

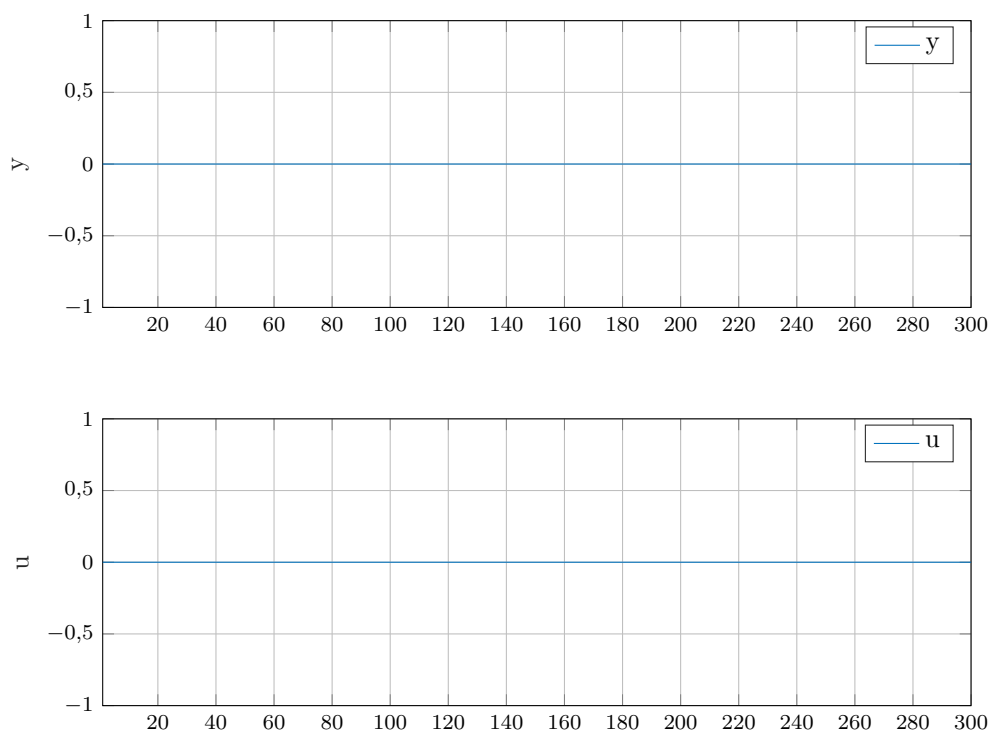
# Spis treści

<b>1. Projekt</b>	<b>2</b>
1.1. Poprawność podanego punktu pracy	2
1.2. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi skokowych	3
1.2.1. Odpowiedzi skokowe	3
1.2.2. Charakterystyka statyczna	4
1.3. Program do symulacji algorytmów PID i DMC	5
1.3.1. Klasyczny algorytm PID	5
1.3.2. Klasyczny algorytm DMC	7
1.4. Dobór parametrów klasycznych regulatorów PID i DMC	9
1.4.1. Klasyczny algorytm PID	9
1.4.2. Klasyczny algorytm DMC	12
1.5. Implementacja rozmytych algorytmów PID i DMC	13
1.5.1. Funkcje przynależności	13
1.5.2. Wykresy funkcji przynależności	14
1.5.3. Rozmyty algorytm PID	16
1.5.4. Rozmyty algorytm DMC	17
1.6. Dobór parametrów lokalnych regulatorów PID i DMC	18
1.6.1. Rozmyty regulator PID	18
1.6.2. Rozmyty regulator DMC - ustalona lambda	22
1.6.3. Wnioski	25
1.7. Dobór parametrów lambda lokalnych regulatorów DMC	26
1.7.1. Rozmyty regulator DMC	26
1.7.2. Wnioski	29
<b>2. Laboratorium</b>	<b>30</b>
2.1. Poprawność podanego punktu pracy	30
2.2. Eksperymentalne wyznaczenie odpowiedzi skokowych	31
2.2.1. Odpowiedzi skokowe	31
2.2.2. Charakterystyka statyczna	32
2.3. Testy klasycznych regulatorów PID i DMC	33
2.3.1. Klasyczny algorytm PID	33
2.3.2. Klasyczny algorytm DMC	34
2.4. Testy rozmytych regulatorów PID	35
2.4.1. Funkcje przynależności	35
2.4.2. Implementacja rozmytego algorytmu PID	36
2.4.3. Dobór parametrów lokalnych regulatorów PID	37
2.4.4. Wyniki eksperymentów	37
2.5. Testy rozmytych regulatorów DMC	38
2.5.1. Funkcje przynależności	38
2.5.2. Implementacja rozmytego algorytmu DMC	39
2.5.3. Wyniki eksperymentów	40
2.6. Dobór parametrów lambda lokalnych regulatorów DMC	41
2.6.1. Wyniki eksperymentów	41

# 1. Projekt

## 1.1. Poprawność podanego punktu pracy

Przeprowadzono symulację odpowiedzi procesu dla punktu pracy. Ustalono stałe sterowanie  $U_{pp} = 0$ .



Rys. 1.1. Punkt pracy

Wynik:

Uzyskany punkt pracy wyjścia  $Y_{pp} = 0$ .

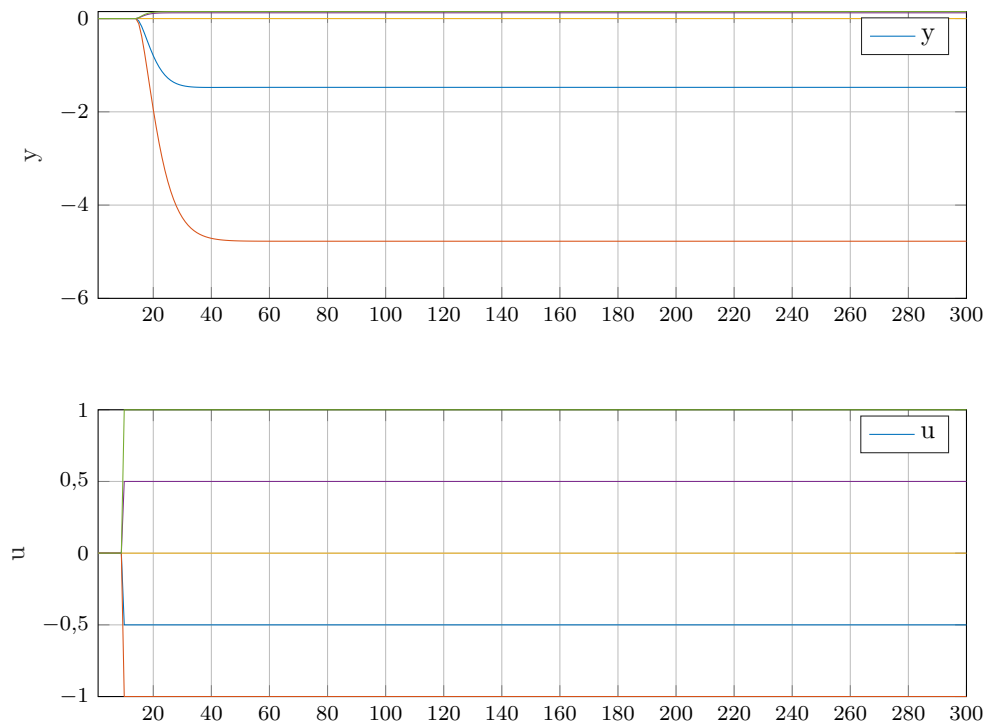
Wniosek:

Stała wartość wyjścia oznacza poprawność danych punktu pracy.

## 1.2. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi skokowych

Odpowiedzi skokowe zostały wyznaczone symulacyjnie dla pięciu zmian sygnału sterującego.

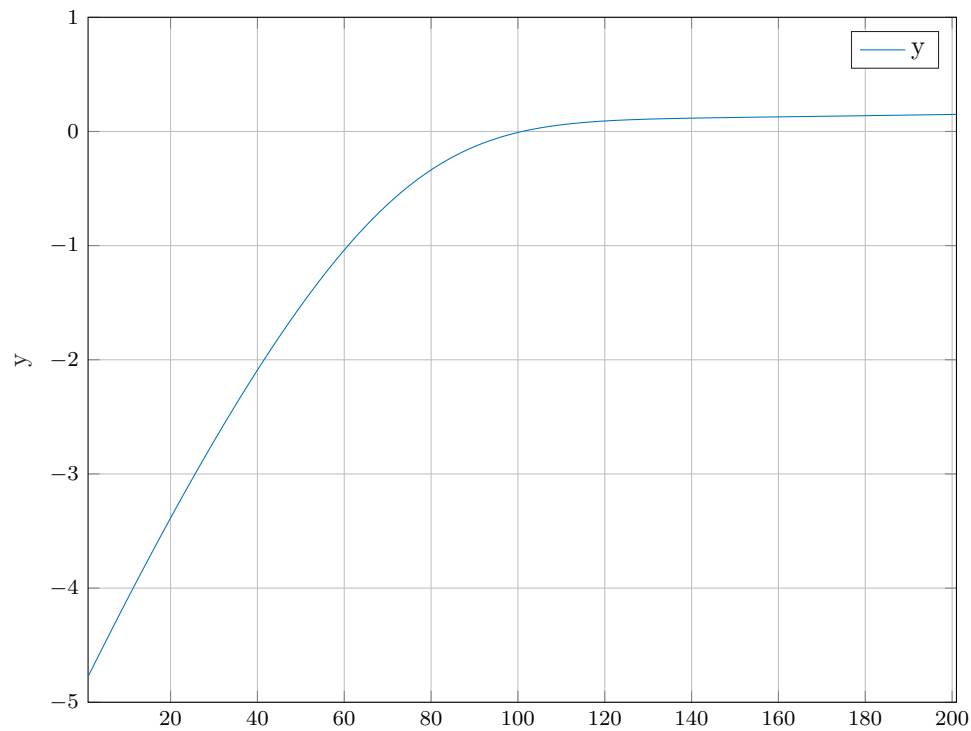
### 1.2.1. Odpowiedzi skokowe



Rys. 1.2. Odpowiedzi skokowe obiektu

### 1.2.2. Charakterystyka statyczna

Na podstawie serii odpowiedzi skokowych wyznaczono charakterystykę statyczną



Rys. 1.3. Charakterystyka statyczna obiektu

Na podstawie wykresu charakterystyki statycznej można ustalić, że właściwości statyczne procesu są nieliniowe.

