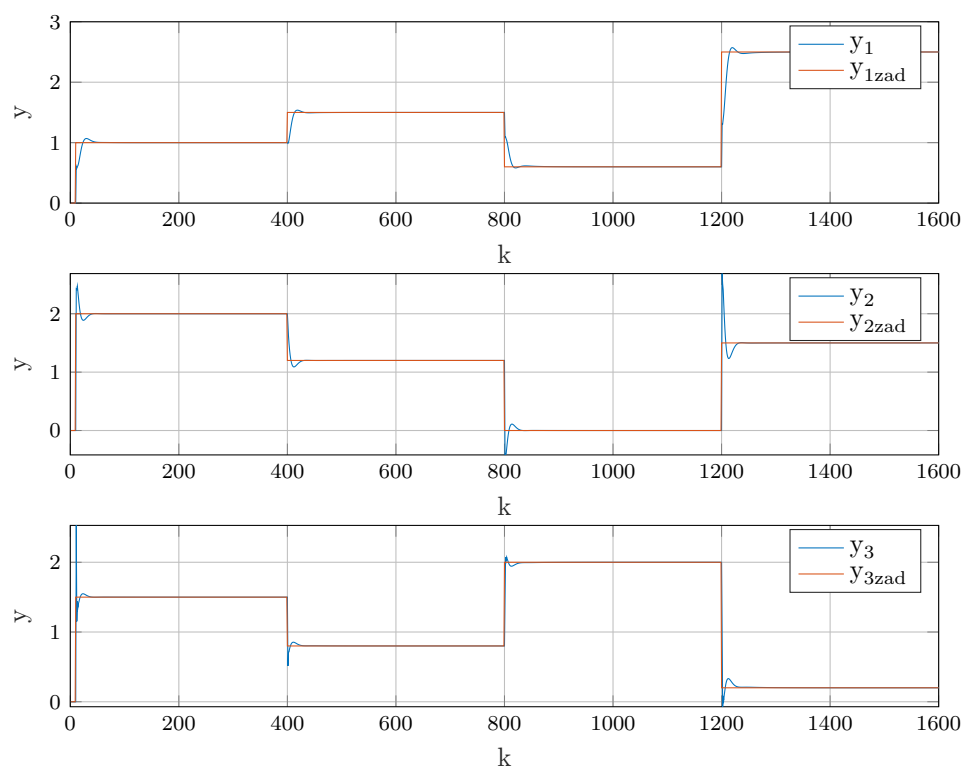
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_3

	Kr	Ti	Td
PID1	2.4231	0.6438	0.0
PID2	1.3759	1.173	0.0
PID3	—	—	—
PID4	6.4637	13.3023	0.0984

Tab. 1.7. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID3



Rys. 1.25. Przebiegi sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID 3



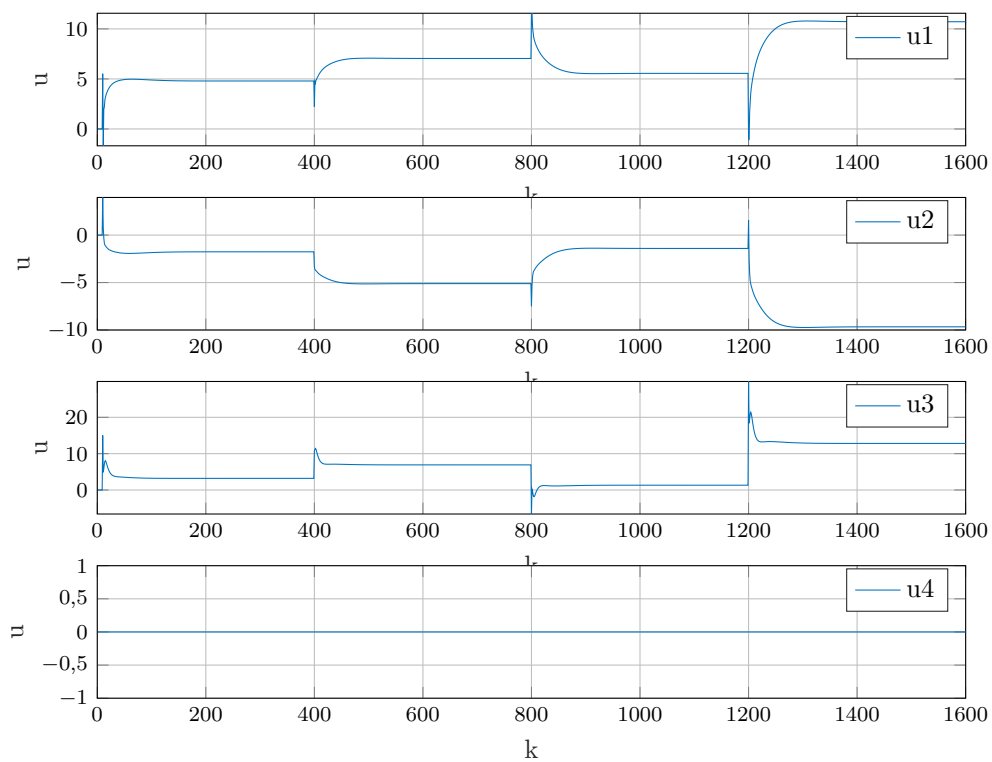
Rys. 1.26. Przebiegi sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID 3

Wartość wskaźnika $E = 42,5008$.

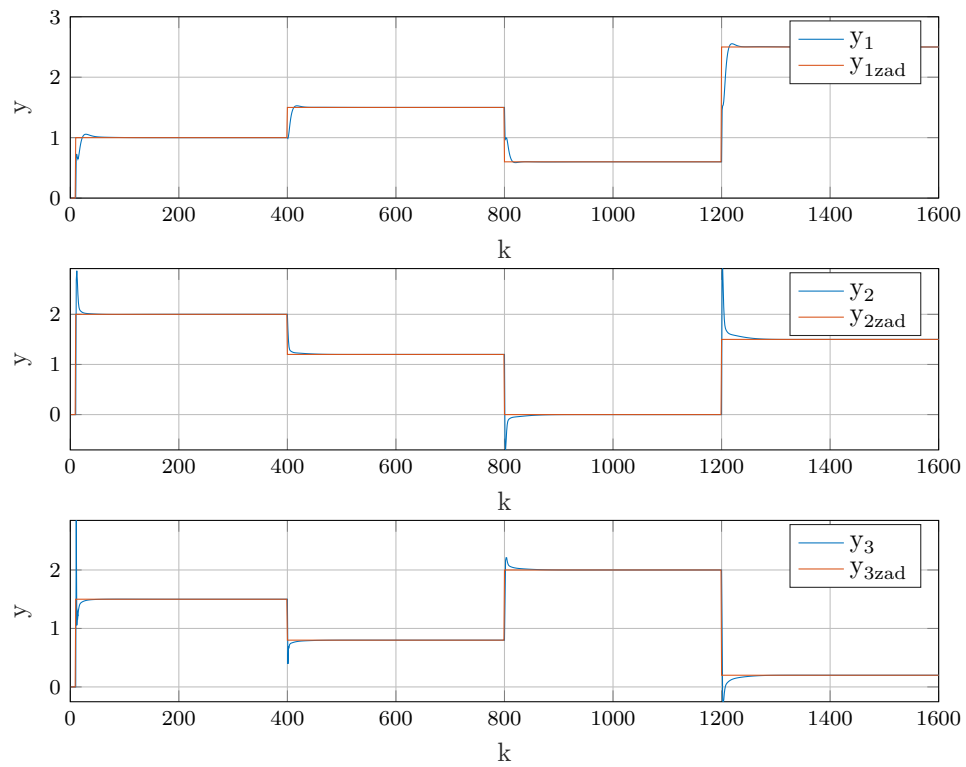
Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_4

	Kr	Ti	Td
PID1	2.5885	0.5918	0.0
PID2	1.4396	0.6631	0.0
PID3	13.4882	4.4987	0.029
PID4	—	—	—

Tab. 1.8. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID4



Rys. 1.27. Przebiegi sygnałów sterujących konfiguracji regulatorów bez PID 4



Rys. 1.28. Przebiegi sygnałów wyjściowych konfiguracji regulatorów bez PID 4

Wartość wskaźnika $E = 43,3297$.

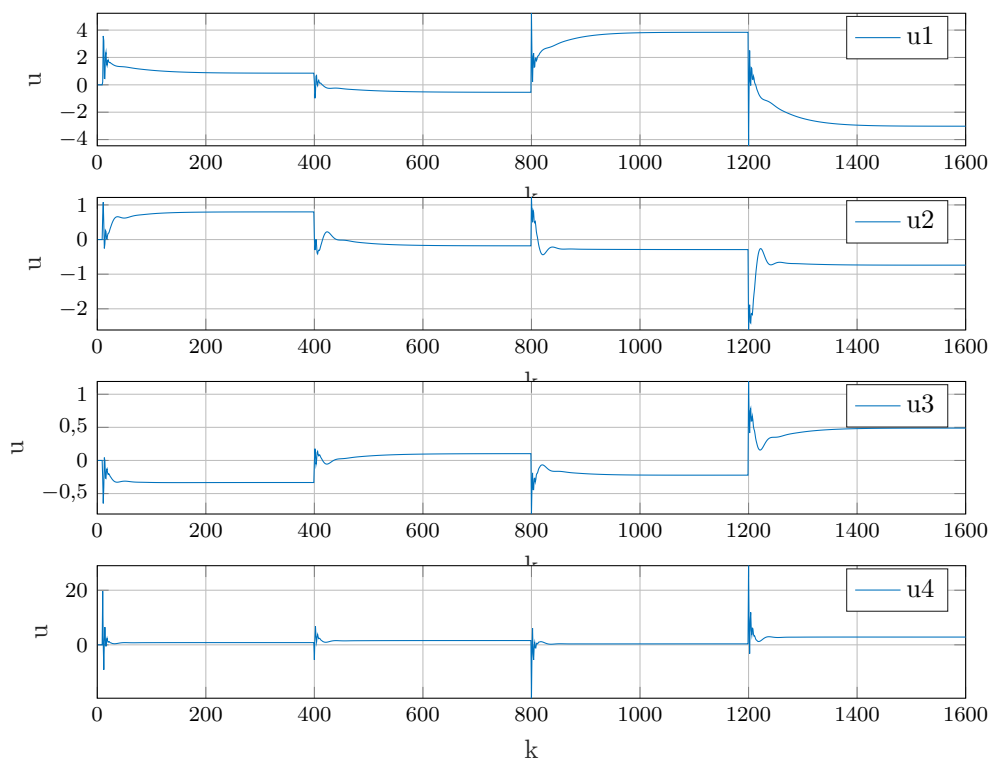
1.5.2. Optymalizacja DMC

W regulatorze DMC dobierano współczynniki $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, natomiast horyzonty D, N, N_u przyjęto stałe.

