Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania (projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego nr 3, zadanie nr 10

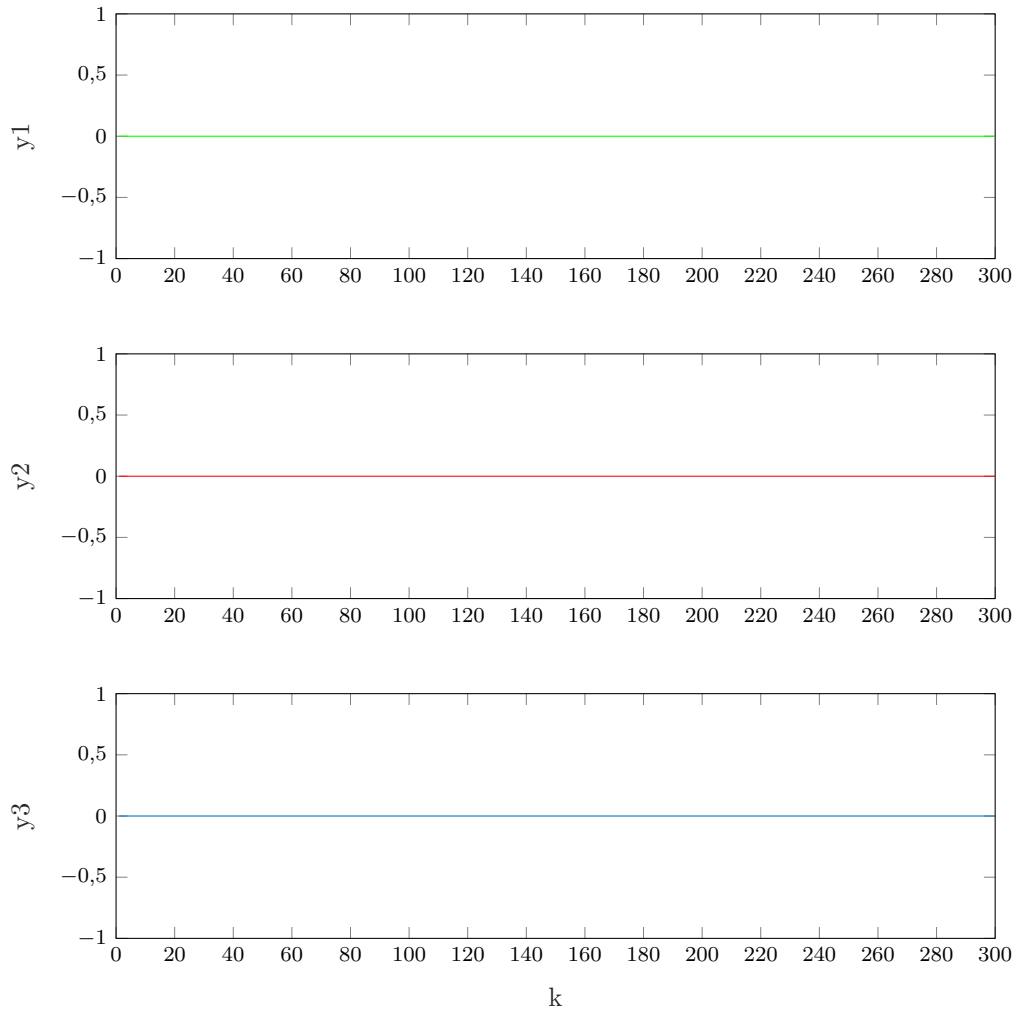
Stanislau Stankevich, Rafał Bednarz, Ostrysz Jakub

Warszawa, 2021

Spis treści

1. Sprawdzenie punktu pracy

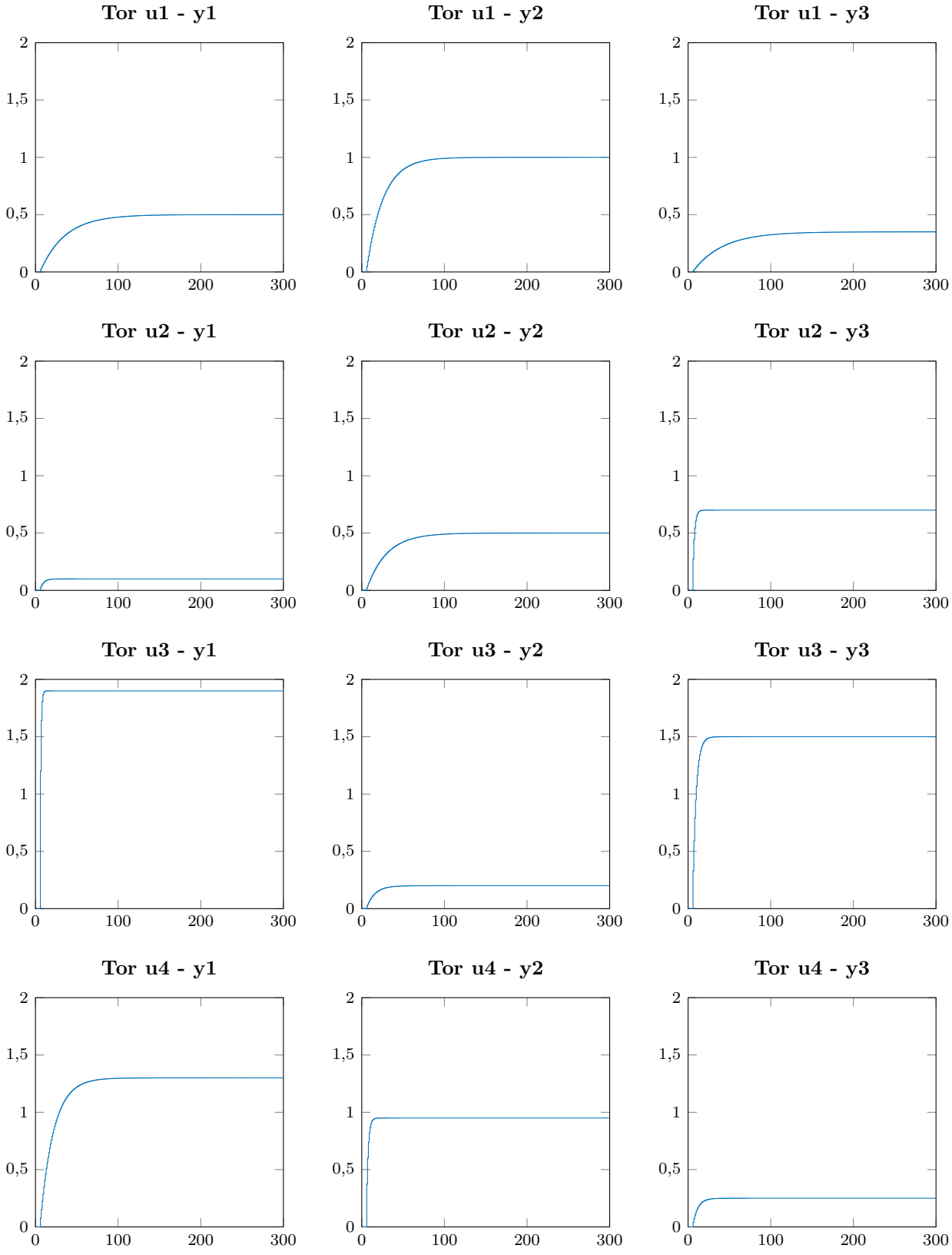
Podając za wejścia same zera, po 300 iteracjach dostajemy następujący przebieg wyjść:



Rys. 1.1. Przebieg wyjść obiektu przy stałych wejściach: $u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0$

Każde wyjście ustabilizowało się na wartości 0, więc podany w zadaniu punkt pracy jest zgodny z rzeczywistością.

2. Odpowiedzi skokowe poszczególnych torów

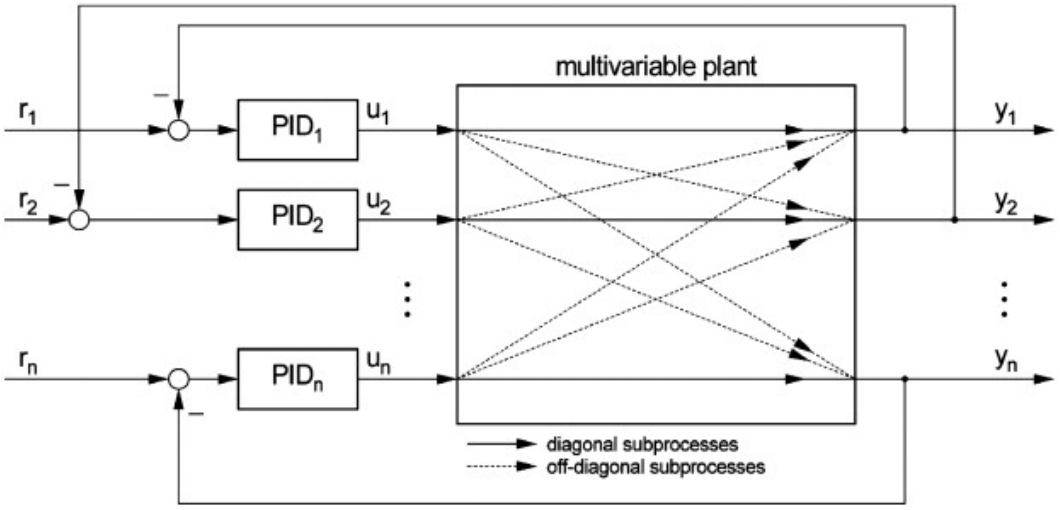


Rys. 2.1. Odpwiedzi poszczególnych torów dla skoku 0 - 1

3. Regulatory

3.1. PID

Ponieważ regulator PID to jest regulator o jednym wejściu i jednym wyjściu, w danym przypadku możemy użyć maksymalnie trzech regulatorów PID, jako że liczba wyjść procesu jest równa 3. Patrząc na odpowiedzi skokowe możemy ocenić które wejście ma największy wpływ na które wyjście i dla takich par $u - y$ nastroić regulatory PID. Na jedno wejście procesu w takim podejściu ustawiamy stałą.



3.2. DMC

Regulator DMC z natury jest wielowymiarowy. Prawo regulacji wielowymiarowego DMC w wersji klasycznej wygląda następująco:

$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k))$

Wektor przyrostów sterowania wynacza przyrosty na całym horyzoncie sterowania i ma długość $n_u N_U$.

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u_{n_u}(k|k) \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta u_1(k+N_u-1|k) \\ \vdots \\ \Delta u_{n_u}(k+N_u-1|k) \end{bmatrix}$$

Wektory $Y^{zad}(k)$ i $Y(k)$ są wektorami wyjść i wyjść zadanych o długości $n_y N$.

$$Y^{zad}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{zad}(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}^{zad}(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ y_1^{zad}(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}^{zad}(k) \end{bmatrix}$$

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}(k) \\ \vdots \\ \vdots \\ y_1(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}(k) \end{bmatrix}$$

K jest macierzą następującą:
$K = (M^T \Psi M + \Lambda)^{-1} M^T \Psi$
Y^0 jest wektorem wyjść modelu.
$Y^0(k) = Y(k) + M^p \Delta U^p(k)$
W którym $\Delta U^p(k)$ jest wektorem przeszłych przyrostów, natomiast M^p:

$$M^p = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & \cdots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & \cdots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & \cdots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix}$$

Przy czym każdy element s_i jest macierzą o rozmiarze n_y x n_u.

$$s_i = \begin{bmatrix} s_i^{1,1} & \cdots & s_i^{1,n_u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_i^{n_y,1} & \cdots & s_i^{n_y,n_u} \end{bmatrix}$$

Macierz M wygląda następująco:

$$M = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ s_2 & s_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \cdots & s_{N-N_u-1} \end{bmatrix}$$

4. Eksperymentalne wyznaczenie nastaw

4.1. PID

W przedstawionych poniżej eksperymentach została przyjęcta następująca konwencja nazewnictwa:

PID_1 - pid, kontrolujący wyjście numer 1.