## 1.3. Program do symulacji algorytmów PID i DMC

### 1.3.1. Klasyczny algorytm PID

W środowisku MATLAB napisano skrypt implementujący algorytm klasycznego regulatora PID

#### Inicjacja symulacji

Listing 1.1. "Inicjacja parametrów symulacji"

```
% wybor symulacja czy obiekt rzeczywisty
% 'simulation' lub 'real'
mode = 'simulation';

if( isequal(regulator, 'real') )
    addpath('F:\SerialCommunication'); % add a path
    initSerialControl COM5 % initialise com port
end

% wybor trybu pracy
% setpoint, stepsU, stepsYzad
action = 'stepsYzad';
% wybor regulatora
% none, PID_linear, DMC_linear, PID_fuzzy, DMC_fuzzy
regulator = 'PID_fuzzy';

% parametry skryptu
kk = 2500;
Tp = 1; % okres probkowania
Tl = 39.4; % temperatura punktu pracy
G1 = 32; % sterowanie punktu pracy
y = ones(1, kk)*Tl; % wektor wyjsc obiektu
yzad = ones(1, kk)*Tl; % wektor wartosc zadanych
e = zeros(1, kk); % wektor uchybow regulacji
u = ones(1, kk)*G1; % wektor wejsc (sterowan) obiektu
offset = 400;

%ograniczenia wartosci sterowania
if( isequal(regulator, 'real') )
    umax = 100;
    umin = 0;
else
    umax = 1;
    umin = -1;
end
```

Listing 1.2. "Wyznaczanie nastaw klasycznego regulatora PID"

```
% regulacja z uzyciem regulatora PID linear
if( isequal(regulator, 'PID_linear') )
    %nastawy klasycznego regulatora PID
    Kr = 3.7;
    Ti = 60.5;
    Td = 0.0;
    settings(1).N = 1;
    settings(1).Tp = Tp;
    settings(1).r0 = Kr*(1+Tp/(2*Ti)+Td/Tp);
    settings(1).r1 = Kr*(Tp/(2*Ti)-2*Td/Tp-1);
    settings(1).r2 = Kr*Td/Tp;
    settings(1).u1 = G1;
```

## Pętla główna symulacji

Listing 1.3. "Wyznaczenie bieżącej wartości wyjścia obiektu y"

```
% obtaining measurements
if( isequal(regulator, 'real') )
    measurements = readMeasurements (1:7) ; % read measurements
    y(k)=measurements(1); % powiększamy wektor y o element Y
else
    y(k)=symulacja_obiektu7y(u(k-5),u(k-6),y(k-1),y(k-2));
end
```

Listing 1.4. "Wyznaczenie wartości zadanej yzad"

```
% podazanie do setpoint
if( isequal(action, 'setpoint') )
    %disp('setpoint')
    yzad(k) = T1;
    u(k) = G1;
% skoki sterowania
elseif( isequal(action, 'stepsU') )
    %disp('stepsU')
    if( k<=300 )        u(k) = 20; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=600 )    u(k) = 30; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=900 )    u(k) = G1; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=1200 )   u(k) = 40; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=1500 )   u(k) = 50; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=1800 )   u(k) = 60; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=2100 )   u(k) = 70; yzad(k) = u(k);
    else                u(k) = 80; yzad(k) = u(k);
    end
% skoki wartosci zadanej z regulatorem
elseif( isequal(action, 'stepsYzad') )
    %disp('stepsYzad')
    if( k<=offset+350 )    yzad(k) = T1;
    elseif( k<=offset+700 ) yzad(k) = T1 + 5;
    elseif( k<=offset+1050 ) yzad(k) = T1 + 15;
    else                  yzad(k) = T1;
    end
else
    error('NO VALID ACTION SELECTED');
end
```

Listing 1.5. "Wyznaczenie wartości sterowania u"

```
% regulacja z uzyciem regulatora PID linear
if( isequal(regulator, 'PID_linear') )
    %disp('pid_linear')
    %wyznaczenie nowej wartosci sterowania
    u(k) = getPIDcontrol(settings(1), e(k), e(k-1), e(k-2), u(k-1));
    %nalozenie ograniczen sterowania
    if( u(k)>umax )
        u(k) = umax;
    elseif( u(k)<umin )
        u(k) = umin;
    end
    %regulator moze uzyc poprzedniej wartosci sterowania
    settings(1).u1 = u(k);
```

### 1.3.2. Klasyczny algorytm DMC

W środowisku MATLAB napisano skrypt implementujący algorytm klasycznego regulatora DMC

#### Inicjacja symulacji

Listing 1.6. "Inicjacja parametrów symulacji"

```
% wybor symulacja czy obiekt rzeczywisty
% 'simulation' lub 'real'
mode = 'simulation';

if( isequal(regulator, 'real') )
    addpath('F:\SerialCommunication'); % add a path
    initSerialControl COM5 % initialise com port
end
% wybor trybu pracy
% setpoint, stepsU, stepsYzad
action = 'stepsYzad';
% wybor regulatora
% none, PID_linear, DMC_linear, PID_fuzzy, DMC_fuzzy
regulator = 'PID_fuzzy';

% parametry skryptu
kk = 2500;
Tp = 1; % okres probkowania
Tl = 39.4; % temperatura punktu pracy
G1 = 32; % sterowanie punktu pracy
y = ones(1,kk)*Tl; % wektor wyjsc obiektu
yzad = ones(1,kk)*Tl; % wektor wartosc zadanych
e = zeros(1,kk); % wektor uchybow regulacji
u = ones(1,kk)*G1; % wektor wejsc (sterowan) obiektu
offset = 400;

%ograniczenia wartosci sterowania
if( isequal(regulator, 'real') )
    umax = 100;
    umin = 0;
else
    umax = 1;
    umin = -1;
end
```

Listing 1.7. "Wyznaczanie nastaw klasycznego regulatora DMC"

```
% regulacja z uzyciem regulatora DMC linear
elseif( isequal(regulator, 'DMC_linear') )
    %nastawy klasycznego regulatora DMC
    load('s.mat')
    D = length(s); % horyzont dynamiki
    N=200;
    Nu=10;
    lambda = 1;
    run('DMC_init.m');
    n=1;
    settings(n).lambda = lambda;
    settings(n).N = N;
    settings(n).Nu = Nu;
    settings(n).D = D;
    settings(1).Mp = Mp;
    settings(1).K = K;
    settings(1).deltaUp = deltaUp;
```

## Pętla główna symulacji

Listing 1.8. "Wyznaczenie bieżącej wartości wyjścia obiektu y"

```
% obtaining measurements
if( isequal(regulator, 'real') )
    measurements = readMeasurements (1:7) ; % read measurements
    y(k)=measurements(1); % powiększamy wektor y o element Y
else
    y(k)=symulacja_obiektu7y(u(k-5),u(k-6),y(k-1),y(k-2));
end
```

Listing 1.9. "Wyznaczenie wartości zadanej yzad"

```
% podazanie do setpoint
if( isequal(action, 'setpoint') )
    %disp('setpoint')
    yzad(k) = T1;
    u(k) = G1;
% skoki sterowania
elseif( isequal(action, 'stepsU') )
    %disp('stepsU')
    if( k<=300 )        u(k) = 20; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=600 )    u(k) = 30; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=900 )    u(k) = G1; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=1200 )   u(k) = 40; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=1500 )   u(k) = 50; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=1800 )   u(k) = 60; yzad(k) = u(k);
    elseif( k<=2100 )   u(k) = 70; yzad(k) = u(k);
    else                u(k) = 80; yzad(k) = u(k);
    end
% skoki wartosci zadanej z regulatorem
elseif( isequal(action, 'stepsYzad') )
    %disp('stepsYzad')
    if( k<=offset+350 )    yzad(k) = T1;
    elseif( k<=offset+700 ) yzad(k) = T1 + 5;
    elseif( k<=offset+1050 ) yzad(k) = T1 + 15;
    else                yzad(k) = T1;
    end
else
    error('NO VALID ACTION SELECTED');
end
```

Listing 1.10. "Wyznaczenie wartości sterowania u"

```
% regulacja z uzyciem regulatora DMC linear
elseif( isequal(regulator, 'DMC_linear') )
    %disp('DMC_linear')
    settings(1).u1 = u(k-1);
    u(k) = getDMCcontrol(settings(1), y, k, yzad);
%nałożenie ograniczeń sterowania
if( u(k)>umax )
    u(k) = umax;
elseif( u(k)<umin )
    u(k) = umin;
end
settings(1).deltaUp(k) = u(k)-u(k-1);
```



## 1.4. Dobór parametrów klasycznych regulatorów PID i DMC

Ocena jakości regulacji na podstawie rysunków przebiegów sygnałów polega na ocenie jakościowej, analizowane są takie kryteria jak czas regulacji czy przeregulowanie. Na podstawie tych kryteriów oceny dobierane są nastawy regulatora PID.

Ocena jakości regulacji ilościowa polega na wyznaczaniu wskaźnika jakości regulacji, którym jest suma kwadratów uchybów, a  $k_{konc}$  oznacza ilość kroków symulacji.

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

Ocena jakości regulacji jakościowa jest metodą mniej dokładną od oceny ilościowej, nie występują tam obliczenia a jedynie analiza rysunków przebiegów. Podczas analizy rysunku osoba oceniająca jakość regulacji narażona jest na mało precyzyjne wnioski, gdyż należy wtedy zwracać uwagę na skalę rysunku i wiele innych parametrów. Ocena ilościowa nie bierze pod uwagę takich czynników jak np. oscylacje, jedynym kryterium jest suma kwadratów uchybów. Jeżeli do oceny jakości regulacji wymagane są inne kryteria niż podany wskaźnik jakości należy rozpatrzyć metodę oceny jakościowej.