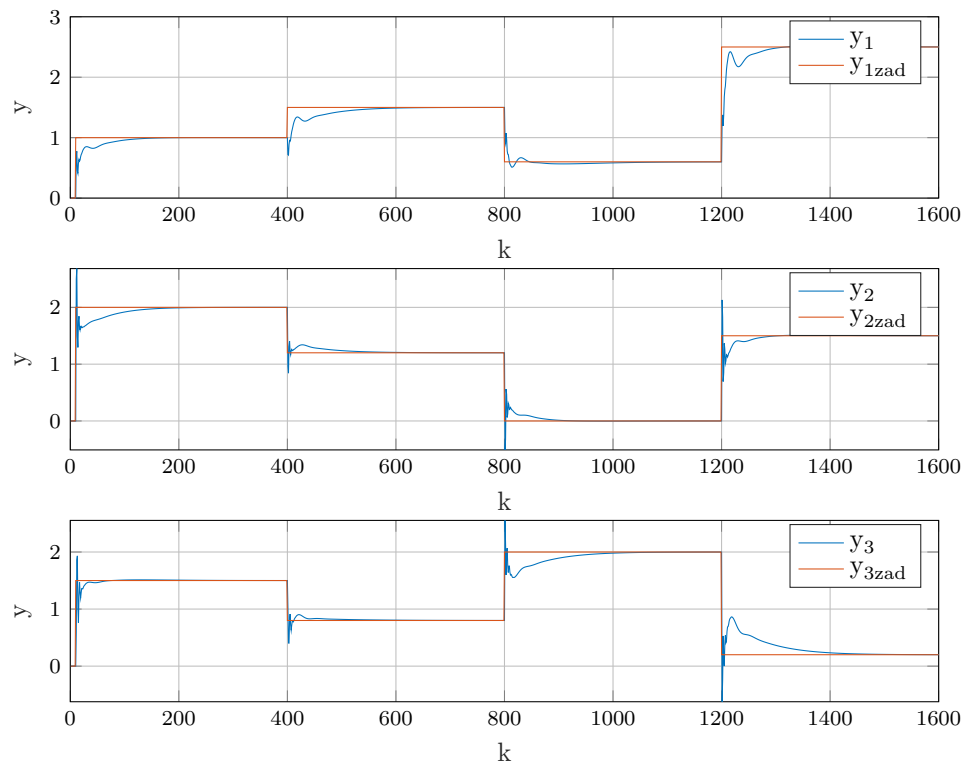
$$D = 350 \quad N = 200 \quad N_u = 10$$

$$\psi_1 = -0,5147 \quad \psi_2 = -9,3173 \quad \psi_3 = 3,2215$$

$$\lambda_1 = 0,9004 \quad \lambda_2 = -5,5093 \quad \lambda_3 = 12,1642 \quad \lambda_4 = -0,0569$$



Rys. 1.29. Przebiegi sygnałów sterujących DMC



Rys. 1.30. Przebiegi sygnałów wyjściowych DMC

Wartość wskaźnika $E = 77,9097$.

1.5.3. Wnioski

Biorąc pod uwagę ocenę regulacji jakościową oraz ilościową najlepiej prezentuje się algorytm PID z dobranymi parametrami za pomocą optymalizacji funkcją *fmincon*, pokazuje to, że prostota regulatora PID w takiej sytuacji dała możliwość lepszego dostrojenia oraz osiągnięcia lepszych wyników.

Porównanie najlepszego DMC i PID

Konfiguracja regulatorów PID niesterująca wejściem u_3

	Kr	Ti	Td
PID1	2.4231	0.6438	0.0
PID2	1.3759	1.173	0.0
PID3	—	—	—
PID4	6.4637	13.3023	0.0984

Tab. 1.9. Nastawy konfiguracji regulatorów bez PID3

Wartość wskaźnika $E = 42,5008$.

Regulator DMC z optymalizacji

$$D = 350 \quad N = 200 \quad Nu = 10$$

$$\psi_1 = -0,5147 \quad \psi_2 = -9,3173 \quad \psi_3 = 3,2215$$

$$\lambda_1 = 0,9004 \quad \lambda_2 = -5,5093 \quad \lambda_3 = 12,1642 \quad \lambda_4 = -0,0569$$

Wartość wskaźnika $E = 77,9097$.

Wskaźnik jakości jest prawie dwa razy większy w przypadku regulatora DMC. Regulator PID okazał się lepiej sterującym, jednak wymagał większego nakładu pracy na etapie strojenia.

1.6. Implementacja algorytmu DMC w wersji klasycznej

1.6.1. Program do symulacji algorytmu DMC w wersji klasycznej

Nastawy regulatora DMC dobrane eksperymentalnie i optymalizacyjnie

Listing 1.13. "Nastawy regulatora DMC dobrane eksperymentalnie i optymalizacyjnie"

```
%zadanie 6 - Skrypt relizujący algorytm DMC
%          regulatora klasycznego wielowymiarowego
clear all

%nastawy regulatora DMC
D = 350;%horyzont dynamiki

N = 200;%horyzont predykcji
Nu = 10;%horyzont sterowania

eks = 0;
%dobrane eksperymentalnie
if eks == 1
    lambda1 = 0.15;
    lambda2 = 0.2;
    lambda3 = 0.7;
    lambda4 = 0.1;
    psi1 = 1;
    psi2 = 1;
    psi3 = 1;
else
    lambda1 = 0.9;
    lambda2 = 1.2;
    lambda3 = 0.5;
    lambda4 = 1;
    psi1 = 0.89;
    psi2 = 1;
    psi3 = 1.5;
    N = 30;%horyzont predykcji
    Nu = 5;%horyzont sterowania
end
```


Wyznaczanie macierzy S, Mp i M regulatora DMC

Listing 1.14. "Wyznaczanie macierzy S Mp i M regulatora DMC"

```
%warunki poczatkowe
nu = 4;
ny = 3;
load('s.mat')
%Macierz odpowiedzi skokowych
for i = 1:D
    S(i)=[s11(i) s12(i) s13(i) s14(i);...
          s21(i) s22(i) s23(i) s24(i);...
          s31(i) s32(i) s33(i) s34(i)];
end

% Macierz predykcji
for i = 1:N
    for j = 1:D-1
        if i+j <= D
            Mp{i,j} = S{i+j}-S{j};
        else
            Mp{i,j} = S{D}-S{j};
        end
    end
end

% Macierz M
for i=1:Nu
    M(i:N,i)=S(1:N-i+1);
    M(1:i-1,i)=[0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
end
```

Wyznaczanie macierzy Lambda, Psi i K regulatora DMC

Listing 1.15. "Wyznaczanie macierzy Lambda Psi i K regulatora DMC"

```

%Macierz lambda
for i=1:Nu
    for j=1:Nu
        if i==j
            Lambda{i,j}=[lambda1 0 0 0; 0 lambda2 0 0;...
                          0 0 lambda3 0; 0 0 0 lambda4];
        else
            Lambda{i,j}=[0 0 0 0; 0 0 0 0;...
                          0 0 0 0; 0 0 0 0];
        end
    end
end

%Macierz Psi
for i=1:N
    for j=1:N
        if i==j
            Psi{i,j}=[psi1 0 0; 0 psi2 0; 0 0 psi3];
        else
            Psi{i,j}=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 0];
        end
    end
end

%Macierz K
for i = 1:Nu
    size(i) = nu;
end
for i=1:N
    size2(i) = ny;
end

M_temp = cell2mat(M);
M_temp_tr = M_temp';
Psi_temp = cell2mat(Psi);
M_temp_tr = M_temp_tr * Psi_temp;
M_temp = mat2cell(M_temp_tr*M_temp,size,size);
for i=1:Nu
    for j=1:Nu
        L{i,j} = M_temp{i,j}+Lambda{i,j}; %Dodanie Lambdy
    end
end
L_temp = cell2mat(L);
L_temp_rev = mat2cell(L_temp^(-1),size,size);
L_temp_rev = cell2mat(L_temp_rev);

```

Inicjalizacja macierzy do przechowywania danych

Listing 1.16. "Inicjalizacja macierzy do przechowywania danych"

```
%Macierze do przechowywania danych
u_d = zeros(nu,1);
for i = 1:D-1
    u_delta(i,1) = {u_d};
end

y_z = zeros(ny,1);
for i = 1:N
    y_zad_mod(i,1) = {y_z};
end

Y_dmc = zeros(ny,1);
for i=1:N
    y_mod(i,1)={Y_dmc};
end

for i=1:N
    Y0(i,1)={[0;0]};
end

du = zeros(nu,1);
for i=1:Nu
    dU_mod(i,1)={du};
end
```

Parametry symulacji

Listing 1.17. "Parametry symulacji"

```
%parametry symulacji
kk = 1600;
start = 10;
u1 = zeros(1, kk);
u2 = zeros(1, kk);
u3 = zeros(1, kk);
u4 = zeros(1, kk);
y1 = zeros(1, kk);
y2 = zeros(1, kk);
y3 = zeros(1, kk);

Ey = zeros(ny, 1);

y1_zad = zeros(1, kk);
y1_zad(start:400) = 1;
y1_zad(400:800) = 1.5;
y1_zad(800:1200) = 0.6;
y1_zad(1200:kk) = 2.5;

y2_zad = zeros(1, kk);
y2_zad(start:400) = 2;
y2_zad(400:800) = 1.2;
y2_zad(800:1200) = 0;
y2_zad(1200:kk) = 1.5;

y3_zad = zeros(1, kk);
y3_zad(start:400) = 1.5;
y3_zad(400:800) = 0.8;
y3_zad(800:1200) = 2;
y3_zad(1200:kk) = 0.2;
```

Główna pętla symulacyjna

Listing 1.18. "Główna pętla symulacyjna"

```

for k = start:kk
    % Równanie różnicowe
    [y1(k),y2(k),y3(k)] = symulacja_obiektu7(u1(k-1),u1(k-2),u1(k-3),u1(k-4),...
        u2(k-1),u2(k-2),u2(k-3),u2(k-4),u3(k-1),u3(k-2),u3(k-3),u3(k-4),...
        u4(k-1),u4(k-2),u4(k-3),u4(k-4),y1(k-1),y1(k-2),y1(k-3),y1(k-4),...
        y2(k-1),y2(k-2),y2(k-3),y2(k-4),y3(k-1),y3(k-2),y3(k-3),y3(k-4));

    % Regulator
    Y_dmc(1) = y1(k);
    Y_dmc(2) = y2(k);
    Y_dmc(3) = y3(k);
    for i=1:N
        y_mod(i,1)={Y_dmc};
    end

    Y_zad(1) = y1_zad(k);
    Y_zad(2) = y2_zad(k);
    Y_zad(3) = y3_zad(k);

    for i=1:N
        y_zad_mod(i,1) = {Y_zad}';
    end

    %obliczanie Y0
    Mp_tmp = cell2mat(Mp);
    u_delta_tmp = cell2mat(u_delta);
    Y0_tmp = mat2cell(Mp_tmp * u_delta_tmp,size2,[1]);
    for i = 1:N
        Y0{i,1} = y_mod{i,1} + Y0_tmp{i,1};
    end

    %obliczanie dU
    for i = 1:N
        uchyb{i,1} = y_zad_mod{i,1} - Y0{i,1};
    end
    K_tmp = cell2mat(K);
    uchyb_tmp = cell2mat(uchyb);
    dU_mod = mat2cell(K_tmp*uchyb_tmp,size,[1]);
    du = dU_mod{1};

    for n = D-1:-1:2
        u_delta(n) = u_delta(n-1);
    end

    u1(k) = u1(k-1) + du(1);
    u2(k) = u2(k-1) + du(2);
    u3(k) = u3(k-1) + du(3);
    u4(k) = u4(k-1) + du(4);
    u_delta(1,1) = {du};

    %bledy
    Ey(1) = Ey(1) + (y1_zad(k) - y1(k))^2;
    Ey(2) = Ey(2) + (y2_zad(k) - y2(k))^2;
    Ey(3) = Ey(3) + (y3_zad(k) - y3(k))^2;

end