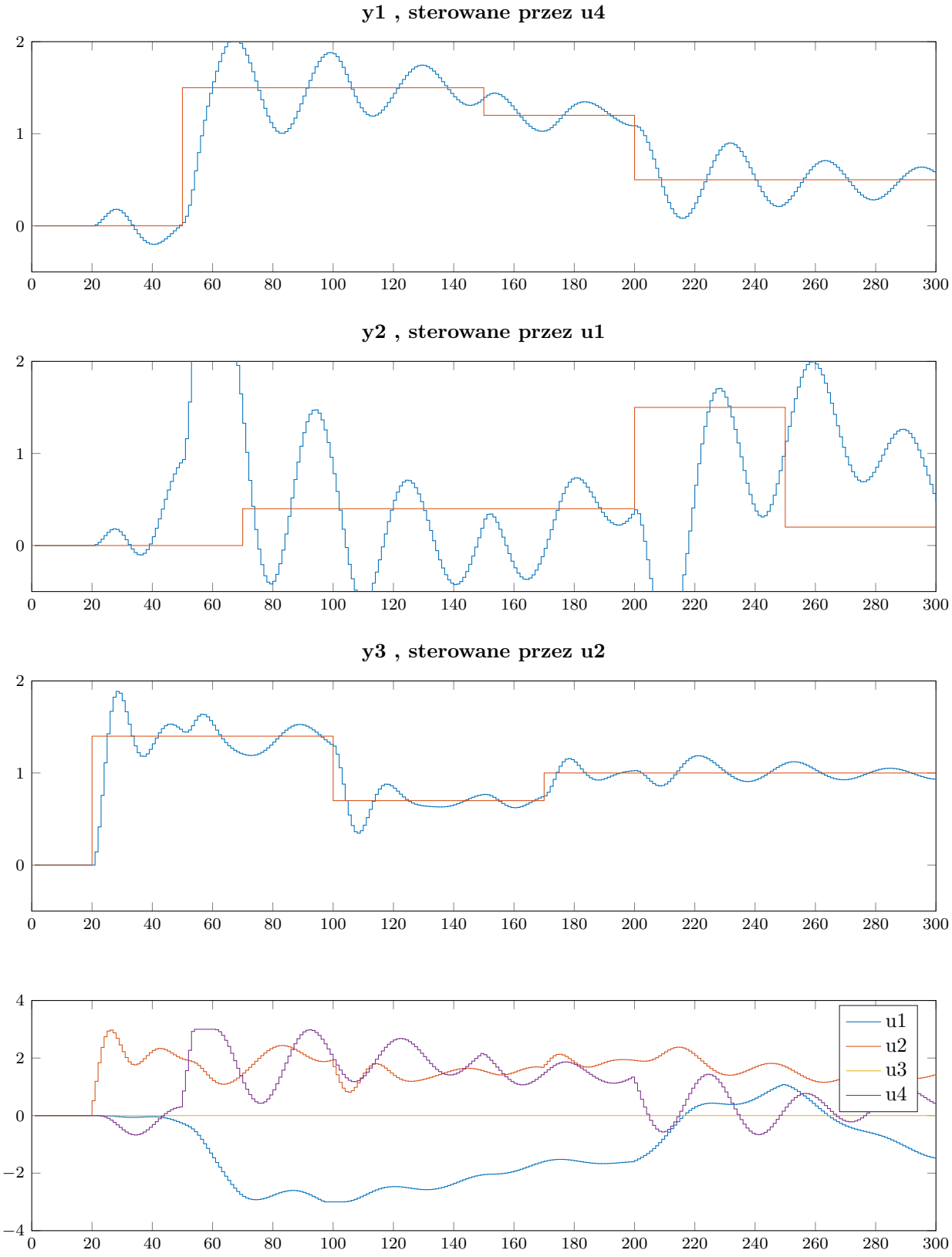
PID_2 - pid, kontrolujący wyjście numer 2.

PID_3 - pid, kontrolujący wyjście numer 3.

K^i, T_i^i, T_d^i - parametry pida i.

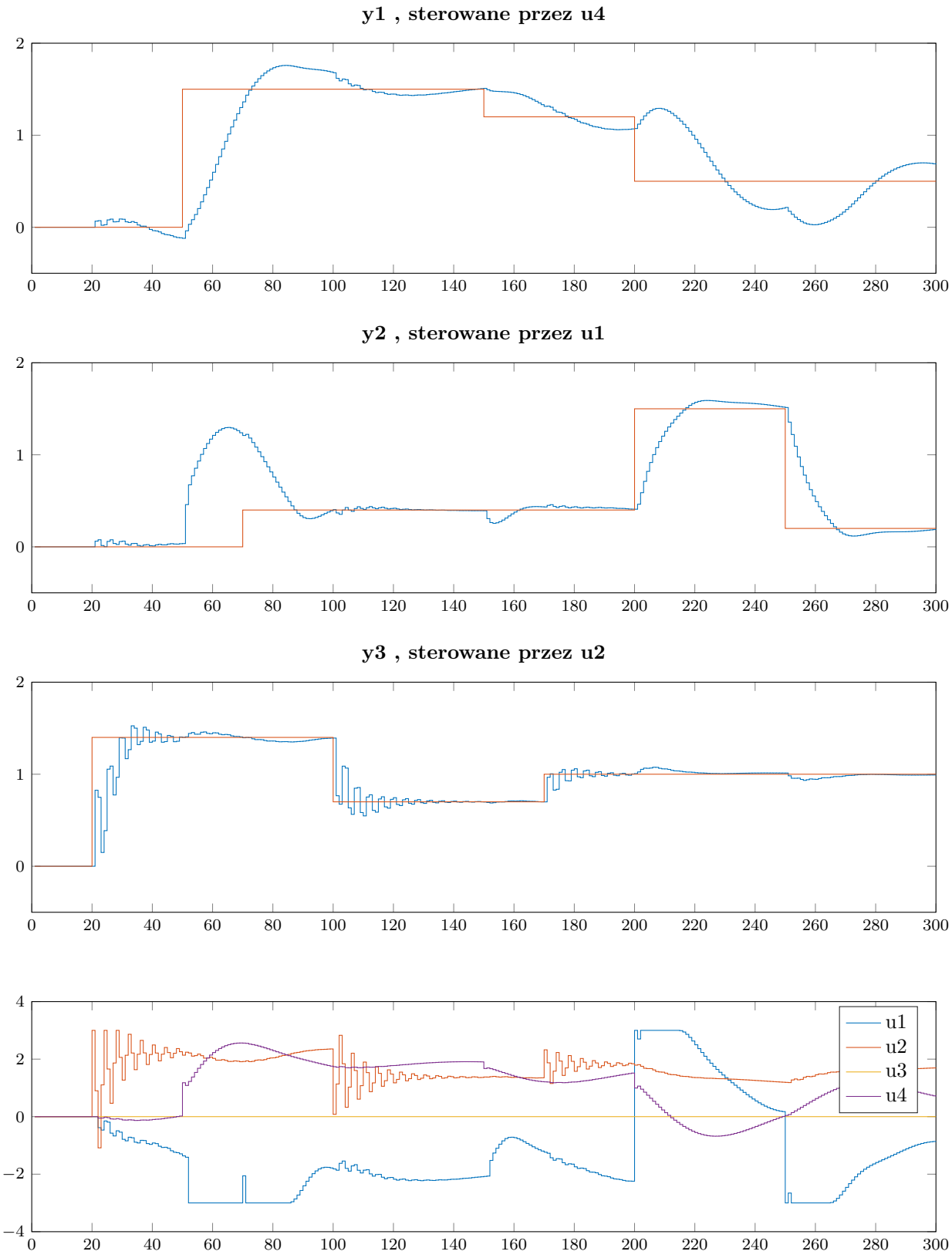
Patrząc na wykresy z poprzedniego zadania można zobaczyć że wejście 3 ma największy wpływ zarówno na wyjścia 1 i 3. Biorąc to pod uwage najpierw spróbowaliśmy ustawić stałą (zero) na to wejście i nie podłączać do niego regulatora, żeby nie regulować jednym wejściem dwóch wyjść jednocześnie.

4.1.1. $u_1 - y_2; u_2 - y_3; u_3 = const = 0; u_4 - y_1$



Rys. 4.1. $u_3 = 0; K_1 = 0,1; Ti_1 = 0,1; Td_1 = 0,1; K_2 = 0,01; Ti_2 = 0,1, Td_2 = 0,1; K_3 = 0,1; Ti_3 = 0,1; Td_3 = 0,1.$

$$E = 370,8381 \tag{4.1}$$

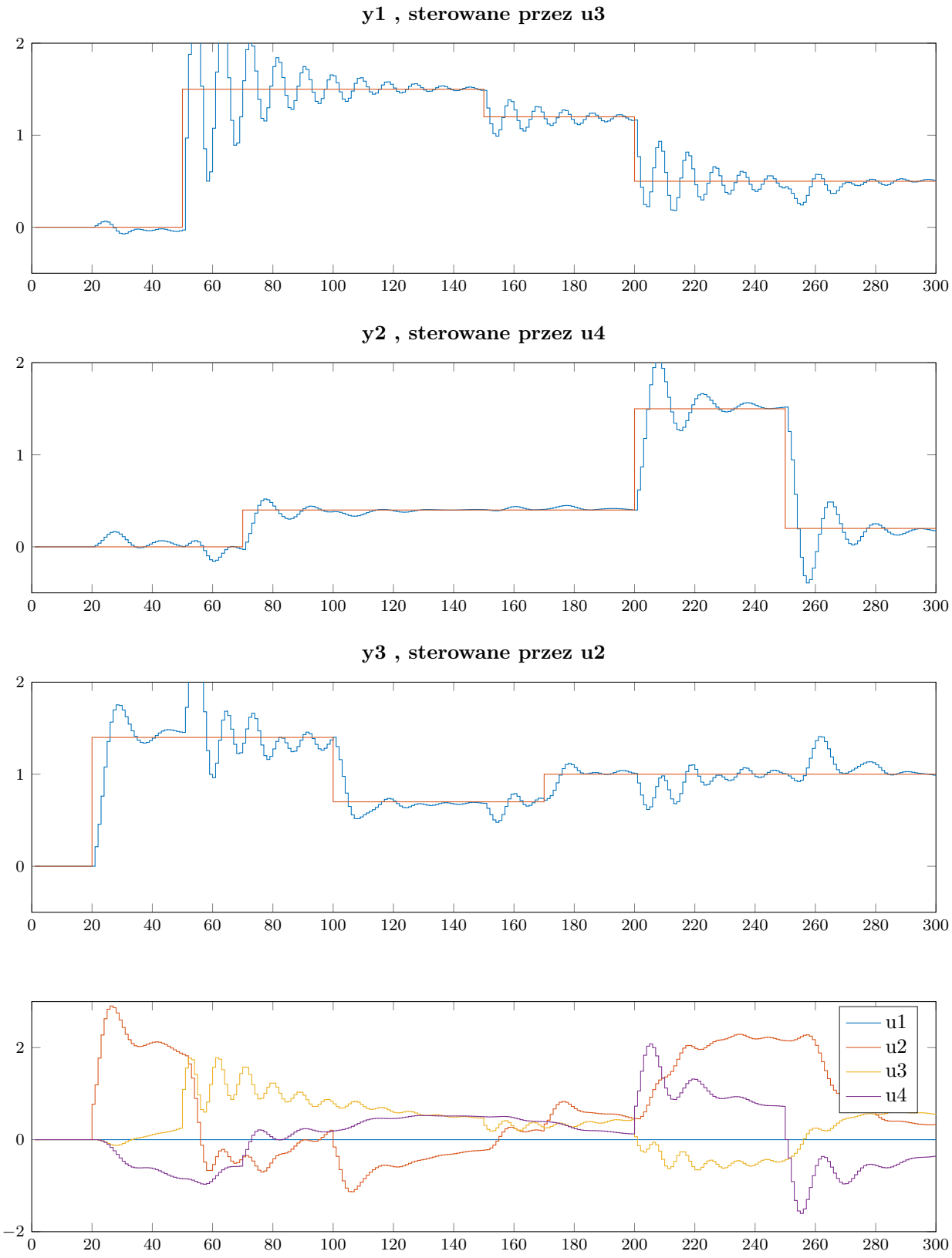


Rys. 4.2. $u_3 = 0,00; K_1 = 0,5; Ti_1 = 2; Td_1 = 0,2; K_2 = 4; Ti_2 = 1,5; Td_2 = 0,2; K_3 = 1; Ti_3 = 1; Td_3 = 1.$