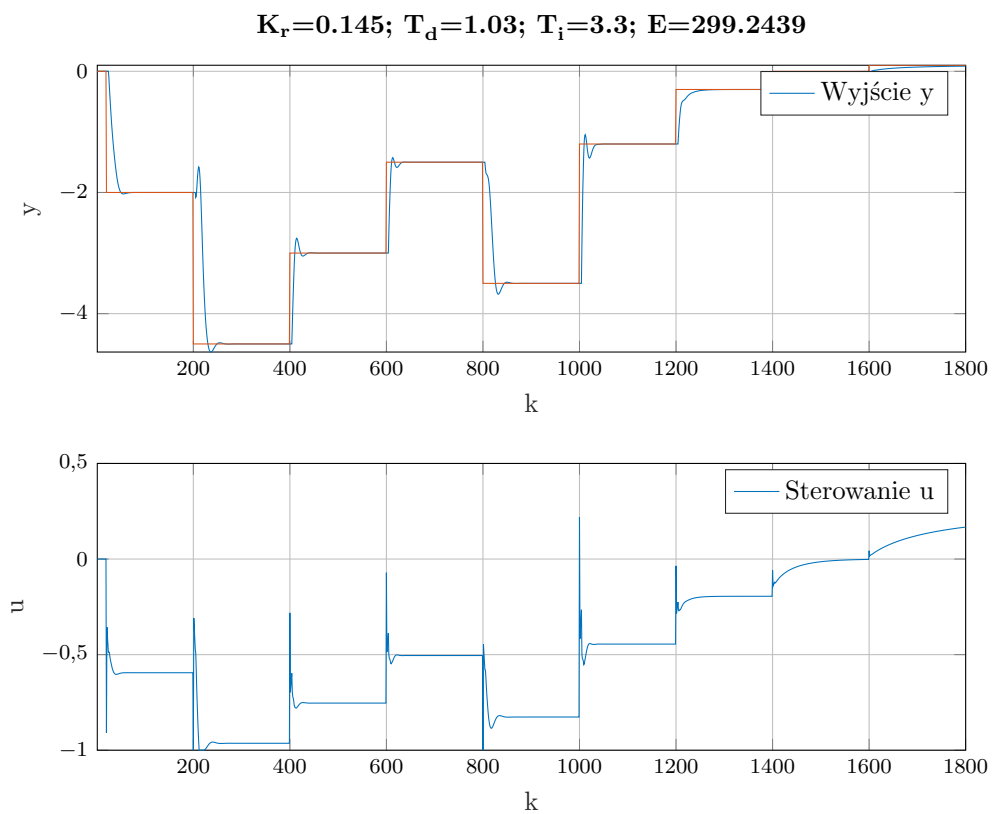
### 1.4.1. Klasyczny algorytm PID

Regulator został nastrojony przy użyciu metody Zieglera-Nicholsa.

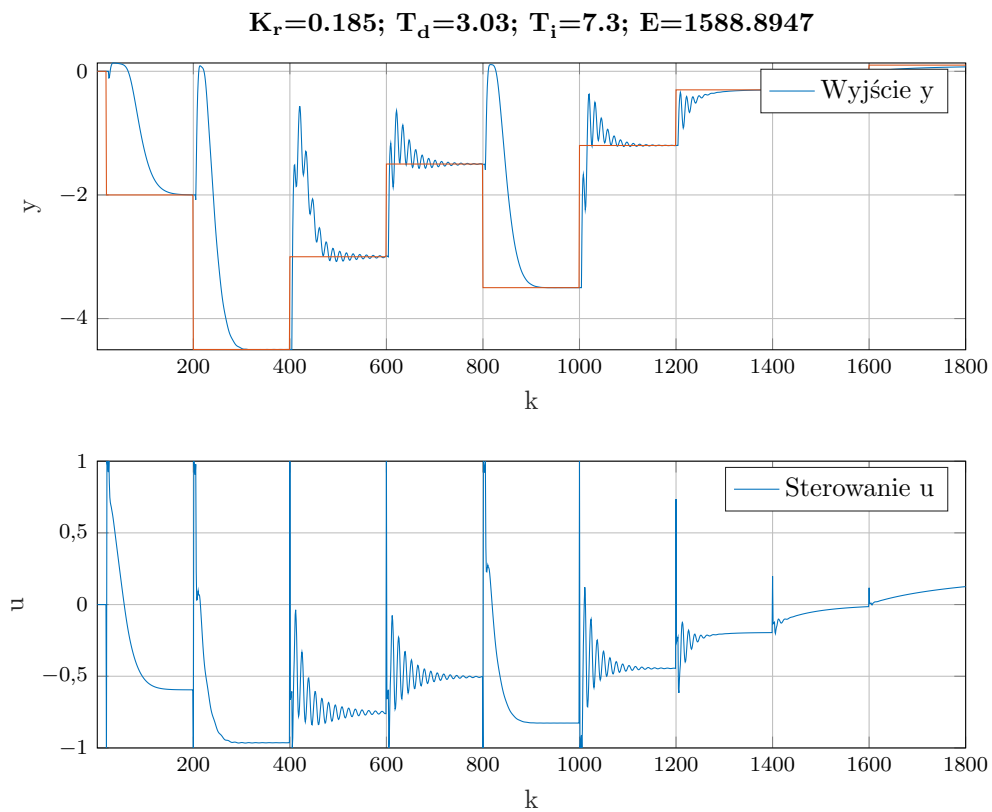
#### Metoda Zieglera-Nicholsa

Metoda Zieglera-Nicholsa polega na nastawieniu regulatora na działanie proporcjonalne i zwiększaniu wzmocnienia doprowadzając układ do granicy stabilności. W stanie na granicy stabilności (oscylacje niegasnące) należy odczytać współczynnik wzmocnienia krytycznego układu  $K_k$  oraz okres oscylacji  $T_k$ . Na podstawie tych wartości obliczamy nastawy regulatora PID za pomocą poniższych równań:

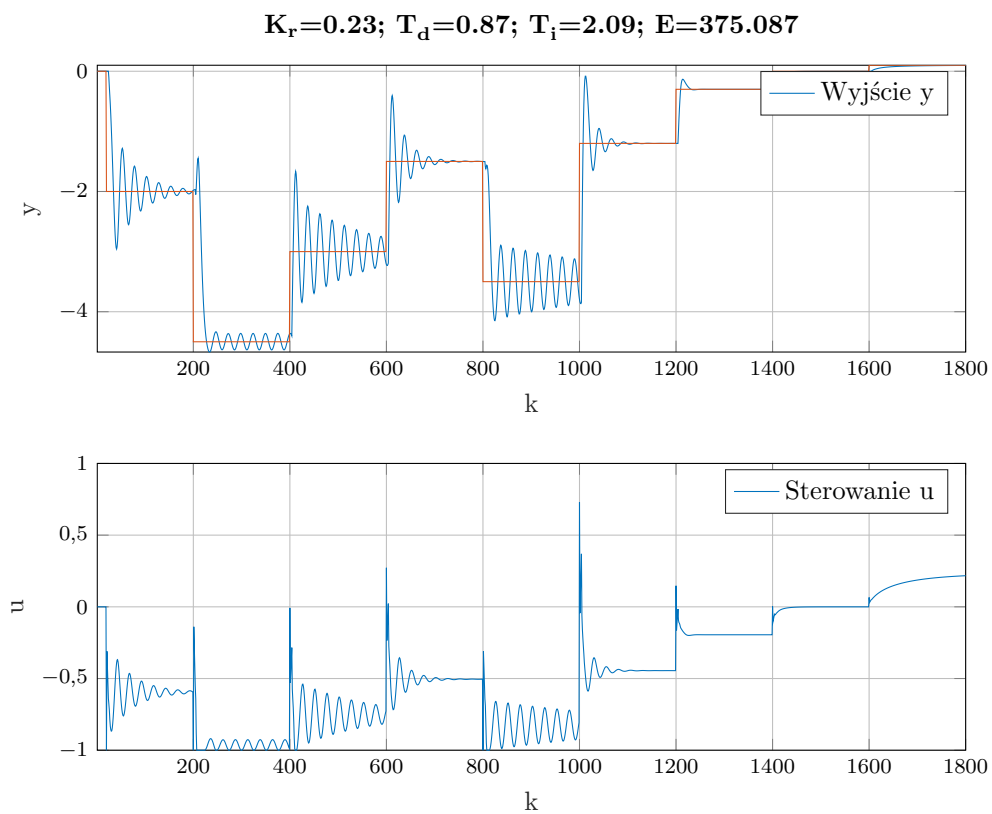
$$K_r = 0.6K_k \quad T_i = 0.65T_k \quad T_d = 0.12T_k$$

**Dobrene regulatory klasyczne PID**

Rys. 1.4. Regulator klasyczny PID pierwszy



Rys. 1.5. Regulator klasyczny PID drugi



Rys. 1.6. Regulator klasyczny PID trzeci

### 1.4.2. Klasyczny algorytm DMC

Do doboru nastaw algorytm DMC zastosowano metodę inżynierską, która polega na przeprowadzeniu doświadczeń i analizy uzyskanych wyników. Na podstawie wyciągniętych wniosków modyfikowane są nastawy regulatora. Parametry dobierane są metodą prób i błędów, aż do osiągnięcia oczekiwanych wyników.

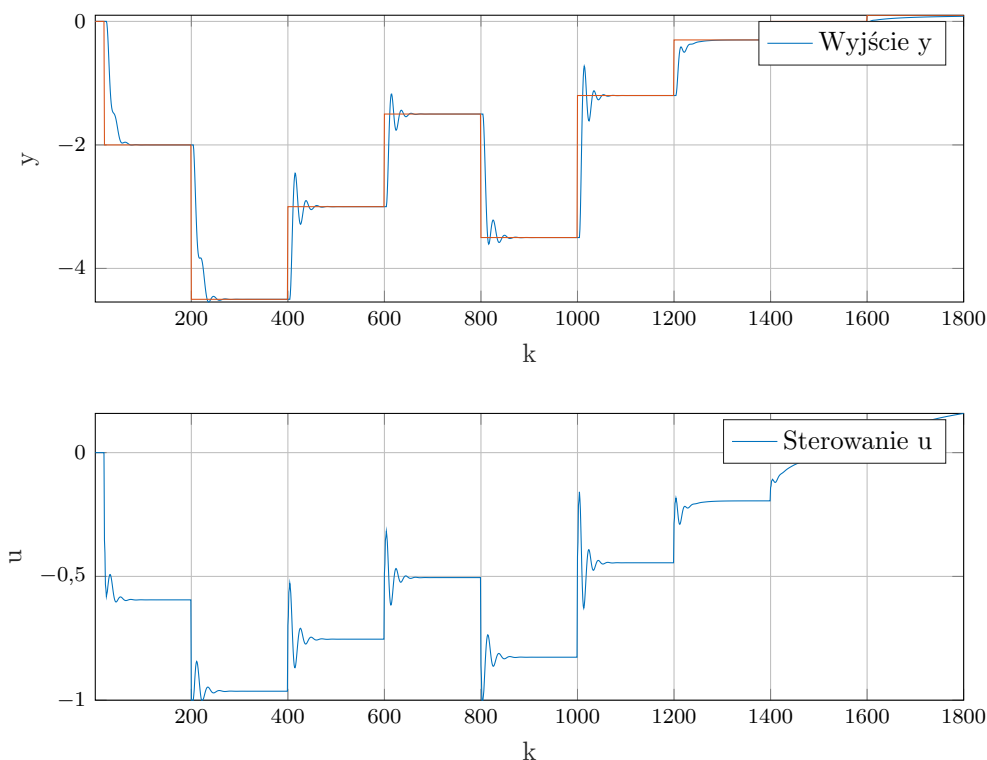
Horyzont dynamiki  $D$  jest to liczba współczynników odpowiedzi skokowej, tzn. liczbę kroków dyskretyzacji, po której można uznać odpowiedź skokową za stabilną równą  $K_{stat}$ . Wyznaczona ona została z odpowiedzi skokowej obiektu poprzez wyznaczenie z niej chwili, w której odpowiedź jest stabilna.