```

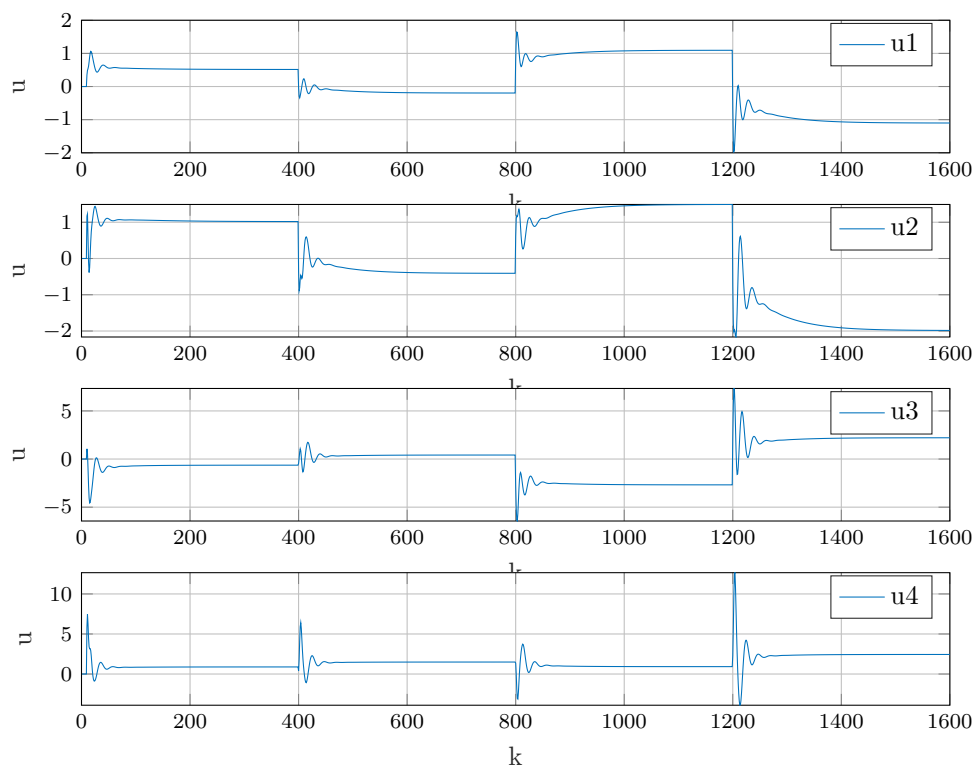
1.6.2. Porównanie implementacji regulatorów DMC

Pierwszy eksperyment

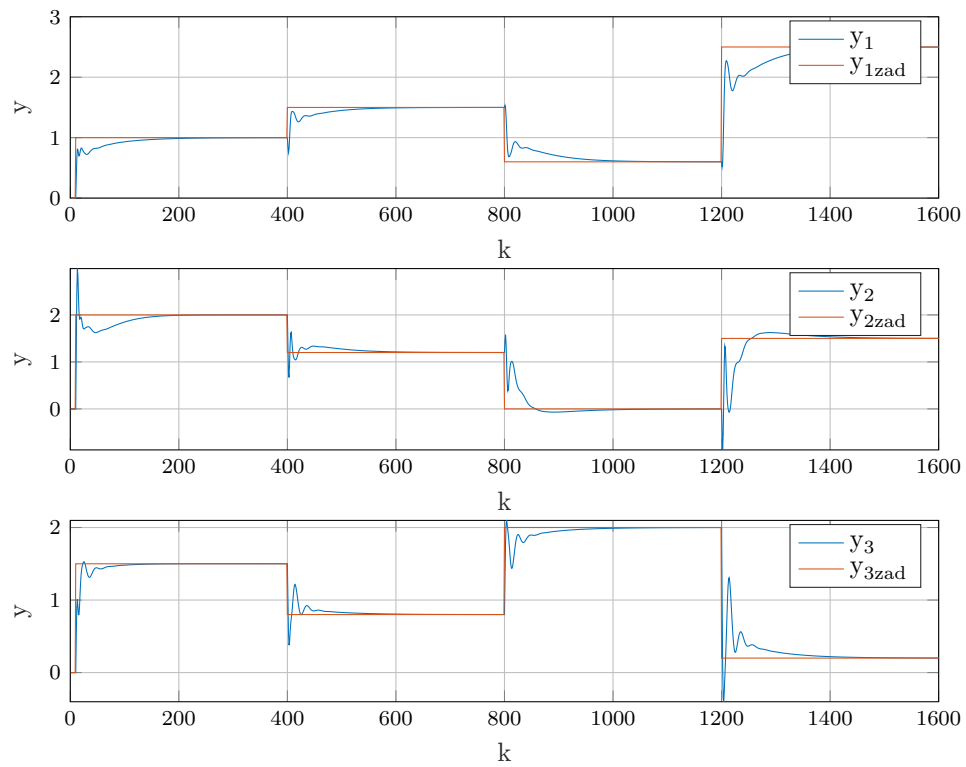
$$D = 350 \quad N = 100 \quad Nu = 15$$

$$\psi_1 = 1 \quad \psi_2 = 0,54 \quad \psi_3 = 1,3$$

$$\lambda_1 = 0,9 \quad \lambda_2 = 0,5 \quad \lambda_3 = 0,2 \quad \lambda_4 = 0,1$$



Rys. 1.31. Przebiegi sygnałów sterujących DMC - pierwszy eksperyment



Rys. 1.32. Przebiegi sygnałów wyjściowych DMC - pierwszy eksperyment

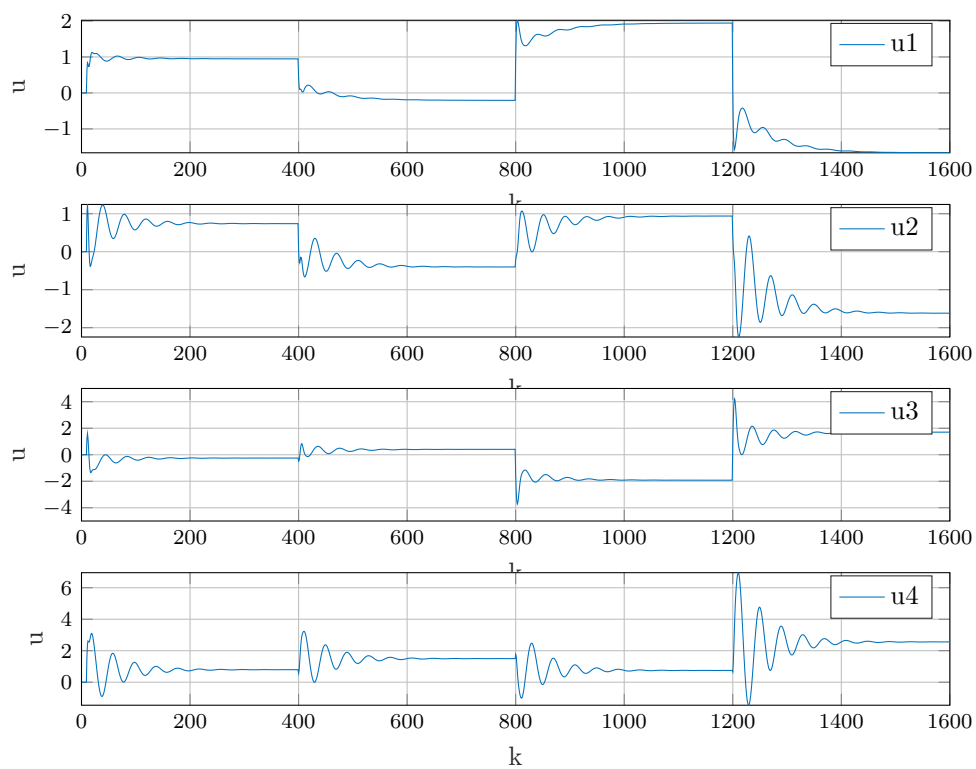
Wartość wskaźnika $E = 164,4355$

Drugi eksperyment

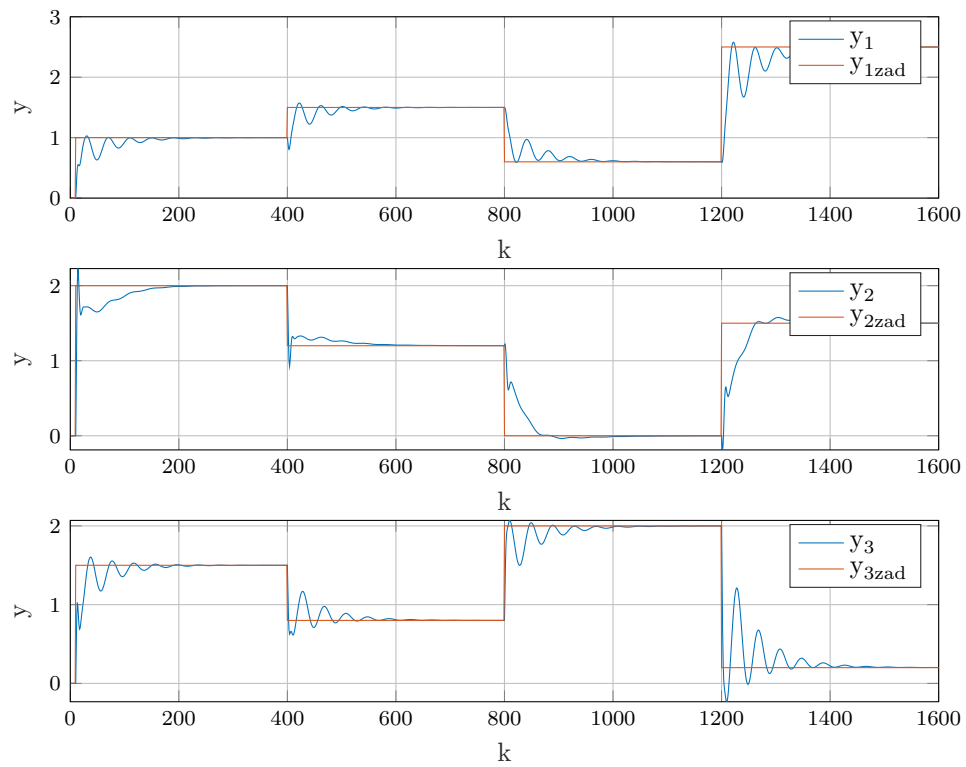
$$D = 350 \quad N = 30 \quad Nu = 5$$

$$\psi_1 = 0,89 \quad \psi_2 = 1,0 \quad \psi_3 = 1,5$$

$$\lambda_1 = 0,9 \quad \lambda_2 = 1,2 \quad \lambda_3 = 0,5 \quad \lambda_4 = 1,0$$