$$E = 96,3728 \tag{4.2}$$

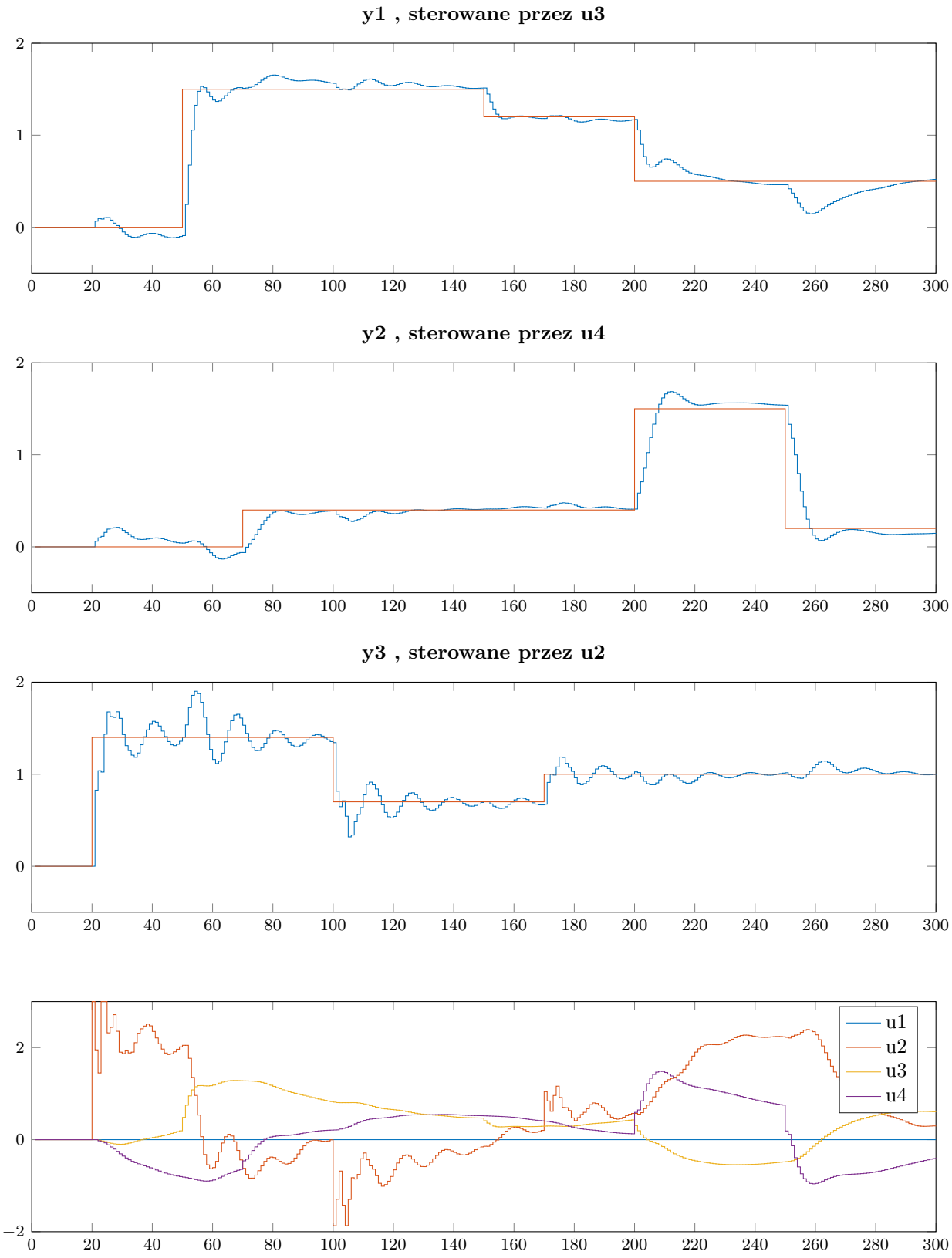
Jak można zauważyć, regulacja nie jest najładniejsza. Widać duży skok na drugim wyjściu spowodowany wzrostem wartości zadanej wyjścia pierwszego. W drugim podejściu spróbowaliśmy użyć do sterowania poszczególnymi wyjściami tych wejść, które rzeczywiście mają na nich największy wpływ. Wyjątkiem jest wyjście 3, które nie może być sterowane przez wejście 3, które ma jeszcze większy wpływ na wyjście pierwsze.

4.1.2. $u_1 = const = 0; u_2 - y_3; u_3 - y_1; u_4 - y_2$



Rys. 4.3. $u_1 = 0,00; K_1 = 0,1; Ti_1 = 0,1; Td_1 = 1; K_2 = 0,1; Ti_2 = 0,1; Td_2 = 1; K_3 = 0,1; Ti_3 = 0,1; Td_3 = 1.$

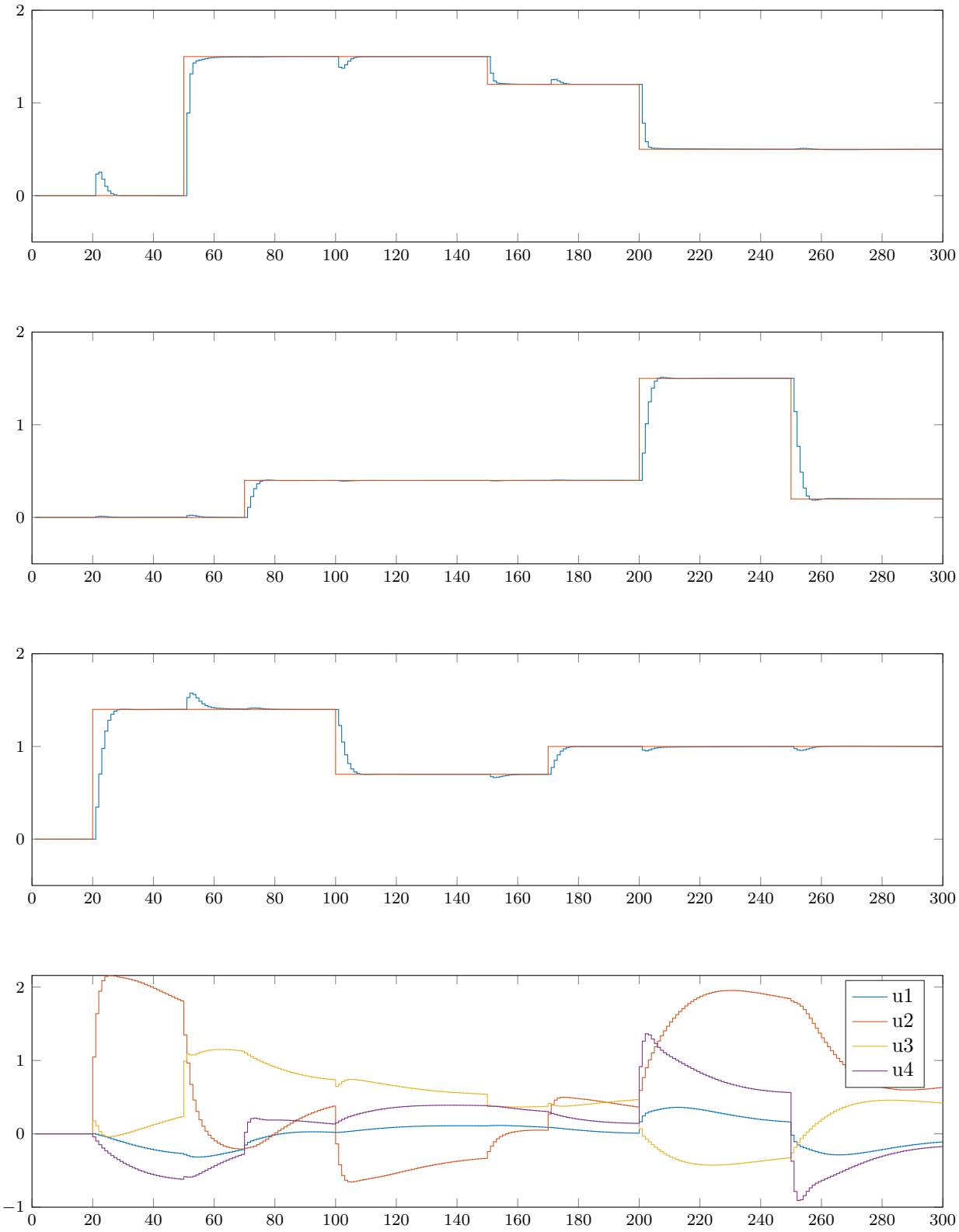
$$E = 48,2639 \tag{4.3}$$



Rys. 4.4. $u_1 = 0,00; K_1 = 0,1; Ti_1 = 0,3; Td_1 = 0; K_2 = 0,1; Ti_2 = 0,2; Td_2 = 1; K_3 = 0,1; Ti_3 = 0,04; Td_3 = 10.$