Horyzont predykcji  $N$  jest to wartość na podstawie, której prognozuje się zachowanie modelu. Zwiększając ten parametr uzyskaliśmy bardzo dobry czas regulacji oraz praktycznie zerowe przesterowanie.

Horyzont sterowania  $N_u$  tak jak horyzont predykcji jest parametrem dostrajania regulatora, zależnymi od szybkości dynamiki procesu, możliwości obliczeniowych oraz dokładności modelu, eksperymentalnie dobrano wartość tego parametru.

Ostatnim krokiem w dostrajaniu naszego regulatora było wyznaczenie współczynnika kary  $\lambda$ , za pomocą którego można zapewnić kompromis pomiędzy szybkością regulacji, a postacią sygnału sterującego. Ponownie był on wyznaczany metodą testowania. Zwiększenie współczynnika kary pogorszyło wynik działania regulatora, został więc on zmniejszony.

**$N=50$ ;  $N_u=6$ ;  $\lambda=25$ ;  $E=223.8521$**



Rys. 1.7. Regulator klasyczny DMC

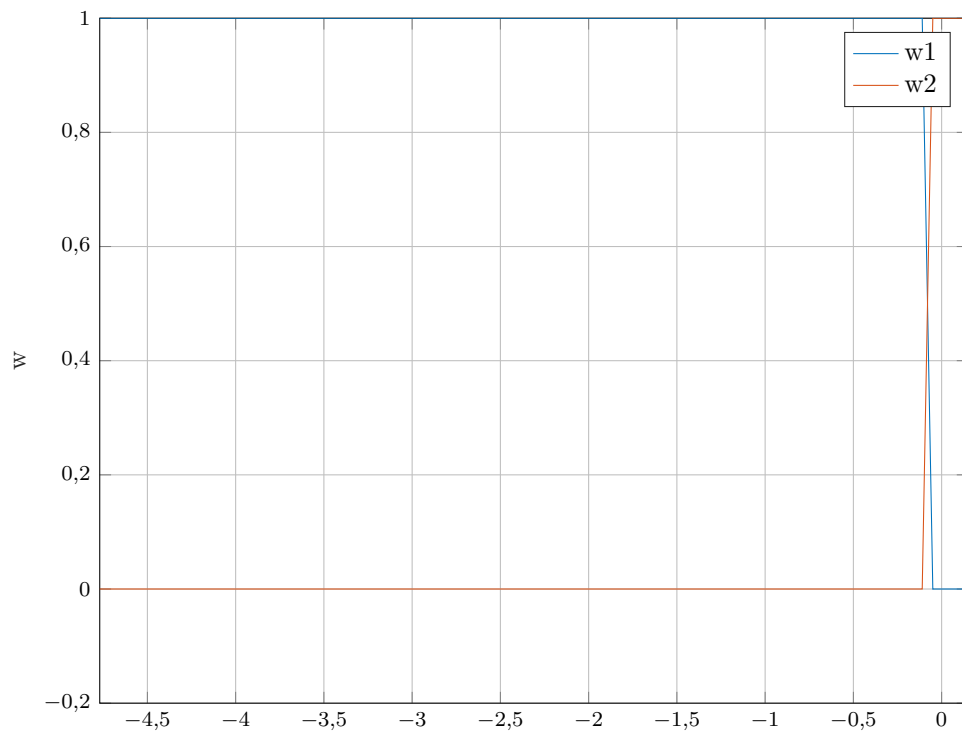
## 1.5. Implementacja rozmytych algorytmów PID i DMC

Poprzez zastosowanie wielu lokalnych regulatorów dla poszczególnych punktów pracy oraz funkcji przynależności zaimplementowano rozmyte algorytmy PID oraz DMC.

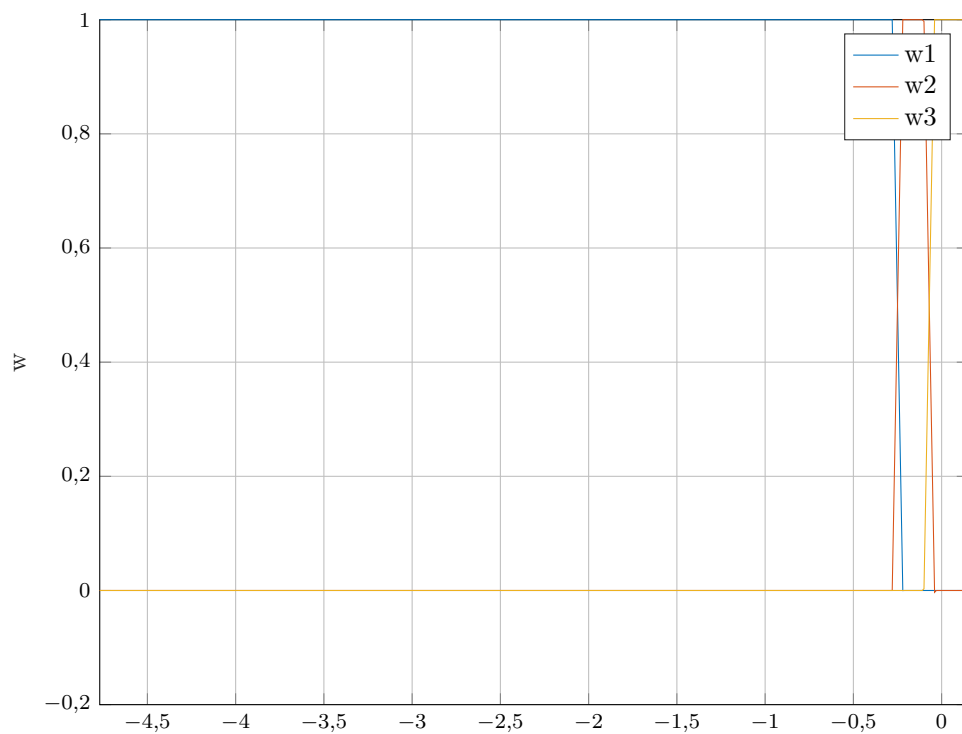
### 1.5.1. Funkcje przynależności

Wybór regulatora dokonywany jest dzięki funkcji przynależności. Jako funkcja przynależności posłużyła nam funkcja trapezoidalna. Funkcja ta zawiera współczynniki, które definiują jak duży wpływ na dane wyjście ma dany regulator w badanym obszarze. Dobór tych współczynników został przeprowadzony poprzez obserwacje zachowania obiektu. Dla każdego z lokalnych regulatorów PID oraz DMC należało dobrać parametry osobno w jego punkcie pracy, w tym celu zostały przeprowadzone eksperymenty, parametry dobrane zostały metodą inżynierską. Ostatecznie regulatory zostały połączone w funkcji. Dzięki wykorzystaniu rozmytego algorytmu PID oraz DMC możemy zniwelować problem nieliniowości obiektu. Rozmywanie dokonywane jest na podstawie charakterystyki statycznej, dobór parametrów na podstawie aktualnej wartości sygnału wyjściowego  $y$ . Kształt trapezoidalny funkcji przynależności został wybrany na podstawie eksperymentów, dla trapezoidalnej funkcji wagi zmieniają się proporcjonalnie. Kształt trapezu pozwala na utrzymanie wartości 1 co w przypadku trójkątnej nie jest możliwe, natomiast na ramionach trapezu można dobrze uzupełniać funkcje przynależności równie dobrze jak w trójkątnej.

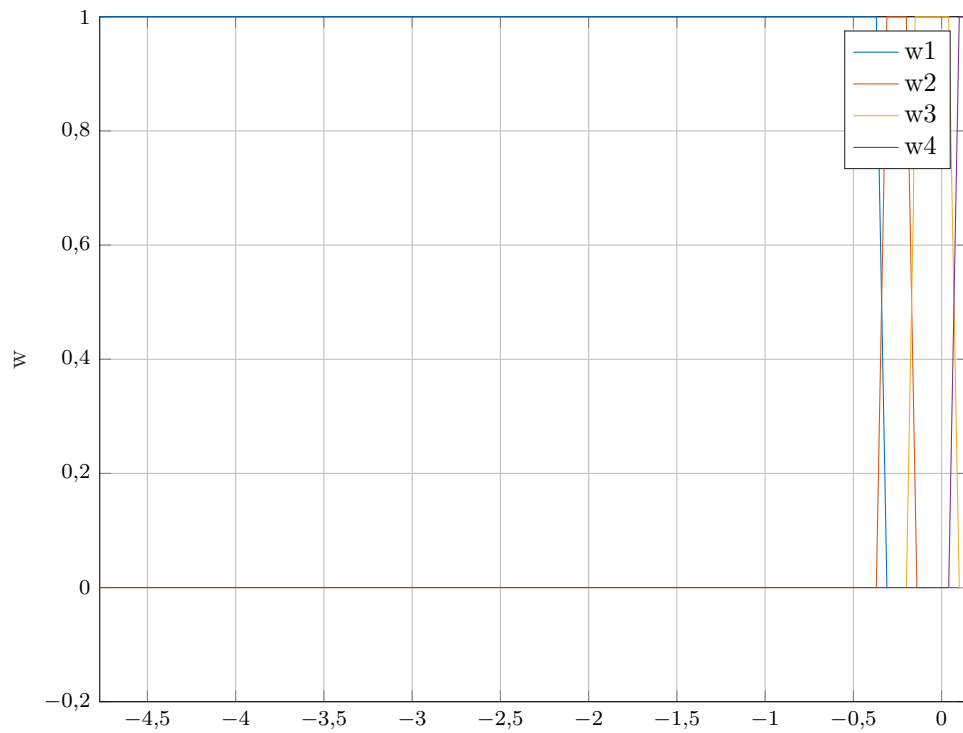
### 1.5.2. Wykresy funkcji przynależności