Rys. 1.33. Przebiegi sygnałów sterujących DMC - drugi eksperyment



Rys. 1.34. Przebiegi sygnałów wyjściowych DMC - drugi eksperyment

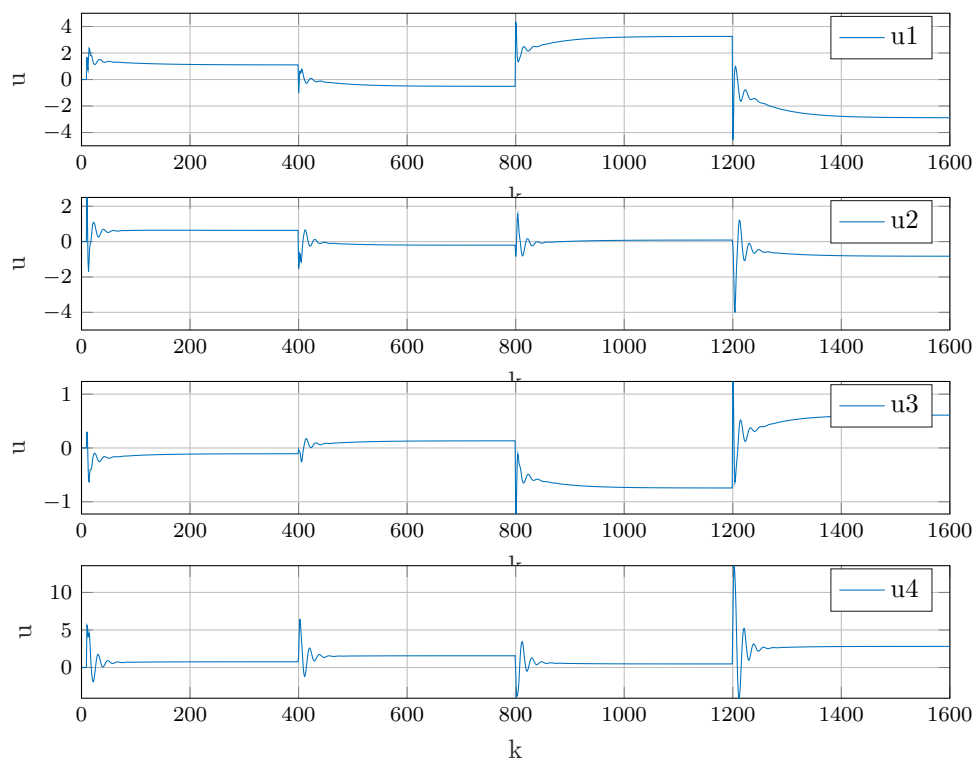
Wartość wskaźnika $E = 167,2731$

Trzeci eksperyment

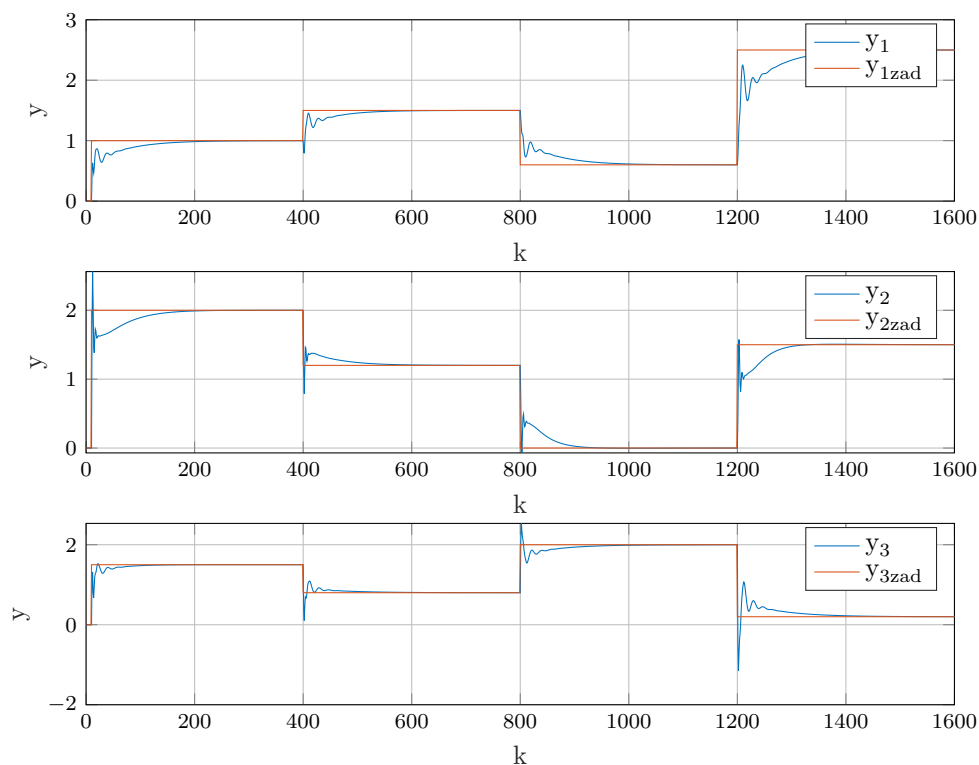
$$D = 350 \quad N = 200 \quad Nu = 10$$

$$\psi_1 = 1,0 \quad \psi_2 = 1,0 \quad \psi_3 = 1,0$$

$$\lambda_1 = 0,15 \quad \lambda_2 = 0,2 \quad \lambda_3 = 0,7 \quad \lambda_4 = 0,1$$



Rys. 1.35. Przebiegi sygnałów sterujących DMC - trzeci eksperyment



Rys. 1.36. Przebiegi sygnałów wyjściowych DMC - trzeci eksperyment

Wartość wskaźnika $E = 103,2769$

1.6.3. Wnioski

Otrzymane wyniki symulacji dla wybranego zestawu parametrów są takie same jak w wersji klasycznej.

Algorytm DMC w najprostszej wersji uzyskał taki sam wskaźnik regulacji co DMC w klasycznej wersji, a dzięki uproszczeniu obliczeń jest szybszy.

2. Laboratorium

2.1. Stanowisko grzejąco-chłodzące

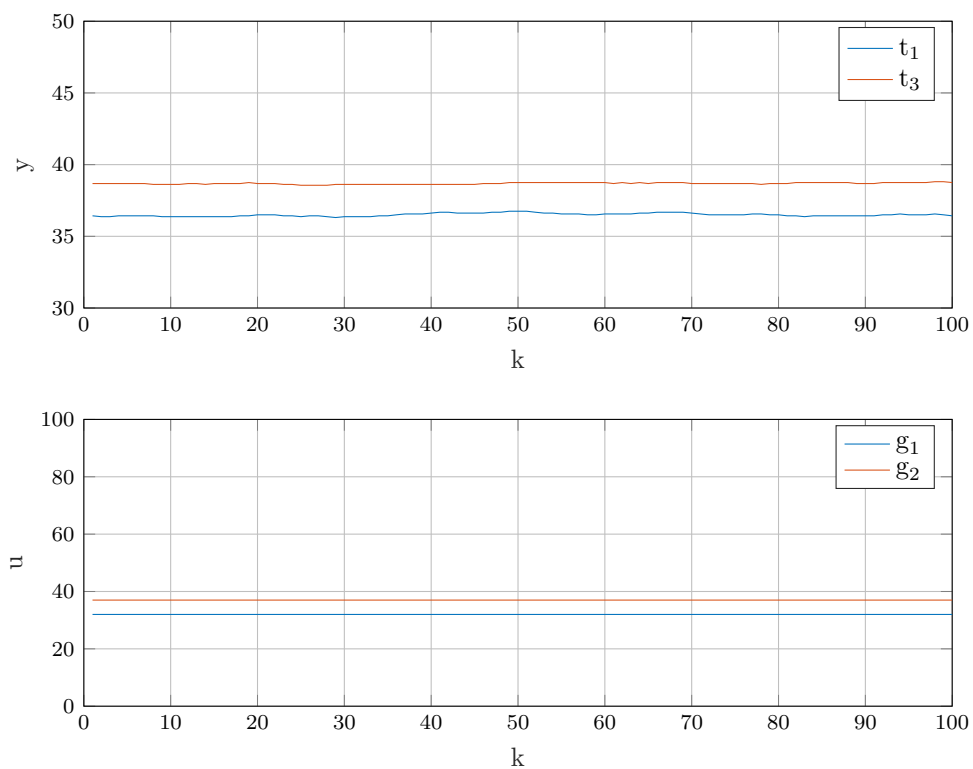
2.1.1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

Sygnały sterujące ustawione zostały na wskazane w poleceniu wartości:

$$G1 = 32,0 \quad G2 = 37,0 \quad W1 = 50,0 \quad W2 = 50,0$$

Sprawdzona została możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem. Wartości temperatur w punkcie pracy wyniosły:

$$T1 = 36,3 \quad T2 = 38,3$$



Rys. 2.1. Obiekt w stanie ustalonym

2.1.2. Zabezpieczenia stanowiska

W celu zabezpieczenia stanowiska przed uszkodzeniem na sterowniku został zaimplementowany mechanizm, który przy przekroczeniu temperatury 150,0 stopni Celsjusza wyłącza grzałkę sąsiadującą z czujnikiem, który zmierzył niebezpieczną temperaturę.

Implementacja takiego mechanizmu jest prosta, ale niezwykle istotna w tego typu procesach. Zadeklarowano wartość krytyczną temperatury oraz zaimplementowano funkcję sprawdzającą czy wskazanie czujnika nie przekracza tej wartości. W przypadku jej przekroczenia grzałka sąsiadująca z danym czujnikiem zostaje wyłączona, a sterowanie *G1* lub *G2* zostaje ustawione na 0.

Implementacja mechanizmu zabezpieczeń stanowiska na PLC

Listing 2.1. "Implementacja mechanizmu zabezpieczeń stanowiska na PLC"

```
// Program: Modbus; Typ: Scan
// Jesli czujnik T1 wskazuje ponad 150 stopni
IF(T_1 >= K15000) THEN
    SET(TRUE, T_1_alarm);
END_IF;

// Jesli czujnik T3 wskazuje ponad 150 stopni
IF(T_3 >= K15000) THEN
    SET(TRUE, T_3_alarm);
END_IF;

// Jesli aktywny alarm T1 wylacz grzalke G1
IF(T_1_alarm) THEN
    MOV(TRUE, KO, G_1);
END_IF;

// Jesli aktywny alarm T3 wylacz grzalke G2
IF(T_3_alarm) THEN
    MOV(TRUE, KO, G_2);
END_IF;
```

2.1.3. Implementacja oraz dobór nastaw dwupętlowego regulatora PID

Na sterowniku zaimplementowano uwzględniając ograniczenia dwupętlowy regulator PID. Wyznaczając model dobrano nastawy regulatora.