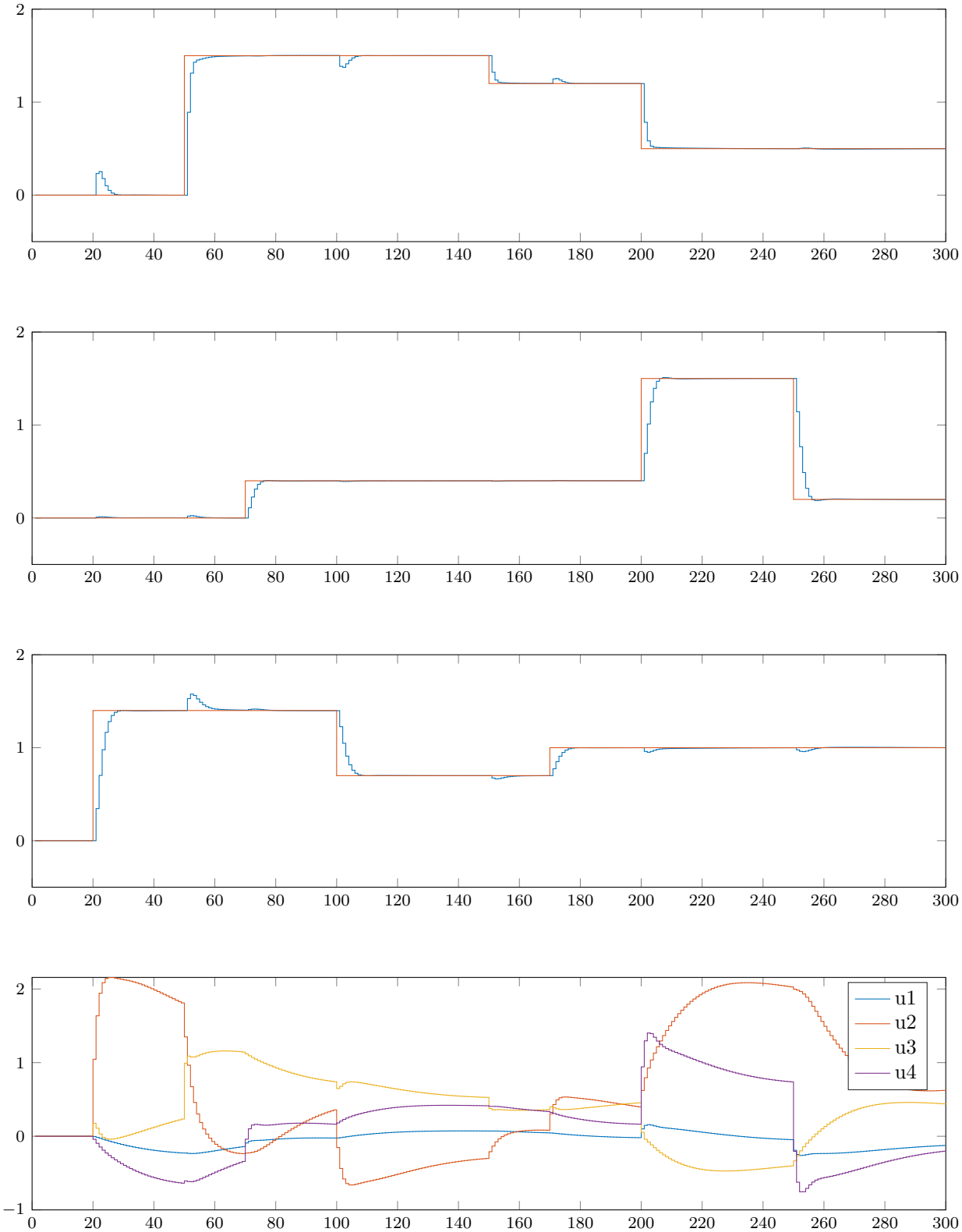
$$E = 34,9696 \tag{4.4}$$

4.2. DMC



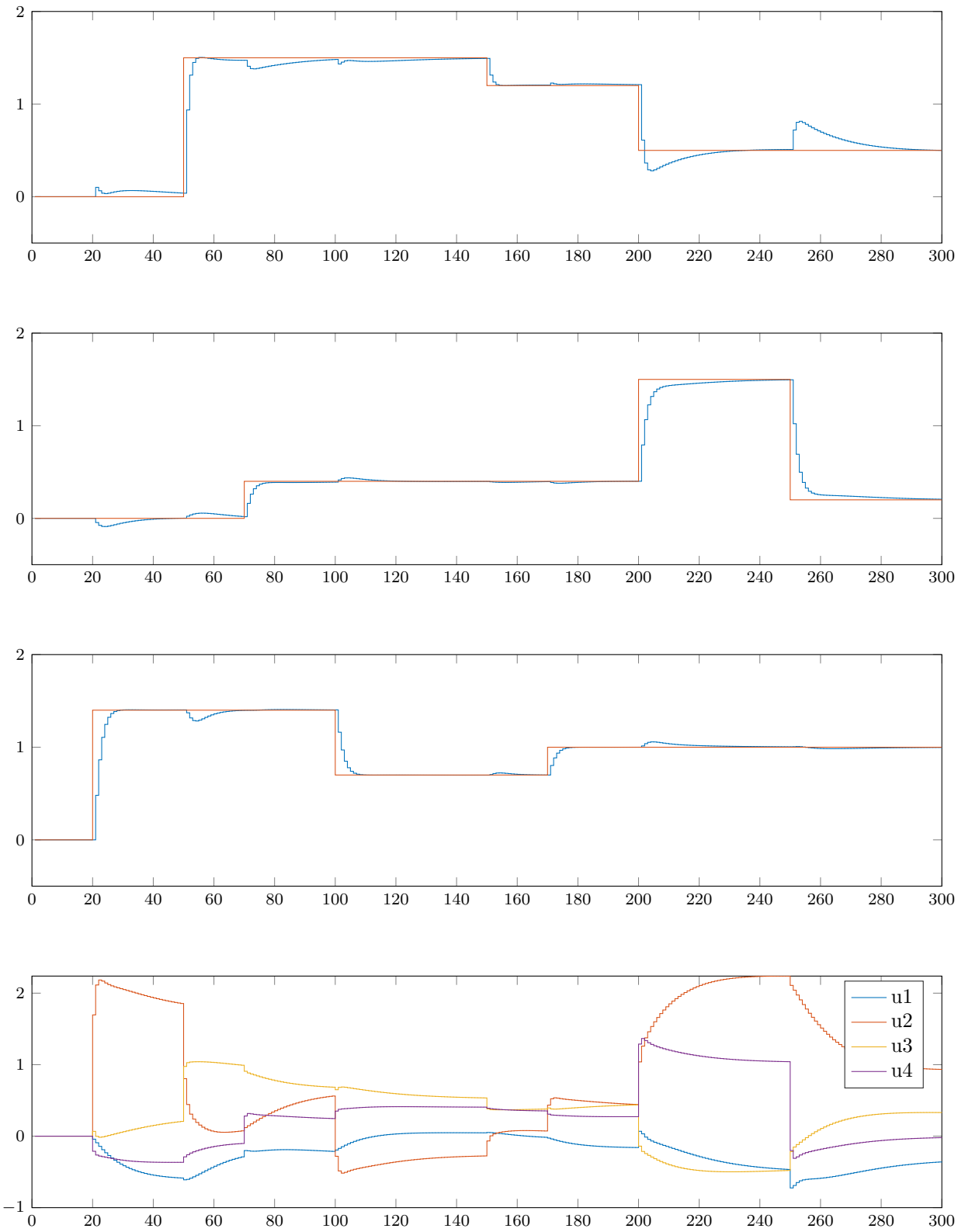
Rys. 4.5. $DMC. N = 150; Nu = 50; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

$$E = 14,071 \tag{4.5}$$



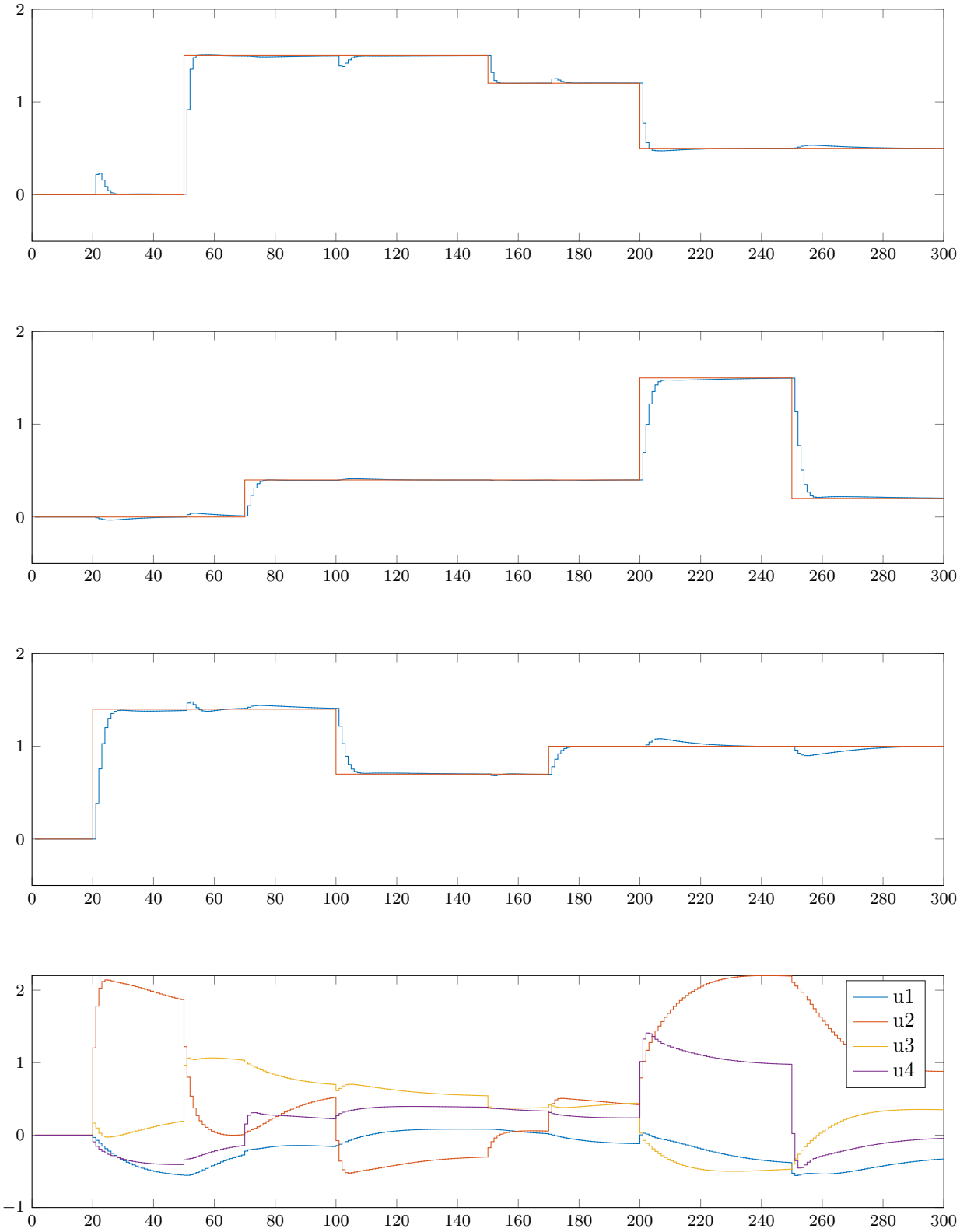
Rys. 4.6. $DMC.N = 10; Nu = 10; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