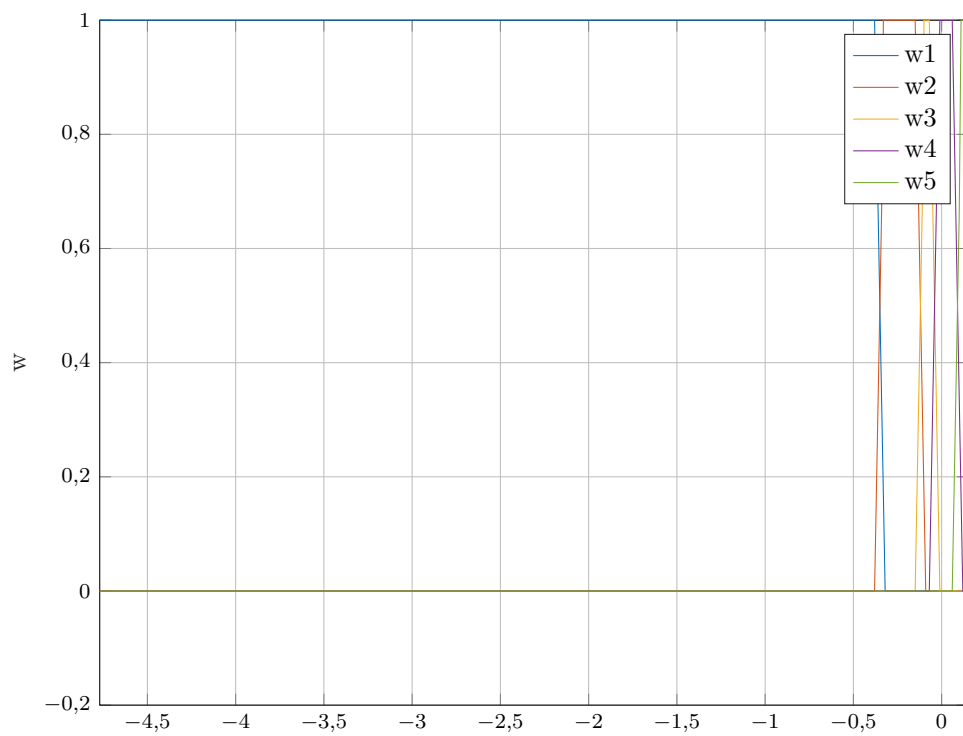
Rys. 1.8. Funkcje rozmycia dla 2 regulatorów lokalnych



Rys. 1.9. Funkcje rozmycia dla 3 regulatorów lokalnych



Rys. 1.10. Funkcje rozmycia dla 4 regulatorów lokalnych



Rys. 1.11. Funkcje rozmycia dla 5 regulatorów lokalnych

### 1.5.3. Rozmyty algorytm PID

Listing 1.11. "Wyznaczanie nastaw rozmytych regulatorów PID"

```
% regulacja z uzyciem regulatora PID fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'PID_fuzzy') )
    %nastawy regulatorow PID
    Kr = [ 4.2  6.5      8.35]; % P
    Ti = [ 67.8 83.7     90.4]; % I
    Td = [ 0.0  0.0      0.3 ]; % D

    fuzzyN = length(Kr);
    settings(fuzzyN).N = fuzzyN;
    for n=1:fuzzyN
        settings(n).Tp = Tp;
        settings(n).r0 = Kr(n)*(1+Tp/(2*Ti(n))+Td(n)/Tp);
        settings(n).r1 = Kr(n)*(Tp/(2*Ti(n))-2*Td(n)/Tp-1);
        settings(n).r2 = Kr(n)*Td(n)/Tp;
        settings(n).u1 = G1;
    end
end
```

Listing 1.12. "Wyznaczenie wartości sterowania u"

```
% regulacja z uzyciem regulatora PID fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'PID_fuzzy') )
    u_ = zeros(1, fuzzyN);
    for n=1:fuzzyN
        %wyznaczenie nowej wartosci sterowania od regulatora
        u_(n) = getPIDcontrol(settings(n), e(k), e(k-1), e(k-2), settings(n).u1);
        %nalozenie ograniczen sterowania
        if( u_(n)>umax )
            u_(n) = umax;
        elseif( u_(n)<umin )
            u_(n) = umin;
        end
        %regulator moze uzyc poprzedniej wartosci sterowania
        settings(n).u1 = u_(n);

        %funkcja wagi regulatora
        w = [];
        if( isequal(mode, 'real') )
            w = fun_przyn_lab(y(k));
            w = w(n);
        else

        end
        w
        u_(n) = u_(n) * w;
    end
    u_
    % wyznaczenie sterowania rozmytego
    u(k) = sum(u_);
```



## 1.5.4. Rozmyty algorytm DMC

Listing 1.13. "Wyznaczanie nastaw rozmytych regulatorów DMC"

```
% regulacja z użyciem regulatora DMC fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'DMC_fuzzy') )
    fuzzyN = 3;
    %nastawy regulatora DMC
    N=200;
    Nu=10;

    lambdaVect = [1 1 1];
    for n=1:length(lambdaVect)
        lambda = lambdaVect(n);
        %wczytanie wektora s danego regulatora lokalnego
        load(strcat('s',num2str(n),'.mat'));
        D = length(s); % horyzont dynamiki

    N = D;
    Nu = N;
        run('DMC_init.m');

        settings(n).lambda = lambda;
        settings(n).N = N;
        settings(n).Nu = Nu;
        settings(n).D = D;
        settings(n).Mp = Mp;
        settings(n).K = K;
        settings(n).deltaUp = deltaUp;
    settings(n).u1 = G1;
end
```

Listing 1.14. "Wyznaczenie wartości sterowania u"

```
% regulacja z użyciem regulatora DMC fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'DMC_fuzzy') )
    u_ = zeros(1, fuzzyN);
    for n=1:fuzzyN
        %wyznaczenie nowej wartosci sterowania od regulatora
        u_(n) = getDMCcontrol(settings(1), y, k, yzad);
        %nałożenie ograniczeń sterowania
        if( u_(n)>umax )
            u_(n) = umax;
        elseif( u_(n)<umin )
            u_(n) = umin;
        end
        %regulator może użyć poprzedniej wartości sterowania

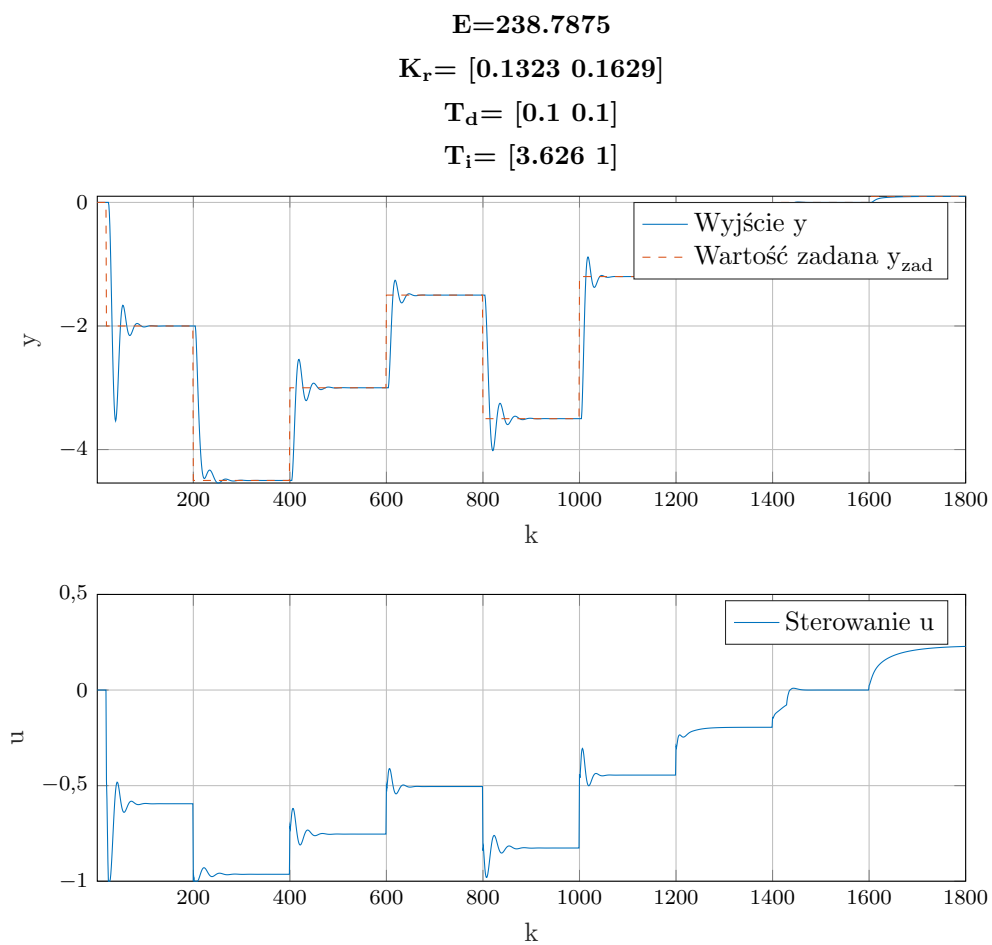
        settings(n).deltaUp(k) = u_(n)-settings(n).u1;
        settings(n).u1 = u_(n);

        %funkcja wagi regulatora
        w = [];
        if( isequal(mode, 'real') )
            w = fun_przyn_lab(y(k));
            w = w(n);
        else

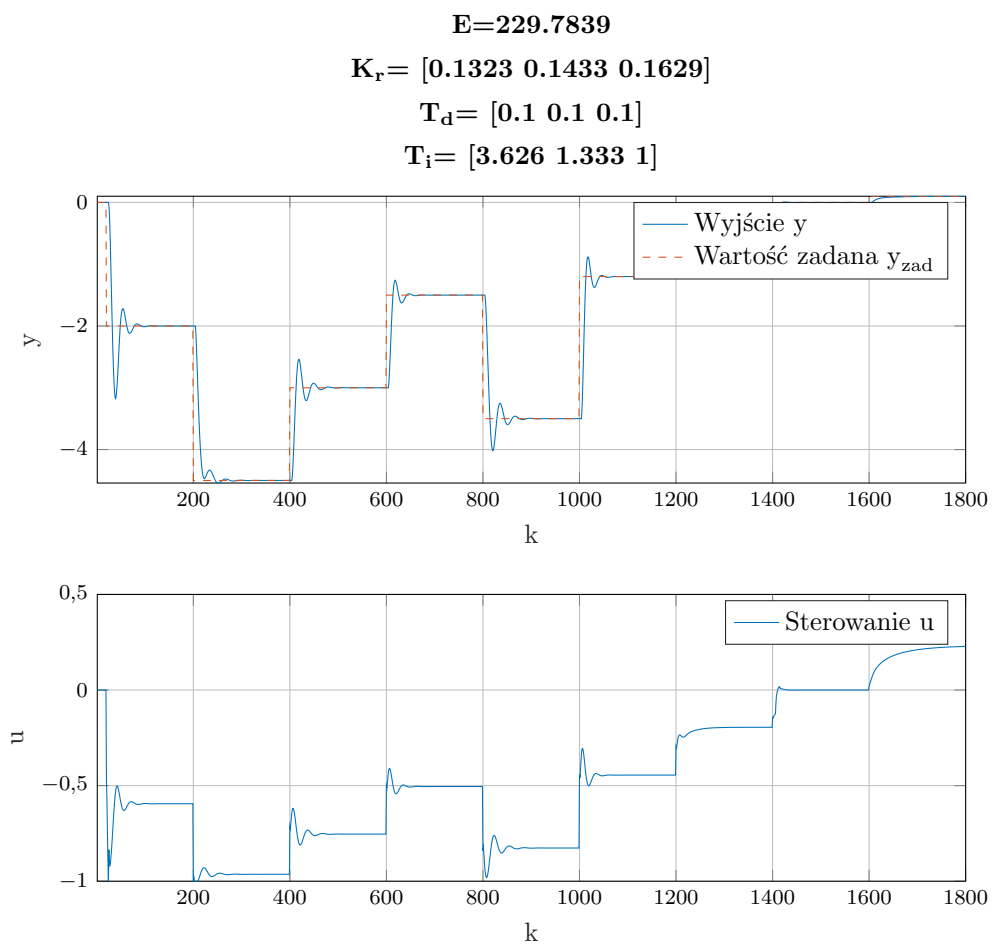
            end
        u_(n) = u_(n) * w
    end
    % wyznaczenie sterowania rozmytego
    u(k) = sum(u_);
```