Implementacja regulatora PID

Listing 2.2. "Inicjacja parametrów regulatora PID toru G1-T1"

```
//Program: Init; Typ: Initial
//init regulatora PID_G1
PID_G1.K_gain := 30.1;
PID_G1.TI := 25.0;
PID_G1.TD := 1.0;
PID_G1.Ep0 := 0.0;
PID_G1.Ep1 := 0.0;
PID_G1.Ep2 := 0.0;
PID_G1.Rp0 := 0.0;
PID_G1.Rp1 := 0.0;
PID_G1.Rp2 := 0.0;
PID_G1.sampling_time := 4.0;
PID_G1.SV := 36.68;
PID_G1.MV := 32.0;
```

Listing 2.3. "Inicjacja parametrów regulatora PID toru G2-T3"

```
//Program: Init; Typ: Initial
//init regulatora PID_G2
PID_G2.K_gain := 30.7;
PID_G2.TI := 25.5;
PID_G2.TD := 1.0;
PID_G2.Ep0 := 0.0;
PID_G2.Ep1 := 0.0;
PID_G2.Ep2 := 0.0;
PID_G2.Rp0 := 0.0;
PID_G2.Rp1 := 0.0;
PID_G2.Rp2 := 0.0;
PID_G2.sampling_time := 4.0;
PID_G2.SV := 38.68;
PID_G2.MV := 37.0;
```

Listing 2.4. "Program regulatora PID toru G1-T1"

```

//Program: PID_R; Typ: FixedScan 4000ms
IF PID_G1.Control_ON THEN
    //Ustawienie wartosci PV
    PID_G1.PV := INT_TO_REAL(T_1)/100.0;

    //Wyliczenie parametrow
    //r0 = K*( 1+(Tp/(2*Ti))+Td/Tp );
    PID_G1.Rp0 := PID_G1.K_gain*(
        1.0
        +(PID_G1.sampling_time/(2.0*PID_G1.TI))
        +PID_G1.TD/PID_G1.sampling_time
    );
    //r1 = K*( (Tp/(2*Ti))-(2*Td/Tp)-1 );
    PID_G1.Rp1 := PID_G1.K_gain*(
        (PID_G1.sampling_time/(2.0*PID_G1.TI))
        -(2.0*PID_G1.TD/PID_G1.sampling_time)
        -1.0
    );
    //K*Td/Tp;
    PID_G1.Rp2 := PID_G1.K_gain*PID_G1.TD/PID_G1.sampling_time;

    //Wyliczenie uchybu regulacji i przesuniecie historii
    PID_G1.Ep2 := PID_G1.Ep1;
    PID_G1.Ep1 := PID_G1.Ep0;
    PID_G1.Ep0 := PID_G1.SV - PID_G1.PV;

    //Obliczenie sterowania
    //u = R2*E2 + R1*E1 + R0*E0 + u;
    PID_G1.MV := PID_G1.Rp2*PID_G1.Ep2
        +PID_G1.Rp1*PID_G1.Ep1
        +PID_G1.Rp0*PID_G1.Ep0
        +PID_G1.MV;

    //Ograniczenia sterowania
    IF (PID_G1.MV > 100.0) THEN
        PID_G1.MV := 100.0;
    END_IF;

    IF (PID_G1.MV < 0.0) THEN
        PID_G1.MV := 0.0;
    END_IF;

    G_1 := REAL_TO_INT(PID_G1.MV*10.0);
END_IF;

```

Listing 2.5. "Program regulatora PID toru G2-T3"

```

//Program: PID_R; Typ: FixedScan 4000ms
IF PID_G2.Control_ON THEN
    //Ustawienie wartosci PV
    PID_G2.PV := INT_TO_REAL(T_3)/100.0;

    //Wyliczenie parametrow
    //r0 = K*( 1+(Tp/(2*Ti))+Td/Tp );
    PID_G2.Rp0 := PID_G2.K_gain*(
        1.0
        +PID_G2.sampling_time/(2.0*PID_G2.TI))
        +PID_G2.TD/PID_G2.sampling_time
    );
    //r1 = K*( (Tp/(2*Ti))-(2*Td/Tp)-1 );
    PID_G2.Rp1 := PID_G2.K_gain*(
        (PID_G2.sampling_time/(2.0*PID_G2.TI))
        -(2.0*PID_G2.TD/PID_G2.sampling_time)
        -1.0
    );
    //K*Td/Tp;
    PID_G2.Rp2 := PID_G2.K_gain*PID_G2.TD/PID_G2.sampling_time;

    //Wyliczenie uchybu regulacji i przesuniecie historii
    PID_G2.Ep2 := PID_G2.Ep1;
    PID_G2.Ep1 := PID_G2.Ep0;
    PID_G2.Ep0 := PID_G2.SV - PID_G2.PV;

    //Obliczenie sterowania
    //u = R2*E2 + R1*E1 + R0*E0 + u;
    PID_G2.MV := PID_G2.Rp2*PID_G2.Ep2
        + PID_G2.Rp1*PID_G2.Ep1
        + PID_G2.Rp0*PID_G2.Ep0
        + PID_G2.MV;

    //ANTI WIND UP
    IF (PID_G2.MV > 100.0) THEN
        PID_G2.MV := 100.0;
    END_IF;

    IF (PID_G2.MV < 0.0) THEN
        PID_G2.MV := 0.0;
    END_IF;

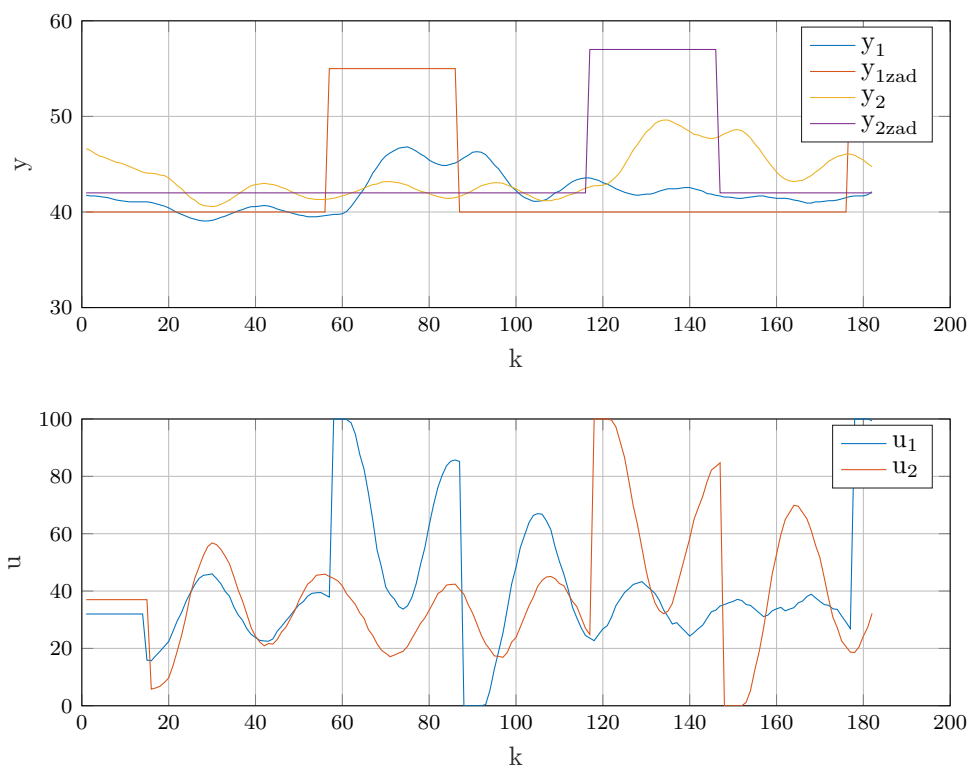
    G_2 := REAL_TO_INT(PID_G2.MV*10.0);
END_IF;

```

Dobranie nastaw regulatora

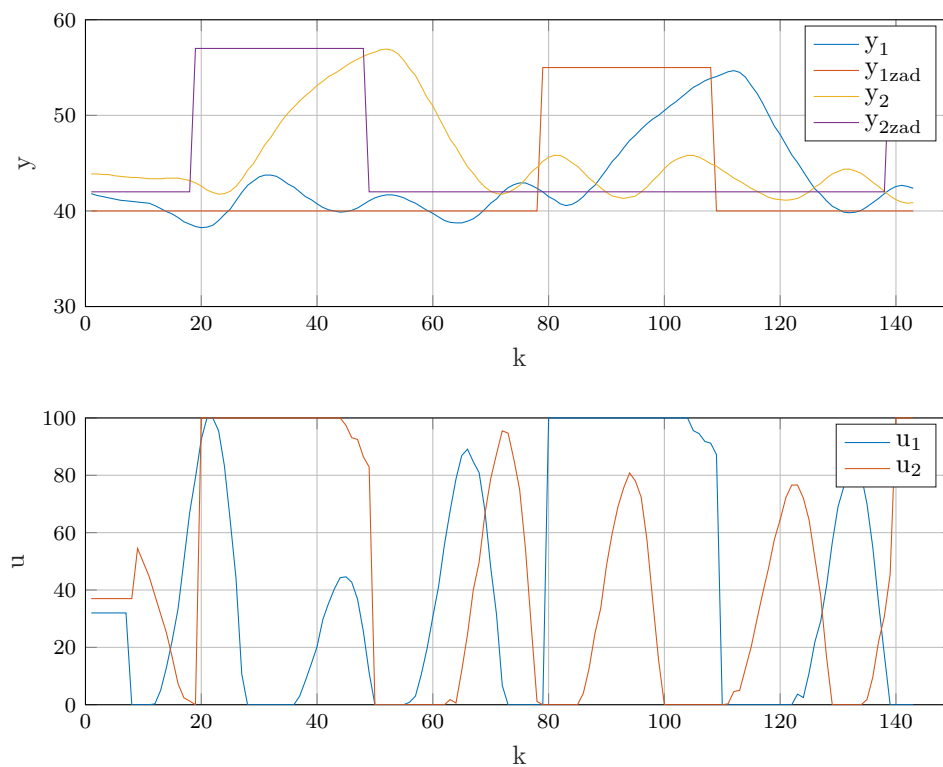
Metodą eksperymentalną etapami dobrano nastawy regulatorów PID. Przyjęto takie same nastawy dla obydwu regulatorów.

$$Kr = 15,0 \quad Ti = 250,0 \quad Td = 0,001$$



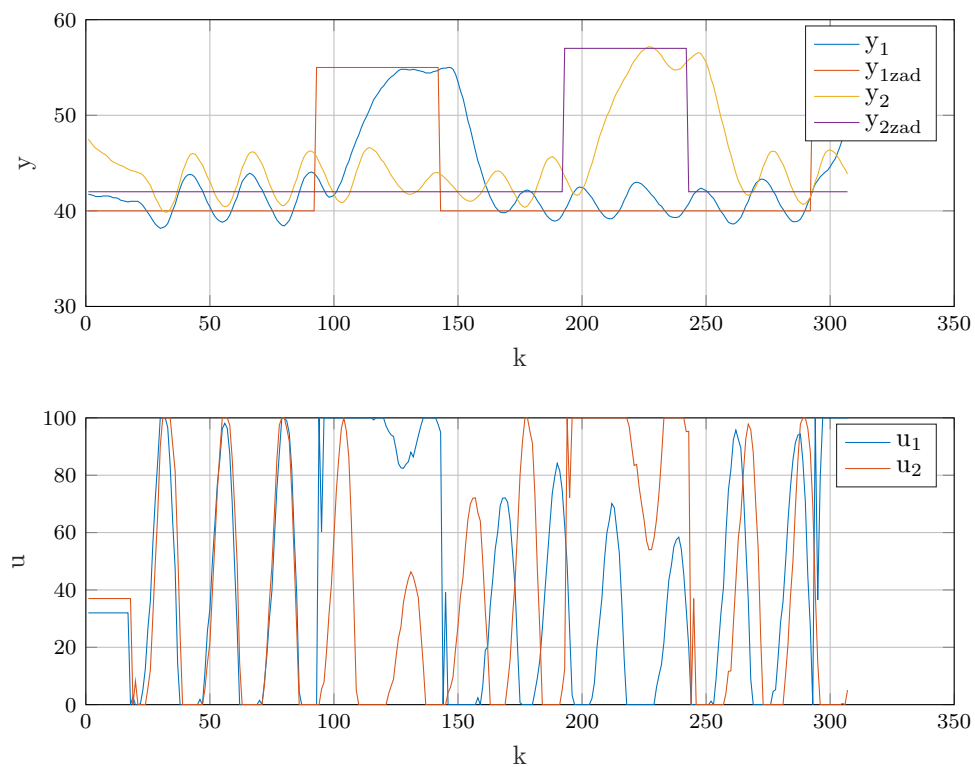
Rys. 2.2. Eksperyment z regulatorem P

$$Kr = 30,0 \quad Ti = 25,0 \quad Td = 0,001$$



Rys. 2.3. Eksperyment z regulatorem PI

$$Kr = 30,0 \quad Ti = 25,0 \quad Td = 1$$



Rys. 2.4. Eksperyment z regulatorem PID

2.1.4. Implementacja i dobór parametrów regulatora DMC 2x2

Na sterowniku zaimplementowano uwzględniając ograniczenia regulator DMC 2x2 w wersji oszczędnej obliczeniowo (analitycznej). Pozyskano odpowiedzi skokowe obiektu. Dobierając parametry regulatora uwzględniono: Liczbę wykorzystanych rejestrów pamięci, czas obliczeń pojedynczej iteracji algorytmu oraz jakość regulacji Implementacja Wykresy