$$E = 14,0854 \tag{4.6}$$



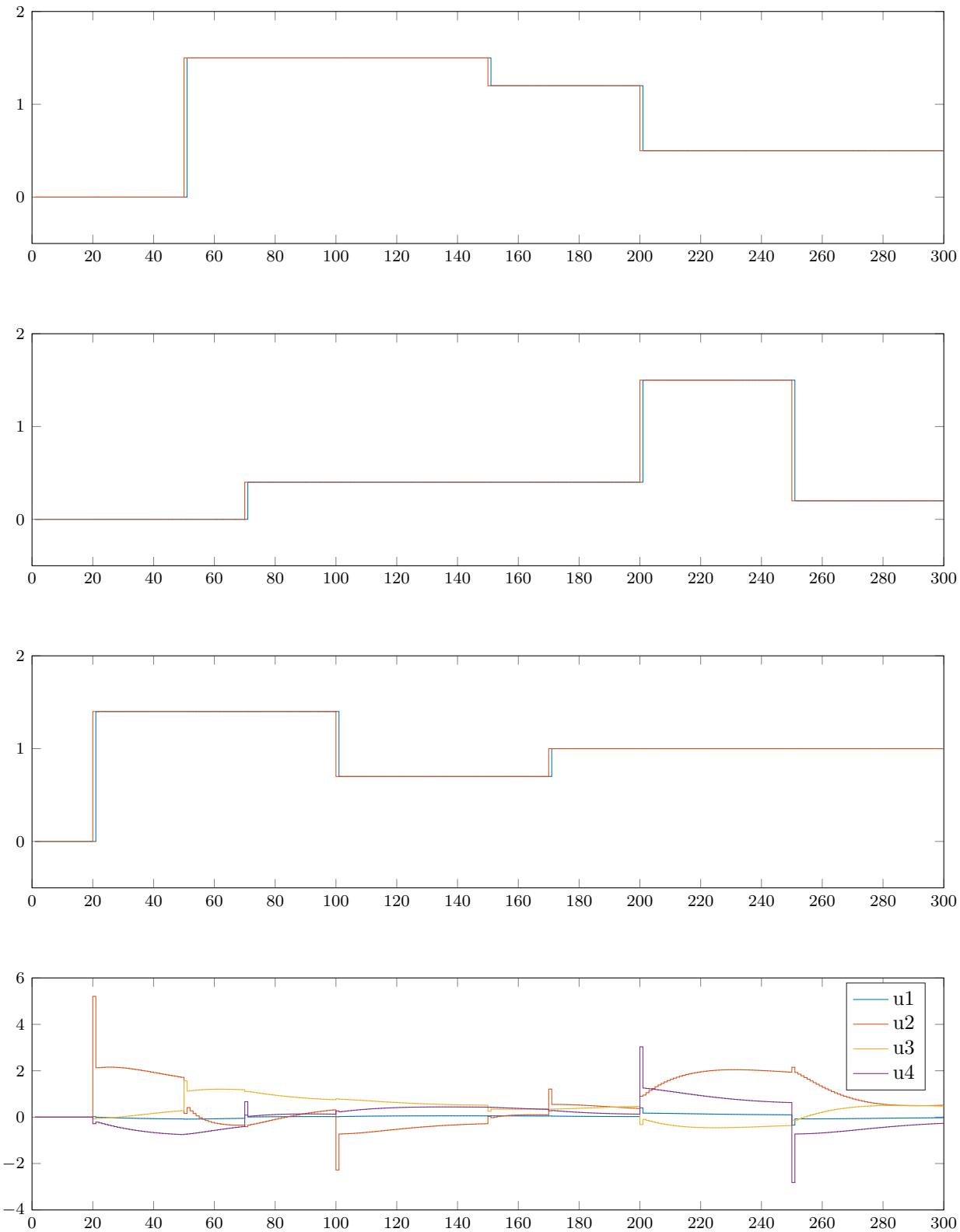
Rys. 4.7. $DMC.N = 10; Nu = 1; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

$$E = 14,1638 \tag{4.7}$$



Rys. 4.8. $DMC.N = 10; Nu = 2; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

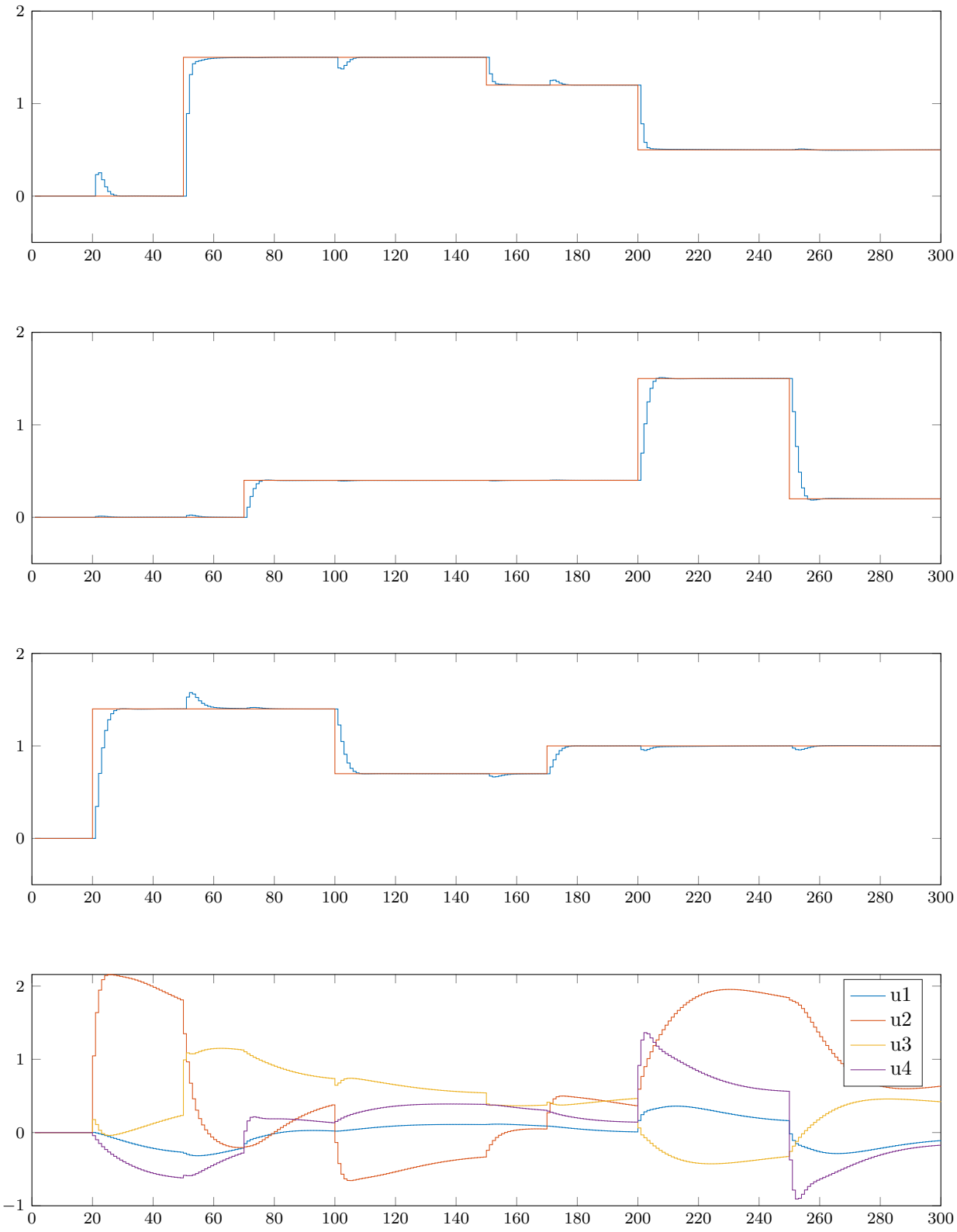
$$E = 13,9256 \tag{4.8}$$



Rys. 4.9. $DMC.N = 1; Nu = 1; \mu = [101010]; \lambda = [0, 0010, 0010, 0010, 001]$.