## 1.6. Dobór parametrów lokalnych regulatorów PID i DMC

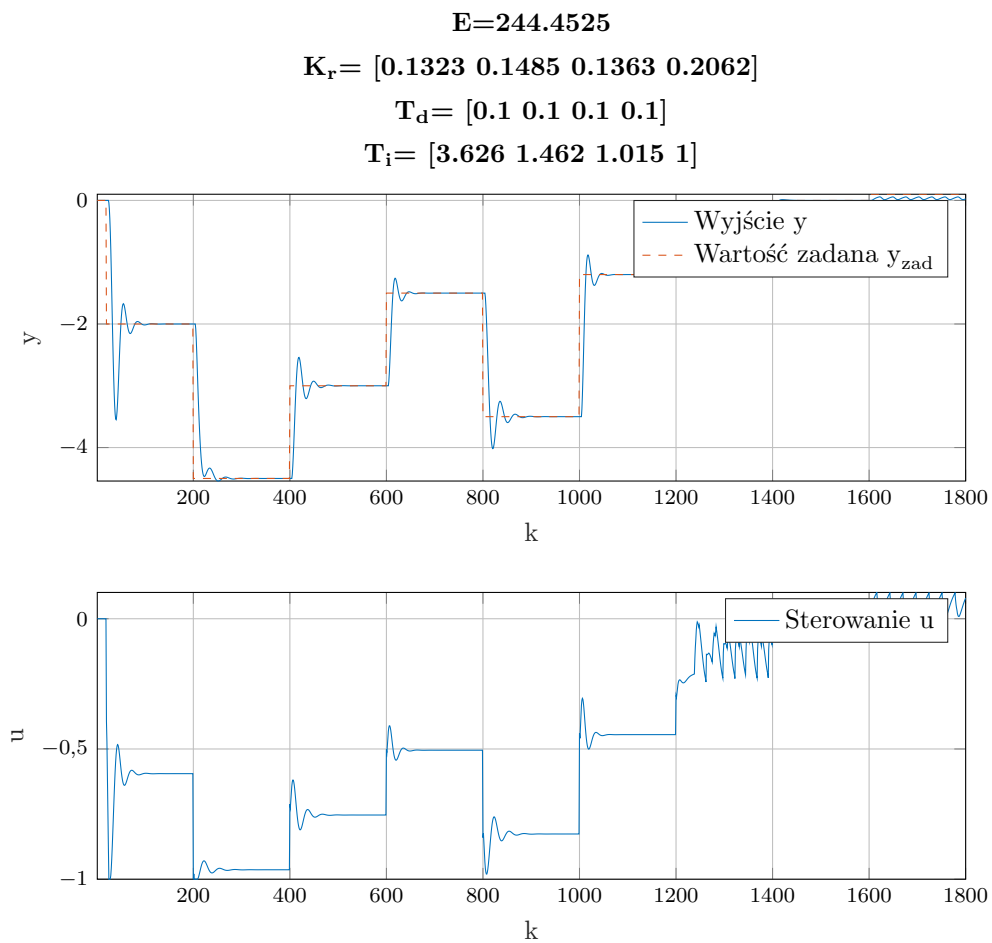
### 1.6.1. Rozmyty regulator PID



Rys. 1.12. Dwa regulatory lokalne PID



Rys. 1.13. Trzy regulatory lokalne PID



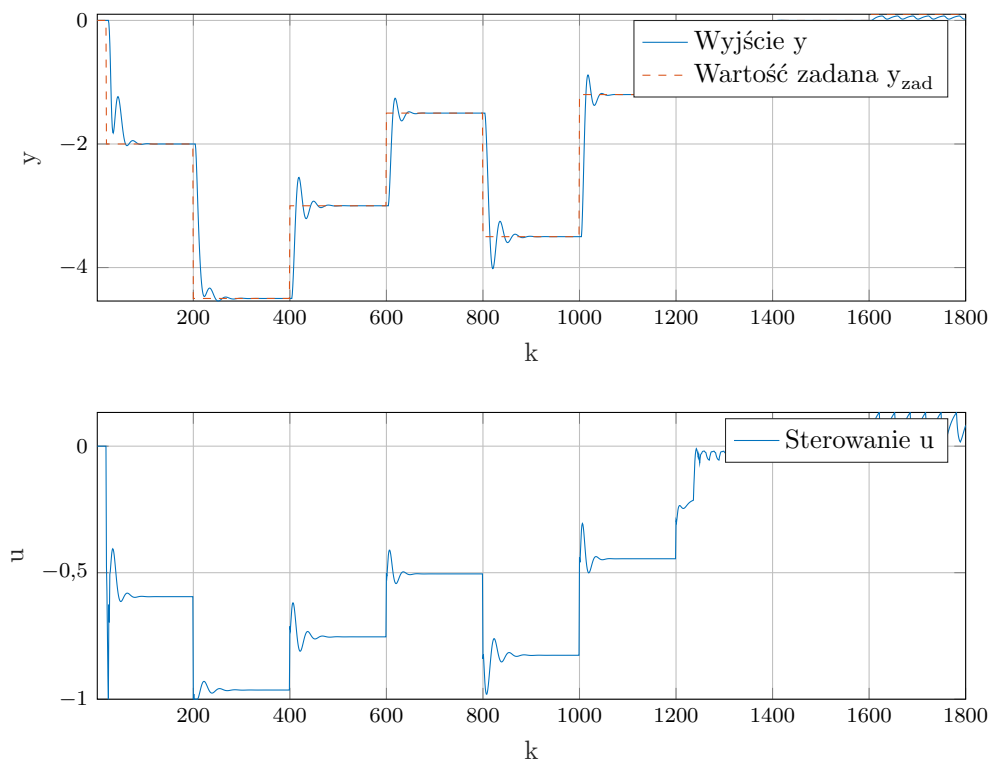
Rys. 1.14. Cztery regulatory lokalne PID

$$\mathbf{E}=235.314$$

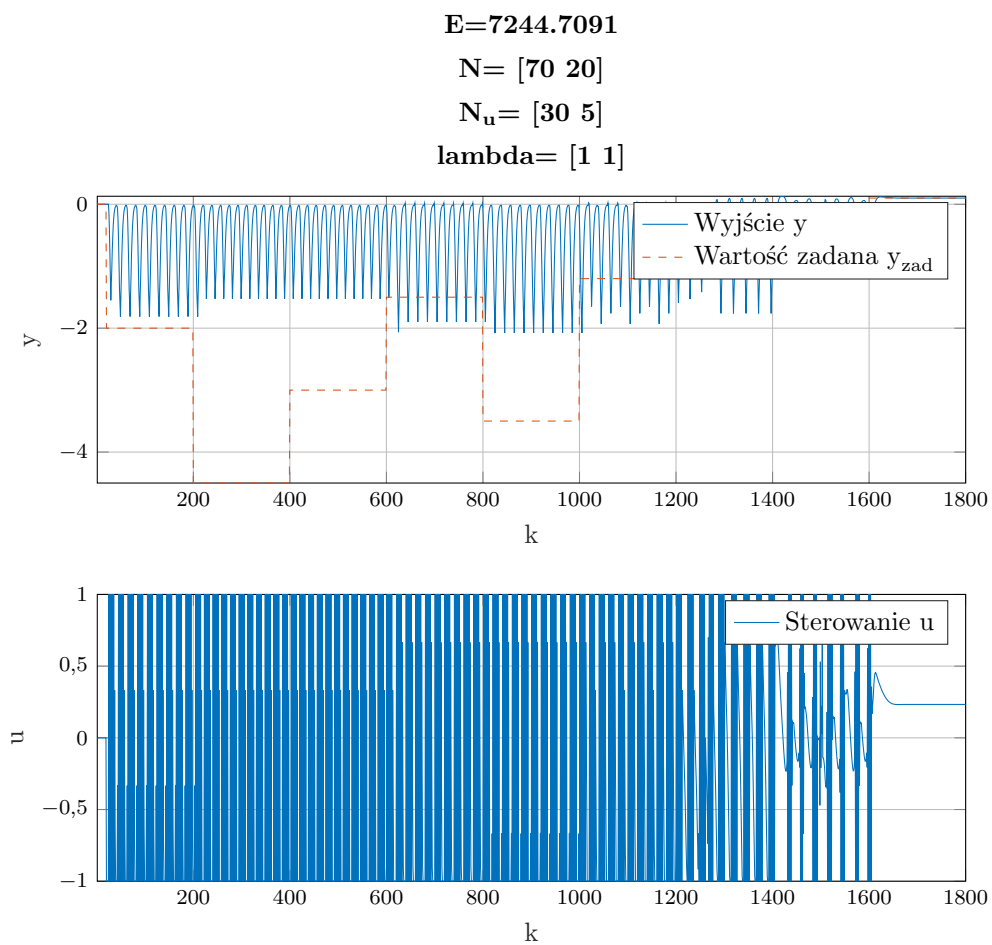
$$\mathbf{K}_r = [0.1323 \ 0.1544 \ 0.1313 \ 0.164 \ 0.2128]$$