Implementacja

Listing 2.6. "Skrypt generujący parametry regulatora DMC"

```
% Opis: Skrypt wyliczający parametry regulatora DMC
% przeznaczony do uruchomienia na PLC

% Założone parametry regulatora
lam = 1
load(' ../zad1/esy/s1.mat')
s = s1aprox;
D1 = length(s); % horyzont dynamiki
N1=D1;
Nu1=N1;
lambda1 = lam;
D = D1; % horyzont dynamiki
N=N1;
Nu=Nu1;
lambda = lambda1;
run('DMC_init.m');
Ke1 = sum(K(1,:));
Ku1 = K(1,:)*Mp;

load(' ../zad1/esy/s2.mat')
s = s2aprox;
D2 = length(s); % horyzont dynamiki
N2=D2;
Nu2=N2;
lambda2 = lam;
D = D2; % horyzont dynamiki
N=N2;
Nu=Nu2;
lambda = lambda2;
run('DMC_init.m');
Ke2 = sum(K(1,:));
Ku2 = K(1,:)*Mp;

% wyeksportowanie wyznaczonych parametrów do
% pliku nagłówkowego zgodnego ze standardem języka ST
run('exporter.m');
```

Listing 2.7. "Skrypt wyliczający parametry regulatora DMC"

```
% Opis: Skrypt wyliczający parametry regulatora DMC

% Wyznaczenie macierzy M
M = zeros(D,D);
for kNu=1:Nu
    M(kNu:N,kNu) = s(1:(N+1-kNu));
end

% Wyznaczenie macierzy Mp
Mp = ones(D,D-1)*s(end);
for kD=1:D-1
    Mp(1:(N-kD),kD) = s((kD+1):(N))';
end
Mp = Mp - ones(D,1)*s(1:end-1);

fi = eye(D);
LAMBDA = lambda*eye(D);
% Wyznaczenie macierzy K
K = inv((M')*M+LAMBDA)*(M');
```

Listing 2.8. "Skrypt eksportujący parametry regulatora DMC do pliku"

```
% Opis: Skrypt eksportujący wyliczone parametry regulatora DMC do postaci
% zgodnej ze standardem języka ST
```

```
% powstanie plik "DMC_data.h" w folderze Inc
fileID = fopen('DMC_data.st','w');

fprintf(fileID,'//Parametry regulatora DMC1\n');
fprintf(fileID,'DMC_G1.D_ := %d;\n', D1);
fprintf(fileID,'DMC_G1.N_ := %d;\n', N1);
fprintf(fileID,'DMC_G1.Nu := %d;\n', Nu1);
fprintf(fileID,'DMC_G1.lambda := %f;\n\n', lambda1);

fprintf(fileID,'//Parametry regulatora DMC2\n');
fprintf(fileID,'DMC_G2.D_ := %d;\n', D2);
fprintf(fileID,'DMC_G2.N_ := %d;\n', N2);
fprintf(fileID,'DMC_G2.Nu := %d;\n', Nu2);
fprintf(fileID,'DMC_G2.lambda := %f;\n\n', lambda2);

fprintf(fileID,'// Przeliczone wartosci do sterowania DMC1\n');
fprintf(fileID,'DMC_G1.Ke := %f;\n\n', Ke1);
fprintf(fileID,'// Przeliczone wartosci do sterowania DMC2\n');
fprintf(fileID,'DMC_G2.Ke := %f;\n\n', Ke2);

for n=1:length(Ku1)
    fprintf(fileID,'DMC_G1.Ku[%d] := %f;\n', n-1, Ku1(n));
end
fprintf(fileID,'\n');

for n=1:length(Ku2)
    fprintf(fileID,'DMC_G2.Ku[%d] := %f;\n', n-1, Ku2(n));
end
fprintf(fileID,'\n');

for n=1:length(Ku1)
    fprintf(fileID,'DMC_G1.delta_u_past[%d] := %f;\n', n-1, 0.0);
end
fprintf(fileID,'\n');

for n=1:length(Ku2)
    fprintf(fileID,'DMC_G2.delta_u_past[%d] := %f;\n', n-1, 0.0);
end
fprintf(fileID,'\n');

fclose(fileID);
```

Listing 2.9. "Wygenerowany program ST inicjujący regulatory DMC"

```
//W celu pokazania w sprawozdaniu kod został skrócony
//W miejscach obcięcia pozostawiono trzy kropki

//Parametry regulatora DMC1
DMC_G1.D_ := 75;
DMC_G1.N_ := 75;
DMC_G1.Nu := 75;
DMC_G1.lambda := 0.200000;
//Parametry regulatora DMC2
DMC_G2.D_ := 75;
DMC_G2.N_ := 75;
DMC_G2.Nu := 75;
DMC_G2.lambda := 0.200000;
// Przeliczone wartości do sterowania DMC1
DMC_G1.Ke := 1.650272;
// Przeliczone wartości do sterowania DMC2
DMC_G2.Ke := 1.686157;

DMC_G1.Ku[0] := 0.597954;
DMC_G1.Ku[1] := 0.749775;
DMC_G1.Ku[2] := 0.907605;
DMC_G1.Ku[3] := 1.026848;
...
DMC_G1.Ku[71] := 0.009323;
DMC_G1.Ku[72] := 0.005970;
DMC_G1.Ku[73] := 0.002869;

DMC_G2.Ku[0] := 0.555568;
DMC_G2.Ku[1] := 0.684826;
DMC_G2.Ku[2] := 0.816335;
DMC_G2.Ku[3] := 0.947948;
...
DMC_G2.Ku[71] := 0.013145;
DMC_G2.Ku[72] := 0.008487;
DMC_G2.Ku[73] := 0.004111;

DMC_G1.delta_u_past[0] := 0.000000;
DMC_G1.delta_u_past[1] := 0.000000;
DMC_G1.delta_u_past[2] := 0.000000;
...
DMC_G1.delta_u_past[71] := 0.000000;
DMC_G1.delta_u_past[72] := 0.000000;
DMC_G1.delta_u_past[73] := 0.000000;

DMC_G2.delta_u_past[0] := 0.000000;
DMC_G2.delta_u_past[1] := 0.000000;
DMC_G2.delta_u_past[2] := 0.000000;
...
DMC_G2.delta_u_past[71] := 0.000000;
DMC_G2.delta_u_past[72] := 0.000000;
DMC_G2.delta_u_past[73] := 0.000000;
```

Listing 2.10. "Program ST implementujący algorytm DMC toru G1-T1"

```

IF DMC_G1.Control_ON THEN
    //Ustawienie wartosci PV
    DMC_G1.PV := INT_TO_REAL(T_1)/100.0;

    // iloczyn wektorow wspolczynnikow Ku
    // i przeszlych zmian sterowania delta_u_past
    //  $u(k/k) = u(k-1) + K_e * e(k) - K_u * \text{delta}U_p(k)$ 
    DMC_G1.tmp := 0.0;
    FOR n_ := 0 TO DMC_G1.D_-1 BY 1 DO
        DMC_G1.tmp := DMC_G1.tmp
            + DMC_G1.Ku[n_]*DMC_G1.delta_u_past[n_];
    END_FOR;

    // wyznaczenie nowej zmiany sterowania
    DMC_G1.delta_u := DMC_G1.Ke*(DMC_G1.SV - DMC_G1.PV)
        - DMC_G1.tmp;
    // wyznaczenie nowej wartosci sterowania
    DMC_G1.tmp := DMC_G1.MV + DMC_G1.delta_u;
    // nałożenie ograniczeń na sterowanie
    IF(DMC_G1.tmp > 100.0) THEN
        DMC_G1.tmp := 100.0;
    END_IF;
    IF(DMC_G1.tmp < 0.0) THEN
        DMC_G1.tmp := 0.0;
    END_IF;

    // przekazanie do regulatora osiagnietej zmiany sterowania
    DMC_G1.delta_u := DMC_G1.tmp - DMC_G1.MV;
    DMC_G1.MV := DMC_G1.tmp;
    // przesuniecie wektora przeszlych zmian sterowania
    // o jeden krok w tyl i wstawienie biezacej
    // zmiany sterowania na poczatek
    FOR n_ := DMC_G1.D_-2 TO 0 BY -1 DO
        DMC_G1.delta_u_past[n_+1] := DMC_G1.delta_u_past[n_];
    END_FOR;
    DMC_G1.delta_u_past[0] := DMC_G1.delta_u;

    G_1 := REAL_TO_INT(DMC_G1.MV*10.0);
END_IF;