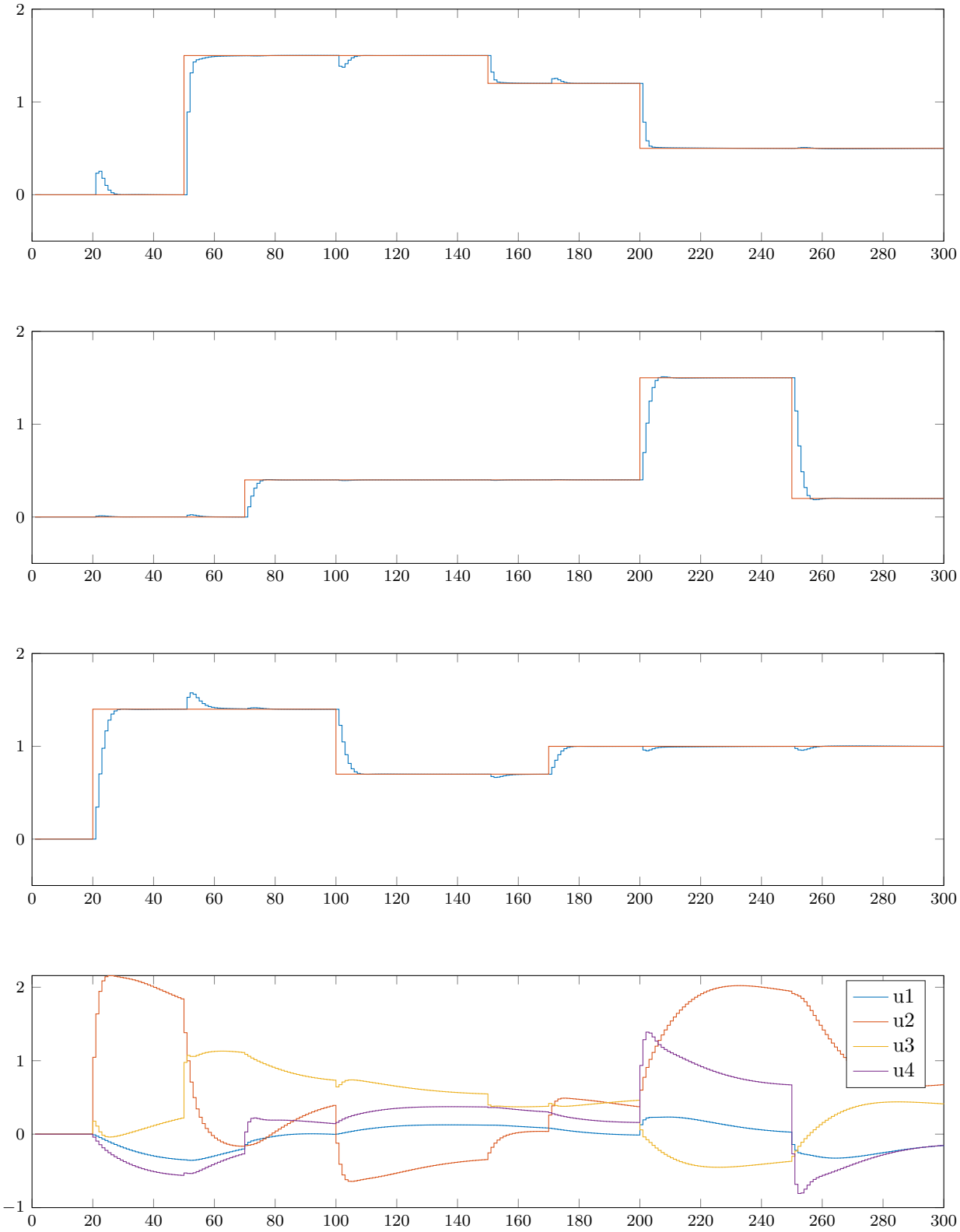
$$E = 8,43 \tag{4.9}$$

4.3. DMC oszczędny



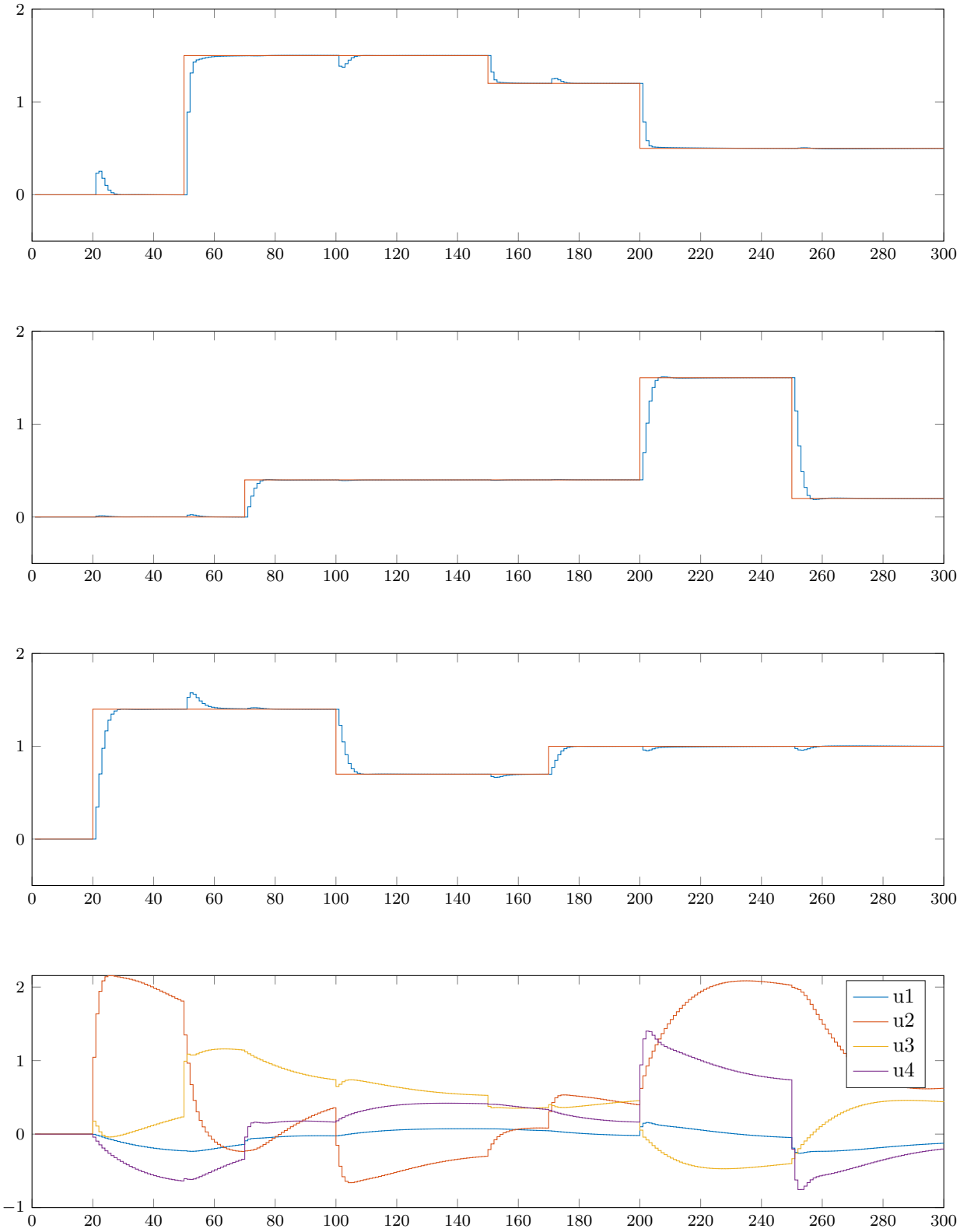
Rys. 4.10. $DMCoszczdny.N = 150; Nu = 50; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

$$E = 14,071 \tag{4.10}$$



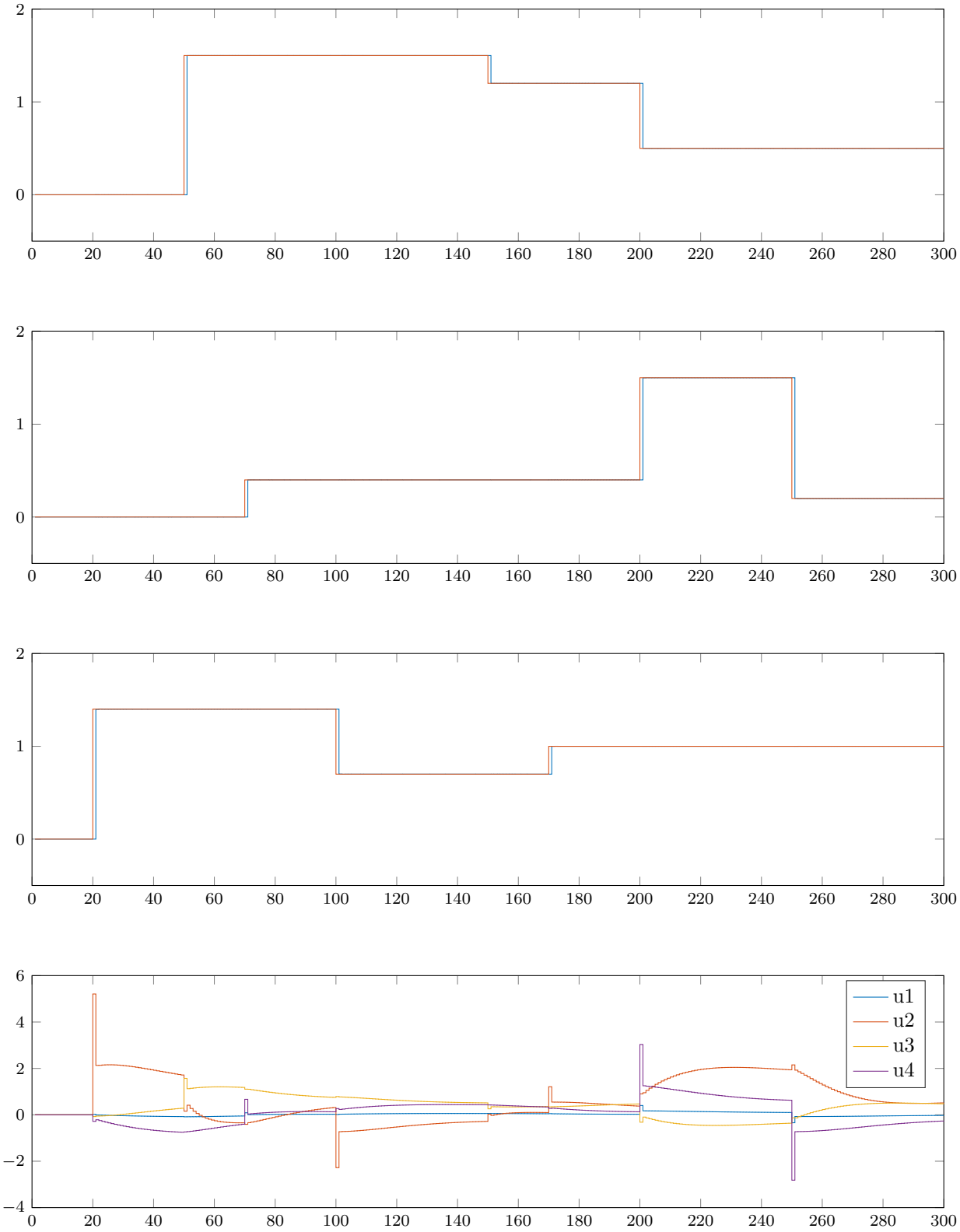
Rys. 4.11. $DMCoszczdny.N = 100; Nu = 50; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

$$E = 14,0725 \tag{4.11}$$



Rys. 4.12. $DMCoszczdny.N = 10; Nu = 10; \mu = [111]; \lambda = [1111]$.

$$E = 14,0854 \tag{4.12}$$



Rys. 4.13. $DMCoszczdny.N = 1; Nu = 1; \mu = [101010]; \lambda = [0,0010, 0010, 0010, 001]$.

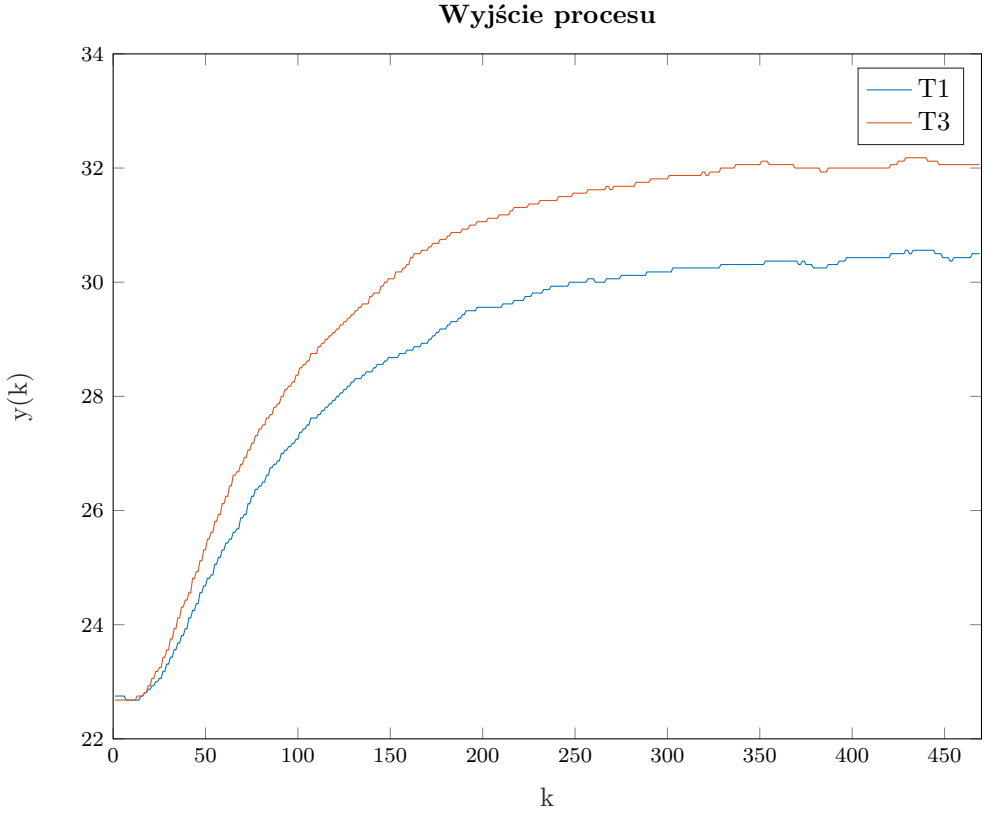
$$E = 8,43 \tag{4.13}$$

5. Laboratorium

5.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy

W celu określenia wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy, ustawiono moc wentylatorów $W1 = W2 = 50\%$ oraz moc grzałek $G1 = 25\%$ $G2 = 30\%$. Po pewnym czasie temperatury, odczytywane przez czujniki zaczeły się stabilizować na poziomie: $T1 = 29,81°C$ oraz $T3 = 31,43°C$.

Niestety z powodu ciągłego ruchu powietrza związanego z przemieszczaniem się osób w sali i dużej ilości tych osób wpływających na temperaturę sali oraz czułość stanowiska pomiarowego temperatury odczytywane przez czujnik zaczeły lekko oscylować wokół temperatur w punkcie pracy.



Rys. 5.1. Pomiar temperatury w punkcie pracy

5.2. Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska

Zadaniem tego mechanizmu jest wyłączanie grzałki w moncie, gdy czujnik przy tej grzałce przekroczy temperaturę $250°C$. W mechanizmie w tym uwzględniono również ograniczenia sygnału sterującego tzn. moc grzałki może przyjmować wartości z zakresu 0-100% (w programie odpowiada to wartościom 0-1000). W programie wartości temperatur odpowiadają 100-krotnie większej wartości niż w rzeczywistości, dlatego też temperarura $250°C$ zapisana jest jako 25000.

Implementacja przedstawia się w następujący sposób:

Listing 5.1. Mechanizm zabezpieczający

```
//mechanizm zabezpieczajacy
IF D100 >= 25000 THEN // T1>250
        D114 := 0; //G1=0%
END_IF;

IF D102 >= 25000 THEN // T3>250
        D115 := 0; //G2=0%
END_IF;

// zabezpieczenie sygnalu sterujacego
IF(D114>=1000) THEN //G1>100%
        D114 := 1000; //G1=100%
        ELSIF(D114<=0) THEN //G1<0%
        D114:=0; //G1=0%
END_IF;


IF(D115>=1000) THEN //G2>100%
        D115 := 1000; //G2=100%
        ELSIF(D115<=0) THEN //G2<0%
        D115:=0; //G2=0%
END_IF;
```

5.3. Regulator PID

W zadaniu tym użyto dwóch regulatorów PID (jeden ustala wartość sterowania grzałką G1, biorąc pod uwagę sygnał wyjściowy T1, natomiast drugi wyznacza G2, a bierze pod uwagę wartość T3). Dla każdego z regulatorów wartość sterowania jest liczona z wzoru:

$$u(k) = r_2 e(k-2) + r_1 e(k-1) + r_0 e(k) + u(k-1) \tag{5.1}$$

Współczynniki regulacji r_i są wyliczane ze standardowych wzorów.