$$\mathbf{T}_d = [0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]$$

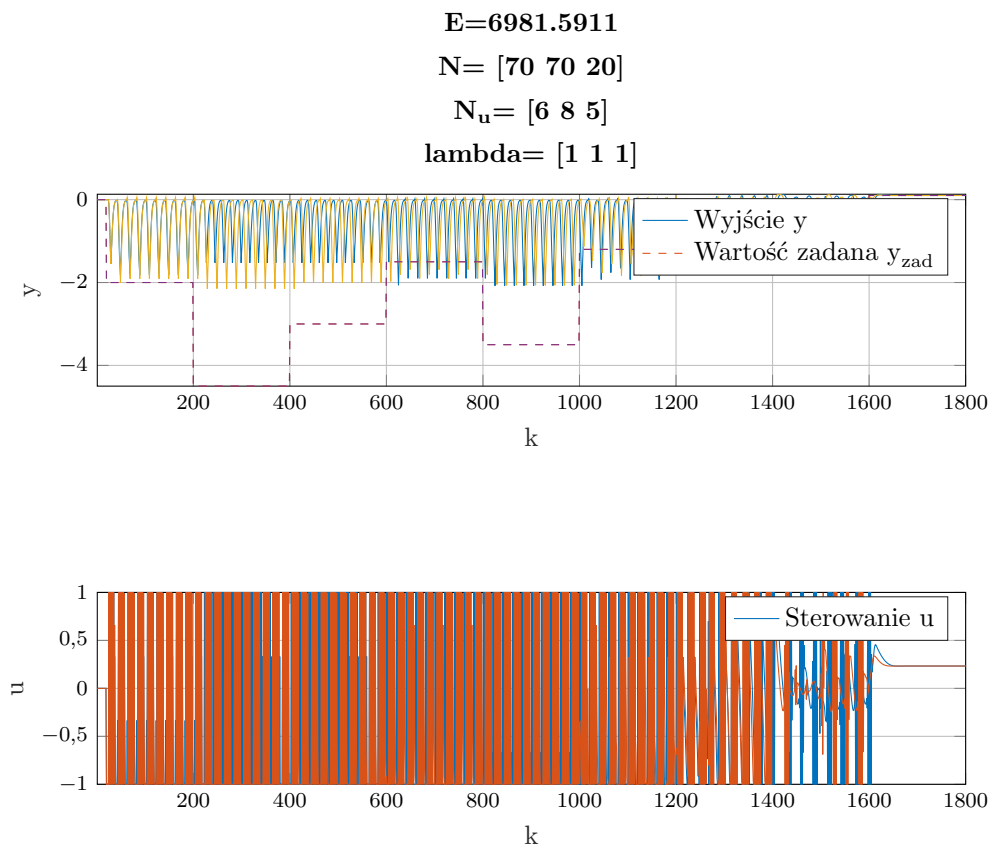
$$\mathbf{T}_i = [3.626 \ 1.587 \ 1.016 \ 1 \ 1]$$



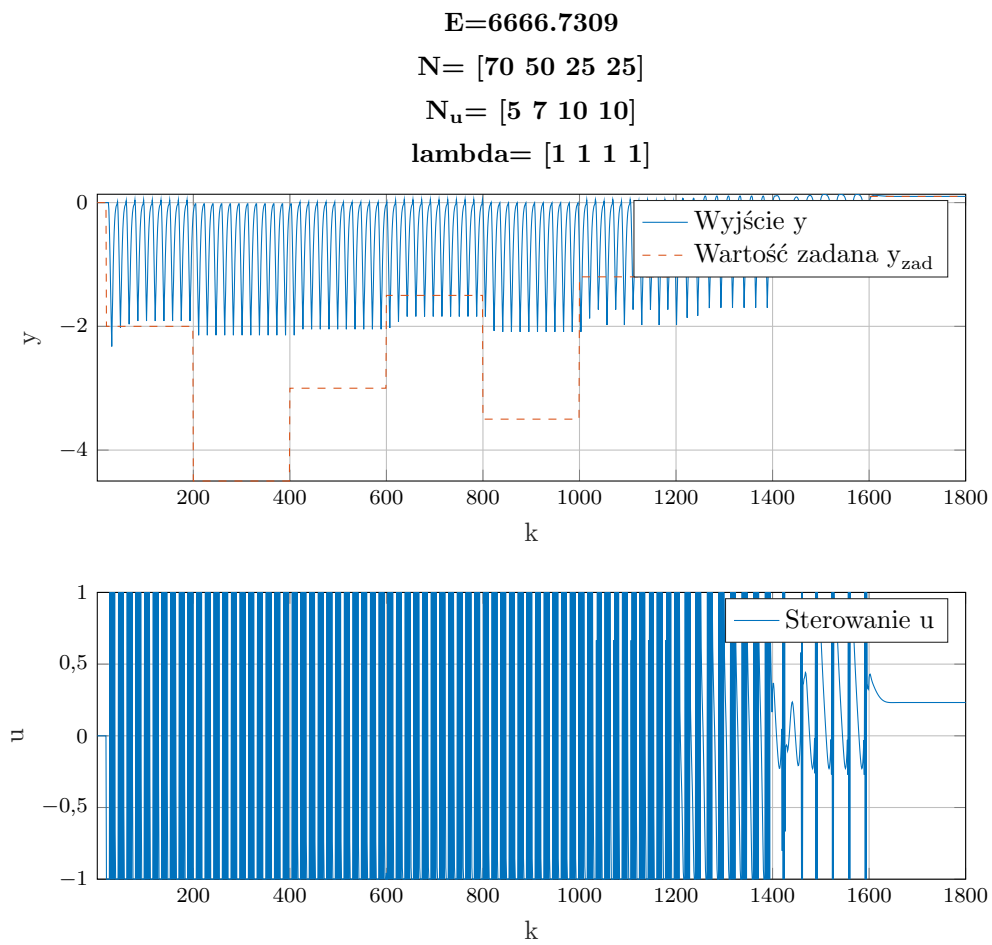
Rys. 1.15. Pięć regulatorów lokalnych PID

**1.6.2. Rozmyty regulator DMC - ustalona lambda**

Rys. 1.16. Dwa regulatory lokalne DMC

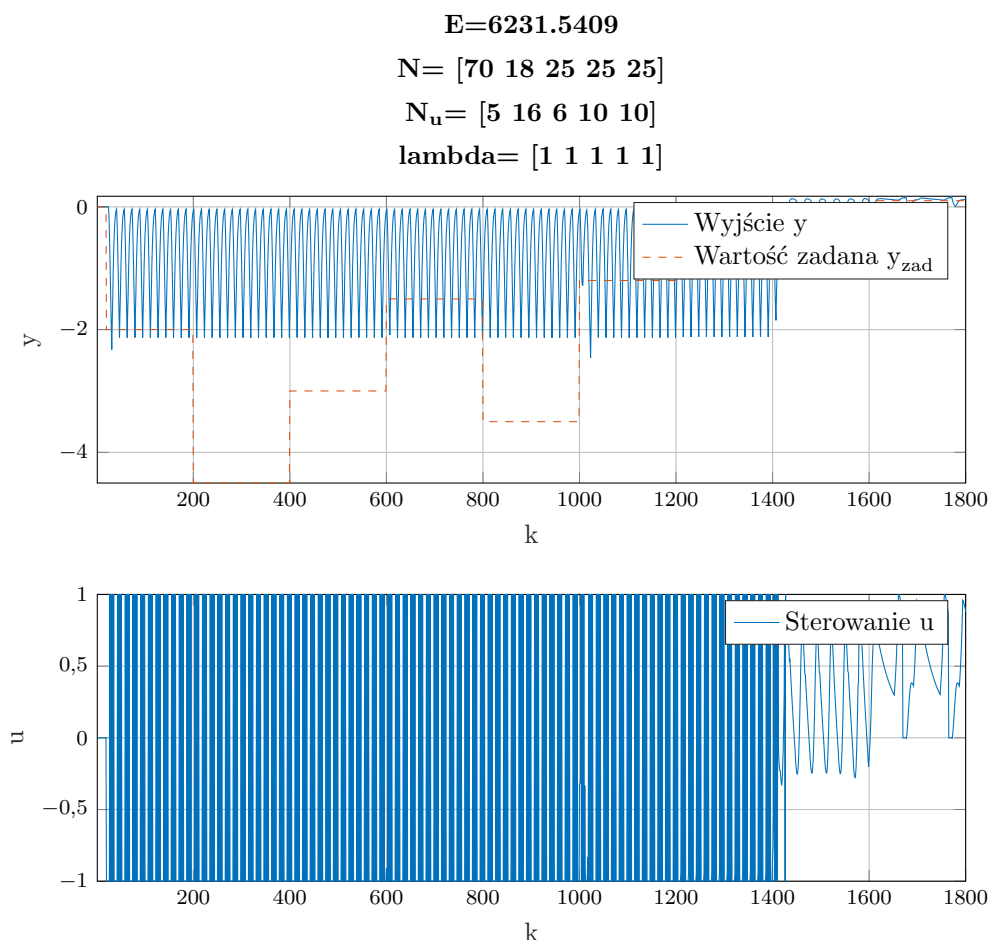


Rys. 1.17. Trzy regulatory lokalne DMC



Rys. 1.18. Cztery regulatory lokalne DMC





Rys. 1.19. Pięć regulatorów lokalnych DMC

### 1.6.3. Wnioski

Wykorzystanie rozmytego algorytmu regulacji dla obu regulatorów daje lepsze wyniki jakości regulacji w stosunku do pojedynczego regulatora liniowego.