```

Listing 2.11. "Program ST implementujący algorytm DMC toru G2-T3"

```

IF DMC_G2.Control_ON THEN
    //Ustawienie wartosci PV
    DMC_G2.PV := INT_TO_REAL(T_2)/100.0;

    // iloczyn wektorow wspolczynnikow Ku
    // i przeszlych zmian sterowania delta_u_past
    //  $u(k/k) = u(k-1) + K_e * e(k) - K_u * \Delta u_p(k)$ 
    DMC_G2.tmp := 0.0;
    FOR n_ := 0 TO DMC_G2.D_-1 BY 1 DO
        DMC_G2.tmp := DMC_G2.tmp
            + DMC_G2.Ku[n_]*DMC_G2.delta_u_past[n_];
    END_FOR;

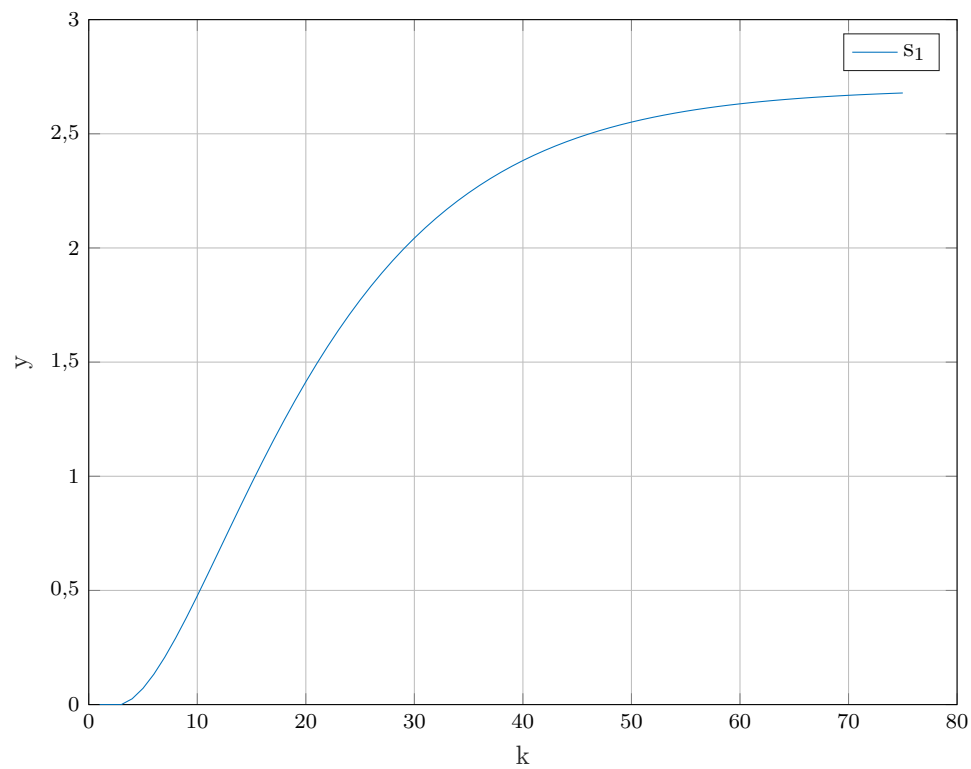
    // wyznaczenie nowej zmiany sterowania
    DMC_G2.delta_u := DMC_G2.Ke*(DMC_G2.SV - DMC_G2.PV)
        - DMC_G2.tmp;
    // wyznaczenie nowej wartosci sterowania
    DMC_G2.tmp := DMC_G2.MV + DMC_G2.delta_u;
    // nałożenie ograniczeń na sterowanie
    IF(DMC_G2.tmp > 100.0) THEN
        DMC_G2.tmp := 100.0;
    END_IF;
    IF(DMC_G2.tmp < 0.0) THEN
        DMC_G2.tmp := 0.0;
    END_IF;

    // przekazanie do regulatora osiagnietej zmiany sterowania
    DMC_G2.delta_u := DMC_G2.tmp - DMC_G2.MV;
    DMC_G2.MV := DMC_G2.tmp;
    // przesuniecie wektora przeszlych zmian sterowania
    // o jeden krok w tyl i wstawienie biezacej
    // zmiany sterowania na poczatek
    FOR n_ := DMC_G2.D_-2 TO 0 BY -1 DO
        DMC_G2.delta_u_past[n_+1] := DMC_G2.delta_u_past[n_];
    END_FOR;
    DMC_G2.delta_u_past[0] := DMC_G2.delta_u;

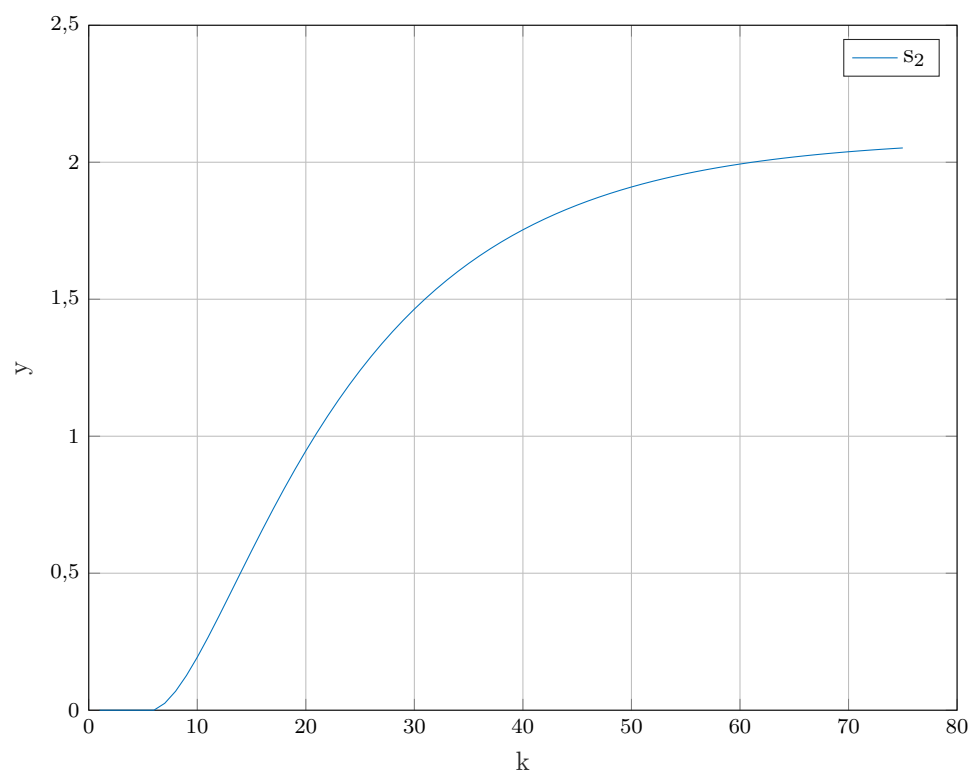
    G_2 := REAL_TO_INT(DMC_G2.MV*10.0);
END_IF;

```

Wyznaczenie wektorów s regulatorów DMC



Rys. 2.5. Wektor s regulatora DMC G1

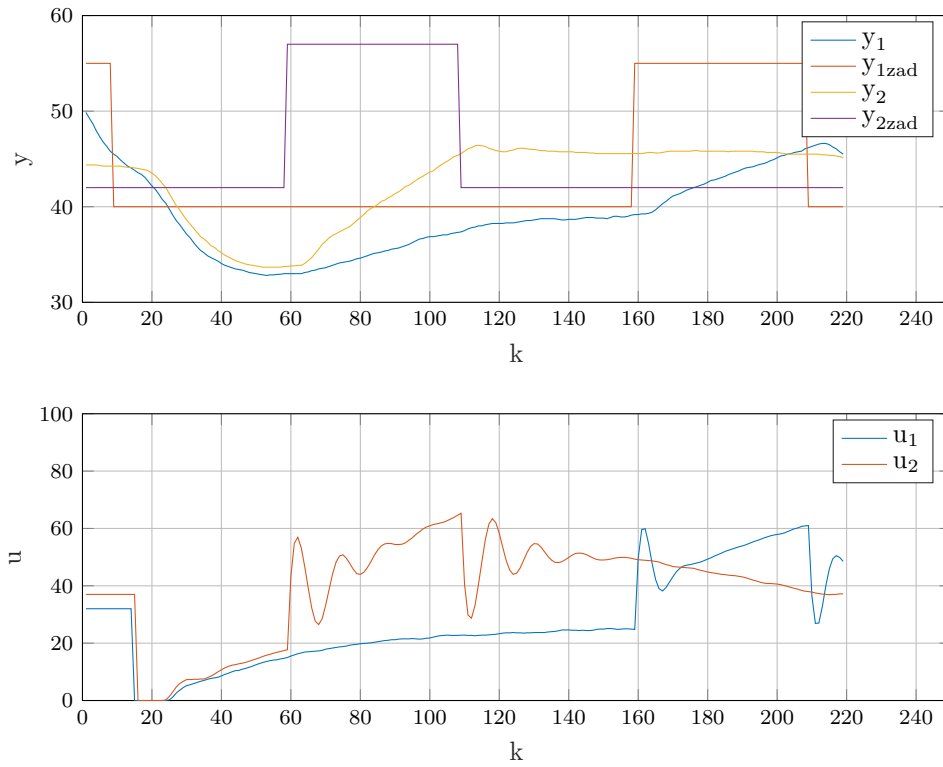


Rys. 2.6. Wektor s regulatora DMC G2

Dobór parametrów regulatora

Dobrano podstawowe nastawy regulatora DMC, regulator w obecnej postaci nie sprawdza się.

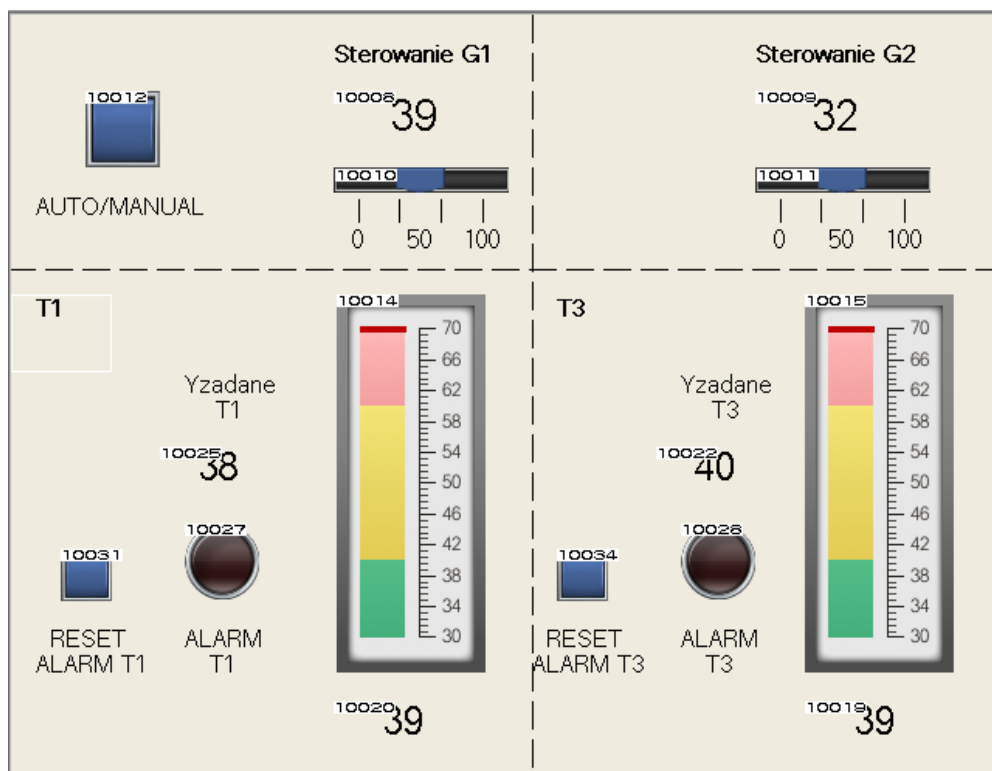
$$D = 75 \quad N = 75 \quad Nu = 75 \quad \lambda_1 = 0,2 \quad \lambda_2 = 0,2$$



Rys. 2.7. Eksperyment z regulatorem DMC

2.1.5. Panel operatora

Opracowany panel operatora



Rys. 2.8. Graficzny interfejs operatora stanowiska grzejąco-chłodzącego

Operator może wybrać jeden z dwóch trybów automatyczny lub manualny poprzez naciśnięcie przycisku [AUTO/MANUAL]. W trybach tych wizualizowane mu są oraz możliwa jest modyfikacja wartości:

- Tryb manualny:
 - * Wartości wyświetlane nieedytowalne,
 - * Aktualna wartość temperatury na czujniku T1,
 - * Aktualna wartość temperatury na czujniku T3,
 - * Wartości wyświetlane edytowalne,
 - * Sterowanie grzałką G1,
 - * Sterowanie grzałką G2,
 - * Wartość zadana temperatury T1,
 - * Wartość zadana temperatury T3.
- Tryb automatyczny:
 - * Wartości wyświetlane nieedytowalne,
 - * Aktualna wartość temperatury na czujniku T1,
 - * Aktualna wartość temperatury na czujniku T3,
 - * Sterowanie grzałką G1,
 - * Sterowanie grzałką G2,
 - * Wartości wyświetlane edytowalne,
 - * Wartość zadana temperatury T1,
 - * Wartość zadana temperatury T3.