Listing 5.2. Wyznaczenie współczynników regulacji

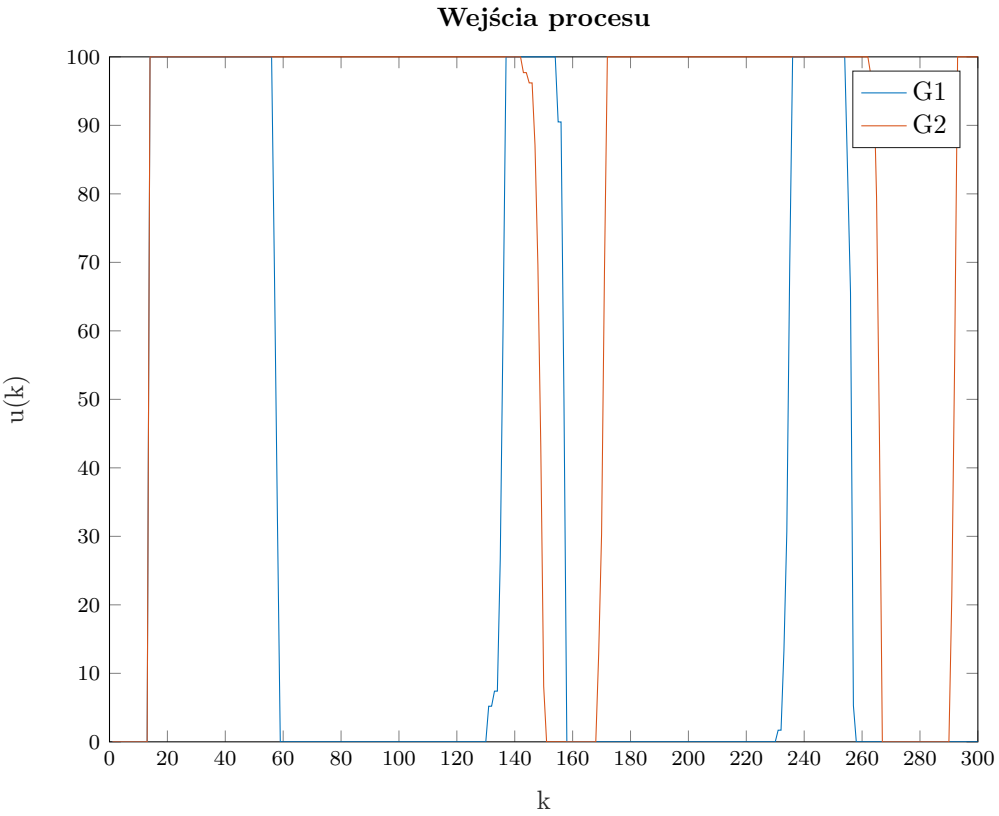
```
//Wspolczynniki K, Ti i Td dla regulatorow
K_1 := 6.0;
K_2 := 6.0;

TI_1 := 100.0;
TI_2 := 110.0;

TD_1 := 0.0;
TD_2 := 0.0;

TProb := 4.0; //czas probkowania

//Wartosci uchybow w potrzednich chwilach probkowania
E0_1 := 0;
E1_1 := 0;
E2_1 := 0;
E0_2 := 0;
E1_2 := 0;
E2_2 := 0;
```

```
//wyliczenie wspolczynnikow ri dla PID1
R0_1 := K_1 * (1 + (TProb/(2*TI_1))+TD_1/TProb);
R1_1 := K_1 * (TProb/(2*TI_1) - 2*TD_1/TProb - 1);
R2_1 := K_1 * TD_1 / TProb;

//wyliczenie wspolczynnikow ri dla PID2
R0_2 := K_2 * (1 + (TProb/(2*TI_2))+TD_2/TProb);
R1_2 := K_2 * (TProb/(2*TI_2) - 2*TD_2/TProb - 1);
R2_2 := K_2 * TD_2 / TProb;
```

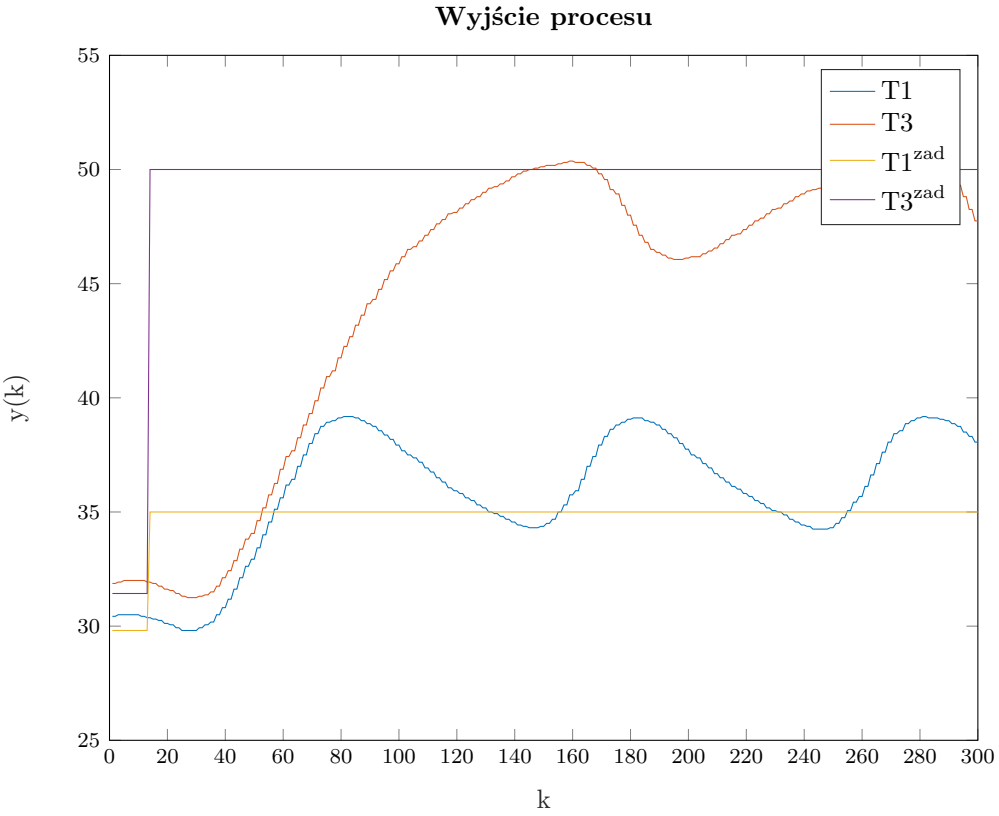
Listing 5.3. Implementacja algorytmu PID

```
T1_act := D100; //pobrane aktualnej wartosci T1
T3_act := D102; //pobrane aktualnej wartosci T3


// PID 1
E2_1 := E1_1; //przesuniecia wartosci uchybow w chwili k-2, k-1
E1_1 := E0_1;
E0_1 := y_zad1 - T1_act; //wyliczenie aktualnego uchybu

//wyliczenie nowego sterowania zgodnie ze wzorem
U_1 := R2_1*E2_1 + R1_1*E1_1 + R0_1*E0_1 + U_1;
D114 := REAL_TO_INT(U_1); //zadanie nowej wartosci sterowania

// PID 2
E2_2 := E1_2;
E1_2 := E0_2;
E0_2 := y_zad2 - T3_act;

//wyliczenie nowego sterowania zgodnie ze wzorem
U_2 := R2_2*E2_2 + R1_2*E1_2 + R0_2*E0_2 + U_2;
D115 := REAL_TO_INT(U_2); //zadanie nowej wartosci sterowania
```

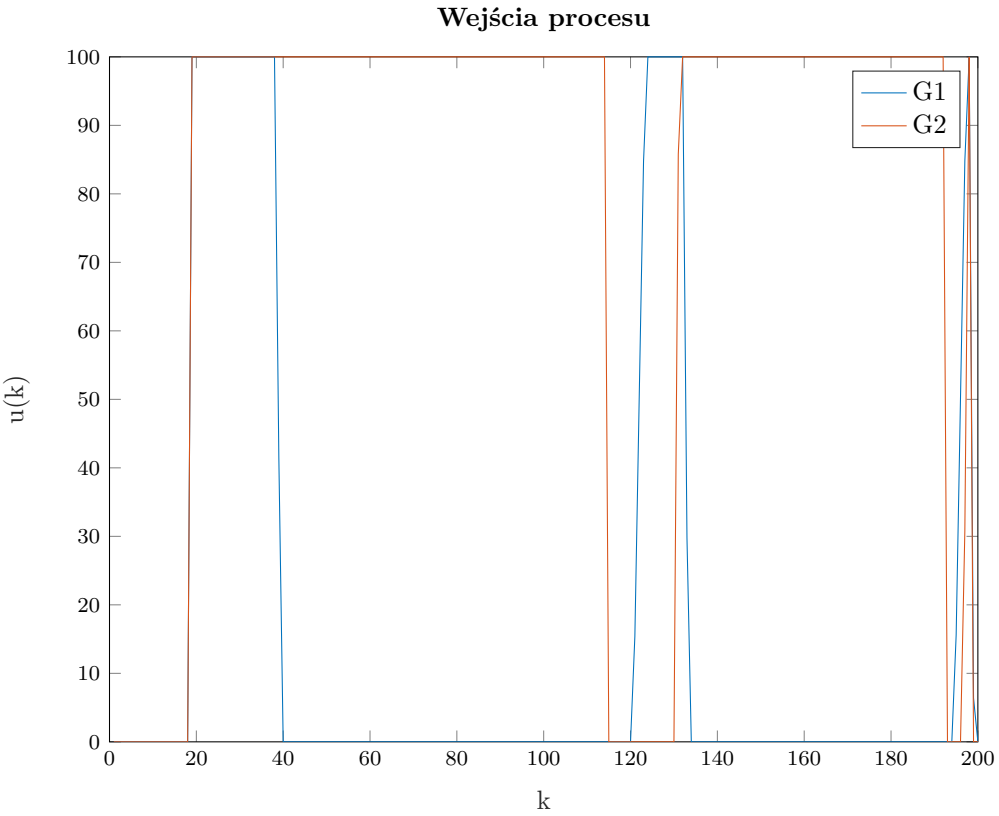
Po każdym wyliczeniu nowej wartości sterowania, wykonywany jest mechanizm zabezpieczający z podpunktu drugiego.