Dodatkowo zaimplementowany w zadaniu 2 mechanizm, który przy przekroczeniu temperatury 150,0 stopni Celsjusza wyłącza grzałkę sąsiadującą z czujnikiem, który zmierzył niebezpieczną

temperaturę został wyposażony w diodę sygnalizującą o podanym stanie. Obok diody znajduje się przycisk, który resetuje alarm.

Założenia dotyczące wizualizacji:

HP HMI - high performance human-machine interface - kierując się tym trendem wizualizacja procesu jest bardzo prosta, przekazuje tylko niezbędne informacje, a użyta paleta barw jest stonowana.

Prawo Fittsa: Czas potrzebny do dojścia do celu jest funkcją wielkości celu i odległości do niego - dlatego też przycisk zmiany trybu pracy jest dość mały i znajduje się przy krawędzi ekranu użytkownika, aby nie pozwolić na nieprzemyślaną zmianę trybu sterowania.

Kluczowym parametrem dla użytkownika jest aktualna temperatura czujników T1 oraz T3, dlatego też został on przedstawiony nie tylko jako wyświetlana wartość, ale również jako wykres w kształcie walca. Rozwiązanie takie ma na celu ułatwienie odczytania tej wartości przez operatora nawet z dużych odległości.

2.1.6. Automat stanów

Implementacja

Listing 2.12. "Automat stanów modyfikujący zadane wartości temperatur T1 i T3"

```
TIM_MAIN(PT:= T#200s);

CASE  Stan_MAIN  OF
  0:
    IF NOT TIM_MAIN.Q THEN
      TIM_MAIN.IN := 1;
      Stan_MAIN := 1;
    END_IF;
  1:
    IF TIM_MAIN.Q THEN
      T_1_zad := 4000;
      T_3_zad := 4200;
      TIM_MAIN.IN := 0;
      Stan_MAIN := 2;
    END_IF;
  2:
    IF NOT TIM_MAIN.Q THEN
      TIM_MAIN.IN := 1;
      Stan_MAIN := 3;
    END_IF;
  3:
    IF TIM_MAIN.Q THEN
      T_1_zad := 5500;
      T_3_zad := 4200;
      TIM_MAIN.IN := 0;
      Stan_MAIN := 4;
    END_IF;
  4:
    IF NOT TIM_MAIN.Q THEN
      TIM_MAIN.IN := 1;
      Stan_MAIN := 5;
    END_IF;
  5:
    IF TIM_MAIN.Q THEN
      T_1_zad := 4000;
      T_3_zad := 4200;
      TIM_MAIN.IN := 0;
      Stan_MAIN := 6;
    END_IF;
  6:
    IF NOT TIM_MAIN.Q THEN
      TIM_MAIN.IN := 1;
      Stan_MAIN := 7;
    END_IF;
  7:
    IF TIM_MAIN.Q THEN
      T_1_zad := 4000;
      T_3_zad := 5700;
      TIM_MAIN.IN := 0;
      Stan_MAIN := 0;
    END_IF;
END_CASE;
```

Listing 2.13. "Przypisanie zadanych wartości temperatur do regulatorów"

```
// przypisanie wartosci zadanych
DMC_G1.SV := INT_TO_REAL(T_1_zad)/100.0;
DMC_G2.SV := INT_TO_REAL(T_3_zad)/100.0;
PID_G1.SV := INT_TO_REAL(T_1_zad)/100.0;
PID_G2.SV := INT_TO_REAL(T_3_zad)/100.0;

//G_1 := T_1_zad;
//G_2 := T_3_zad;
```

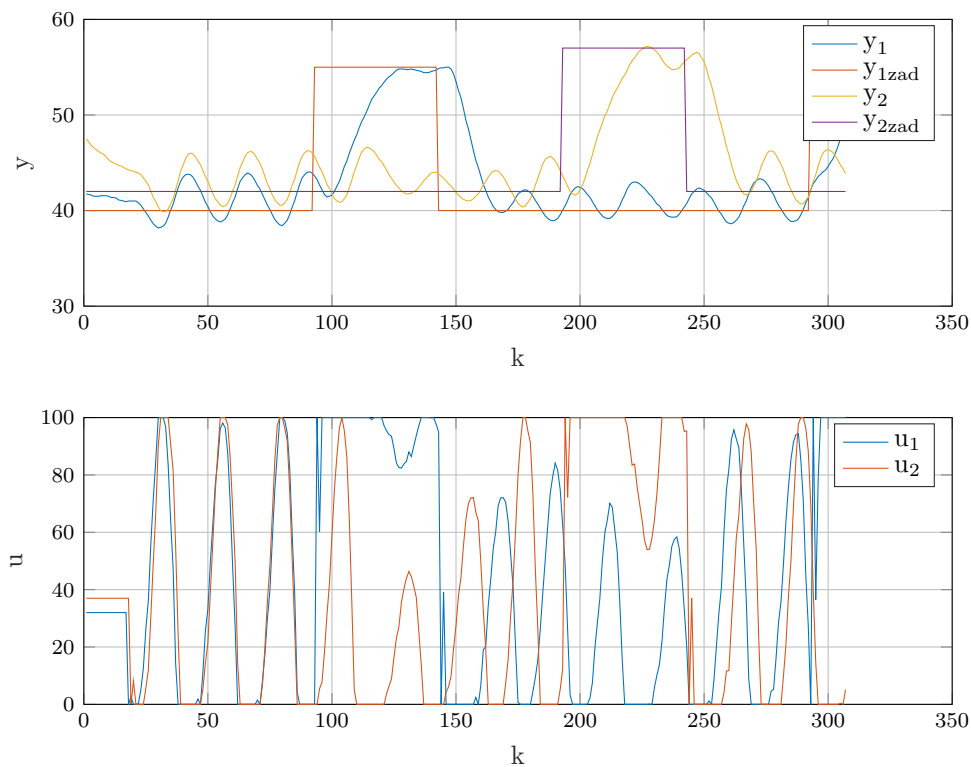
Opis automatu

Automat stanów zaprojektowano tak aby co 200 sekund zmieniał on jedną wartość zadaną temperatury.

Stany automatu 0, 1, 2 i 3 odpowiadają za skok wartości zadanej T1 o 15 stopni Celsjusza, a stany 4, 5, 6 i 7 odpowiadają za skok wartości zadanej T3 o 15 stopni Celsjusza.

Ostatni stan 7 odpowiada również za zapętlenie automatu poprzez powrót do stanu 0.

Przykładowy wykres poniżej pokazuje przebieg wartości zadanych temperatur T1 i T3.



Rys. 2.9. Eksperyment z regulatorem PID

2.2. Stanowisko INTECO - zbiorniki wodne

Stanowisko INTECO nie zostało opracowane przez zespół w trakcie laboratorium. Poniższe opisy i programy są propozycją realizacji poleceń opracowaną na podstawie wiedzy uzyskanej w trakcie opracowywania poprzednich laboratoriów.

2.2.1. Konfiguracja sterownika stanowiska Inteco

Skonfigurować sterownik w celu obsługi stanowiska Inteco. Opisać zastosowaną konfigurację. Brak opracowanej konfiguracji.

2.2.2. Zabezpieczenia stanowiska

System zabezpieczenia stanowiska w przypadku stanu alarmowego wyłączenie pompki doprowadzającej wodę do górnego zbiornika oraz całkowite zamknięcie wszystkich sterowalnych zaworów z wyjątkiem zaworu dolnego zbiornika. Zawór dolnego zbiornika zostaje otwarty całkowicie aby umożliwić szybki spływ wody do zbiornika głównego

Za stan alarmowy uznajemy przekroczenie założonego dopuszczalnego poziomu wody w którymkolwiek zbiorniku.

Podjęcie polegające na natychmiastowym zatrzymaniu obiegu wody przy zachowaniu zapasów pojemności zbiorników zabezpiecza układ przed przepełnieniem.

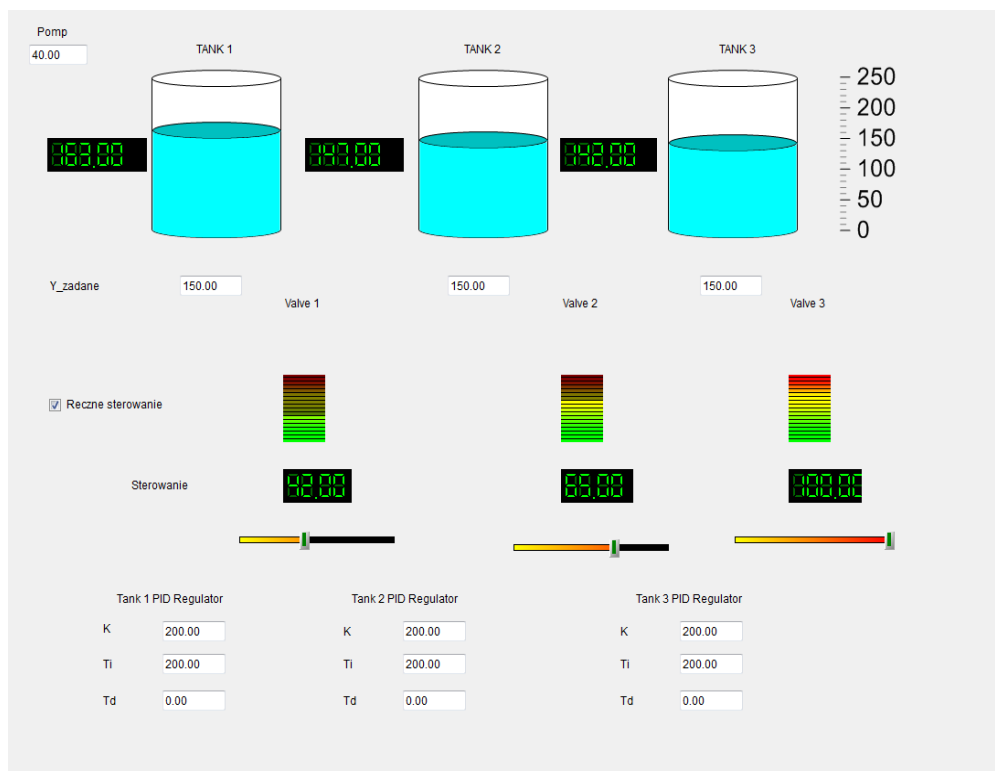
2.2.3. Charakterystyka statyczna

Zbiorniki wodne zgodnie z prawami fizyki nie są liniowe, jednak przy założonym punkcie pracy oraz odpowiednio małych skokach poziomu wody możliwa jest lokalna linearyzacja charakterystyki statycznej.

2.2.4. Dostosowanie i dobieranie parametrów regulatorów PID

2.2.5. Automat stanów

2.2.6. Wizualizacja procesu



Rys. 2.10. Graficzny interfejs operatora stanowiska Inteco

2.3. Porównanie regulatorów PID

Porównać działanie własnej implementacji regulatora PID z działaniem wbudowanej w sterownik funkcji PID. Sprawdzić wpływ ograniczeń na działanie obu wersji regulatora. Omówić parametry zastosowane w funkcji PID.