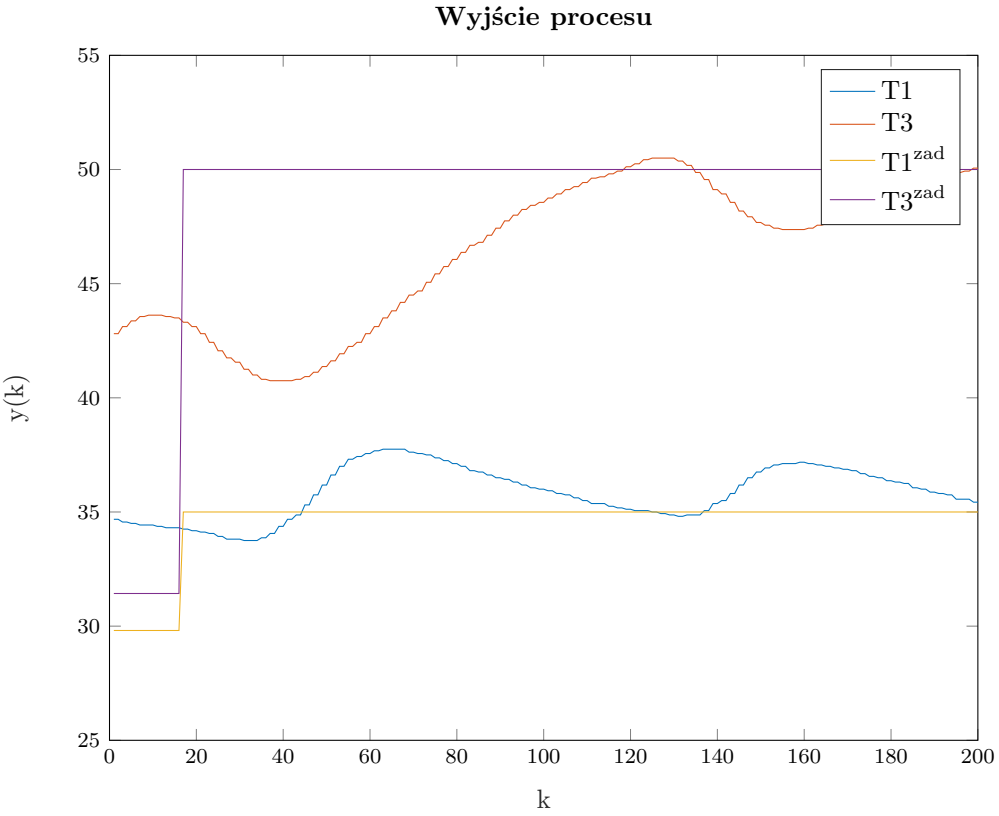
Rys. 5.2. Sygnały stejące: PID1: K=3 T_i=100 T_d=1.3 PID2: K=2 T_i=90 T_d=1



Rys. 5.3. Wyjścia obiektu: PID1: K=3 T_i=100 T_d=1.3 PID2: K=2 T_i=90 T_d=1



Rys. 5.4. Sygnały stejące: PID1: K=1 T_i=10 T_d=3 PID2: K=3 T_i=9 T_d=2



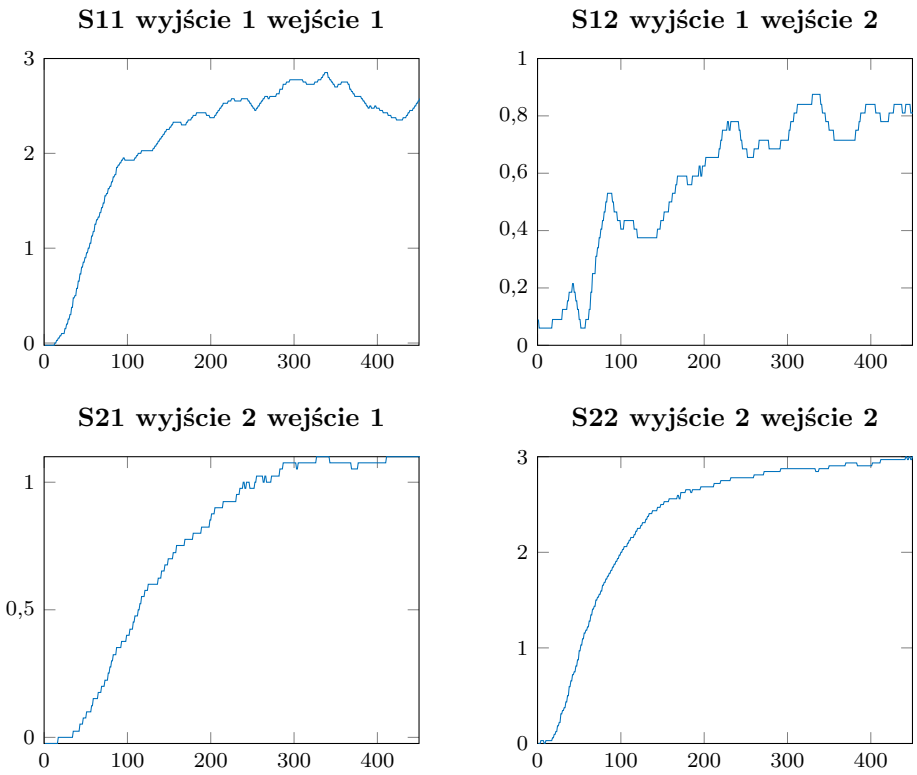
Rys. 5.5. Wyjścia obiektu: PID1: K=1 T_i=10 T_d=3 PID2: K=3 T_i=9 T_d=2

Żaden z powyższych zestawów regulatorów nie działa w sposób zadowalający. Sygnały wyjściowe zbliżają się do wartości zadanej, jednakże wartość ta ciągle oscyluje (oscylacje są dość duże). Rozwiązaniem tego problemu może być próba dostrojenia regulatorów.

5.4. Regulator DMC

Implementacja regulatora DMC w wersji 2x2 zaczeła się od wyznaczenia współczynników s. Do tego celu należy zebrać przebiegi wyjść na skok sygnału sterującego (kolejno skok na wejściu pierszym G1 przy stałym G2 oraz skok na wejściu G2 przy stałym G1). Następnie dla każdego z przebiegów należy zostosować wzór:

$$S_i = \frac{Y(i) - Y_{pp}}{\triangle U} \text{ ,dla } i = 1, 2 \dots D \tag{5.2}$$



Rys. 5.6. Odpowiedzi skokowe

Implementacja samego algorytmu regulacji DMC została wykonana w wersji oszczędnej, składającej się z dwóch części: 1. Wyliczenie K_e i K_u W Matlab:

```
clear all;
close all;
load('wspolczynnikis.mat')
czas_symulacji = 100;
nu=2; %liczba wejsc
ny=2; %liczba wyjsc

%Macierz odopowiedzi skokowych , kazdy wspolczynnik si to macierz 2x2
for i=1:length(s11)
    S(i)={[s11(i) s12(i);...
```

```
            s21(i) s22(i)]};
end

%Parametry dobrane eksperymentalnie
D=480; N=15; Nu=10;
lambda1=1; lambda2=1;
psi1=1; psi2=1;

%Punkty pracy W1=W2=50 (500) G1=25 (250) G2=30 (300)  T1= 29,81 T3=31,43
u1pp=250;
u2pp=300;

y1pp=2981;
y2pp=3143;


%Macierz Mp
for i=1:(D-1)
    for j=1:N
        if j+i>D
            Mp{j,i}=S{D}-S{i};
        else
            Mp{j,i}=S{j+i}-S{i};
        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]};
end



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

   end
end


%Macierz Lambd
for i=1:Nu
   for j=1:Nu
```

```
        if i == j
            Lambda{i,j} =[lambda1 0; 0 lambda2];
        else
            Lambda{i,j} =[0 0; 0 0];
        end

    end
end

%zamiana na macierze
Lambda_m = cell2mat(Lambda);
Mp_m = cell2mat(Mp);
M_m = cell2mat(M);
Psi_m = cell2mat(Psi);

%wyliczenie macierzy K
K=(M_m'*Psi_m*M_m+Lambda_m)^(-1)*M_m'*Psi_m;

%obliczenie Ku
K1 = K(1:ny,:);
Ku = K1*Mp_m;

%zapis do pliku tekstowego, tak aby latwo przekopiowac do GXWorks3
fileID = fopen('wiersz1.txt','w');
% petla do zapisu Ku1
for i=1:length(K1)
    fprintf( fileID, 'KU_1[%d] := %d;\n', i-1, Ku(1,i));
end
fclose(fileID);

fileID = fopen('wiersz2.txt','w');
% petla do zapisu Ku2
for i=1:length(K1)
    fprintf( fileID, 'KU_2[%d] := %d;\n', i-1, Ku(2,i));
end
fclose(fileID);



%obliczenie Ke (macierz rozmiaru 2x2)
Ke(1,1)=sum(K1(1,1:2:N*ny));
Ke(1,2)=sum(K1(1,2:2:N*ny));
Ke(2,1)=sum(K1(2,1:2:N*ny));
Ke(2,2)=sum(K1(2,2:2:N*ny));
```

2. Wyznczanie na bieżąco wartości sterowania:

```
KE_11 := -0.171922435496501;
KE_21 := 0.679020850746672;
KE_12 :=-0.318796410782815;
KE_22 :=0.202188351028979;

//wyznaczenie przyrostow (rozpisane dzialania macierzowe)
```

```
dU1 := KE_11*(y_zad1-T1_act)+KE_12*(y_zad2-T3_act);
dU2 := KE_21*(y_zad1-T1_act)+KE_22*(y_zad2-T3_act);

FOR IND := 0 TO 29 BY 1 DO
        dU1 := dU1 - KU_1[IND] *DUP[IND];
        dU2 := dU2 - KU_2[IND] *DUP[IND];
END_FOR;

// przesuniecie wartosci w wektorze dup
FOR IND := 30 TO 2 BY -1 DO
        DUP[IND] := DUP[IND-2];
END_FOR;
DUP[0] := dU1;
DUP[1] := du2;

U_1 := U_1 +dU1; //nowa wartosc to stara plus przyrost
U_2 := U_2 +dU2; //nowa wartosc to stara plus przyrost

D114 := REAL_TO_INT(U_1); //zadanie nowej wartosci sterowania
D115 := REAL_TO_INT(U_2); //zadanie nowej wartosci sterowania

//mechanizm zabezpieczajacy
```

Wartości Ke i Ku są przekopiowane z Matlaba. Ku jest przeniesione jako 2 wektory danych (KU_1, KU_2).

Tutaj tak samo jak w imlementacji regulatora PID, na sam koniec jest wykonywany mechanizm zabezpieczający. Niestety powyższego algorytmu nie udało się przetestować w realnych warunkach na stanowisku laboratoryjnym.

5.5. Panel operatora

Na interfejsie użytkownika po prawej stronie można zauważyć słupki, które obrazują wartości grzałek G1, G2 (od 0 do 100%). Po prawej stronie pod tytułem widnieją wartości zmierzonych temperatur (T1 oraz T3), pod nimi są wartości zadane tych wyjść. Na samym dole są 3 przyciski zmieniające stan automatu (a zboku widnieje napis mówiący, w którym stanie aktualnie się znajduje) opisanego w następnym podrozdziale.

5.6. Automat stanów

Listing 5.4. Implementacja automatu stanów

```
CASE Stan1 OF
        //M11 przycisk do zmiany na stan 1
        //M12 przycisk do zmiany na stan 2
        //M13 przycisk do zmiany na stan 3
        1:
        y_zad1 := 2981; //wartosci zadane dla stanu 1
        y_zad2 := 3143;
        IF M12 THEN
                Stan1 := 2;
        END_IF;
        IF M13 THEN
                Stan1 := 3;
        END_IF;
        2:
```

```
        y_zad1 := 3500; //wartosci zadane dla stanu 2
        y_zad2 := 5000;
        IF M11 THEN
                Stan1 := 1;
        END_IF;
        IF M13 THEN
                Stan1 := 3;
        END_IF;
        3:
        y_zad1 := 4000; //wartosci zadane dla stanu 3
        y_zad2 := 3500;
        IF M12 THEN
                Stan1 := 2;
        END_IF;
        IF M11 THEN
                Stan1 := 1;
        END_IF;

END_CASE;
```

Zmiana stanu automatu odbywa się po wciśnięciu przycisków (widocznych na panelu operatora). Każdy z tych przycisków posiada nazwę, która informuje na jaki stan zmienia się obecny stan. W każdym stanie zdefiniowane są inne wartości temperatór zadanych:

1. W stanie pierwszym: $T1^{zad} = 29,81°C$ $T3^{zad} = 31,43°C$
2. W stanie drugim: $T1^{zad} = 35°C$ $T3^{zad} = 50°C$
2. W stanie trzecim: $T1^{zad} = 40°C$ $T3^{zad} = 35°C$

Rys. 5.7. Wygląd interfejsu użytkownika