W przypadku regulatorów PID najlepszy okazał się regulator rozmyty składający się z 3 regulatorów lokalnych.

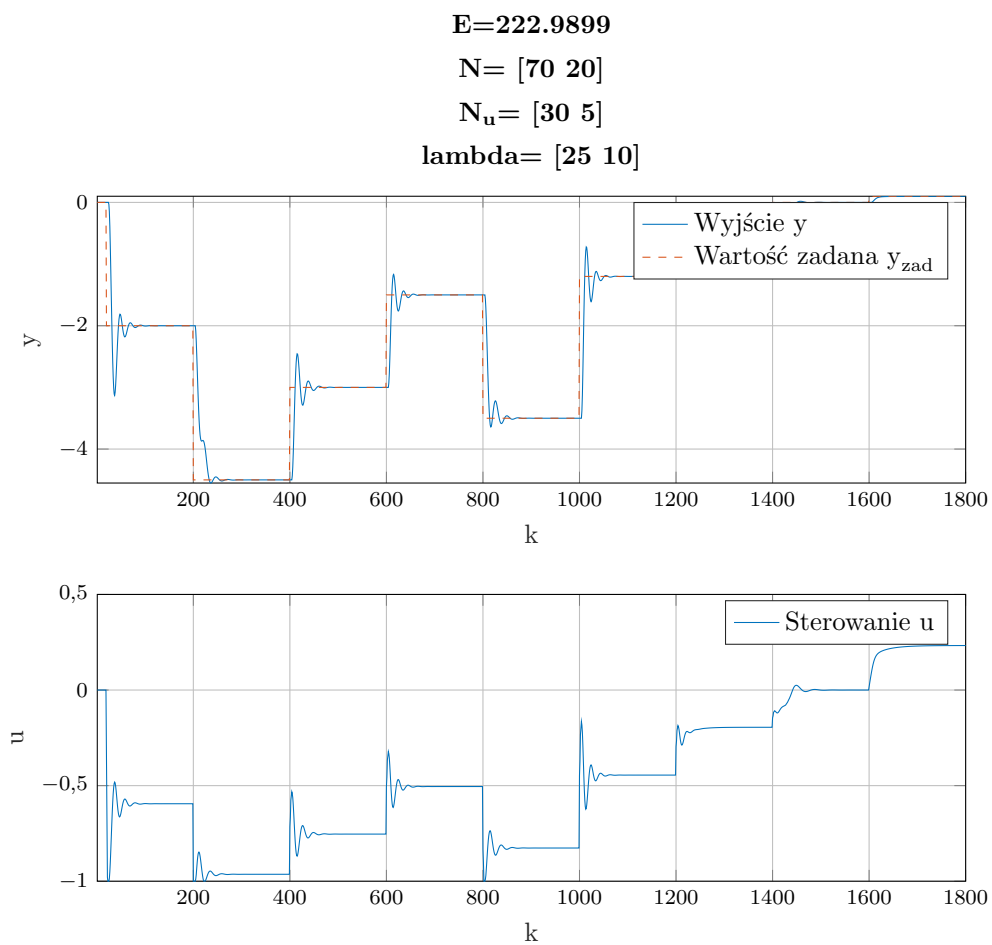
Wynika z tego, że większa ilość regulatorów lokalnych nie gwarantuje lepszej jakości regulacji.

W przypadku regulatorów DMC najlepszy okazał się regulator rozmyty składający się z 5 regulatorów lokalnych.

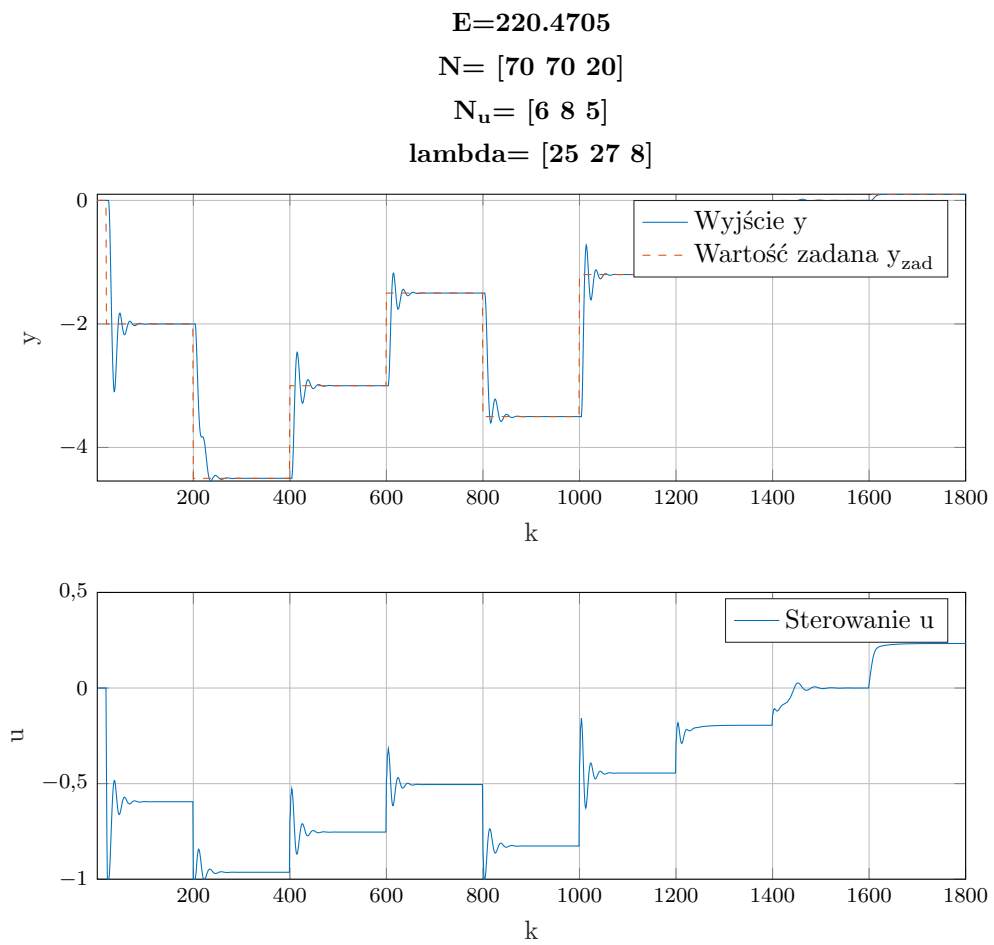
W porównaniu do regulatora PID wypadł bardzo słabo, problemem jest parametr współczynnika kary  $\lambda$ , który został ustawiony na 1 dla każdego z regulatorów lokalnych.

## 1.7. Dobór parametrów lambda lokalnych regulatorów DMC

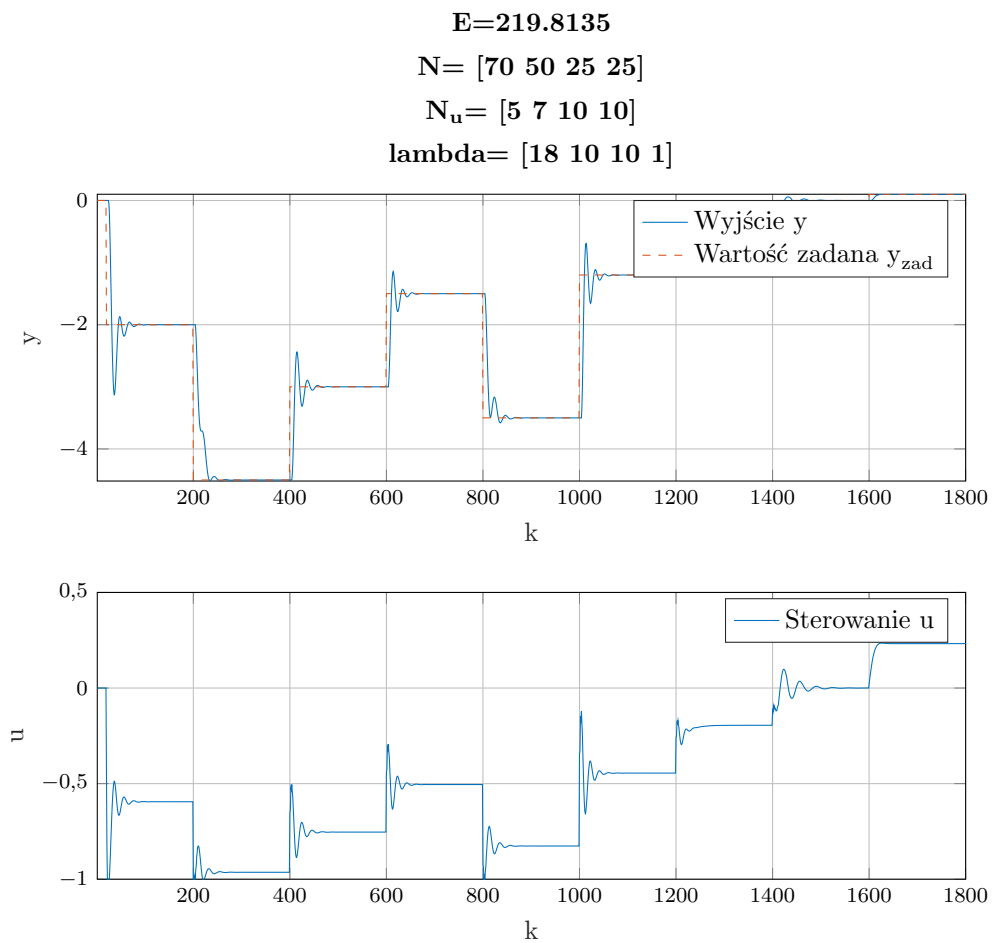
### 1.7.1. Rozmyty regulator DMC



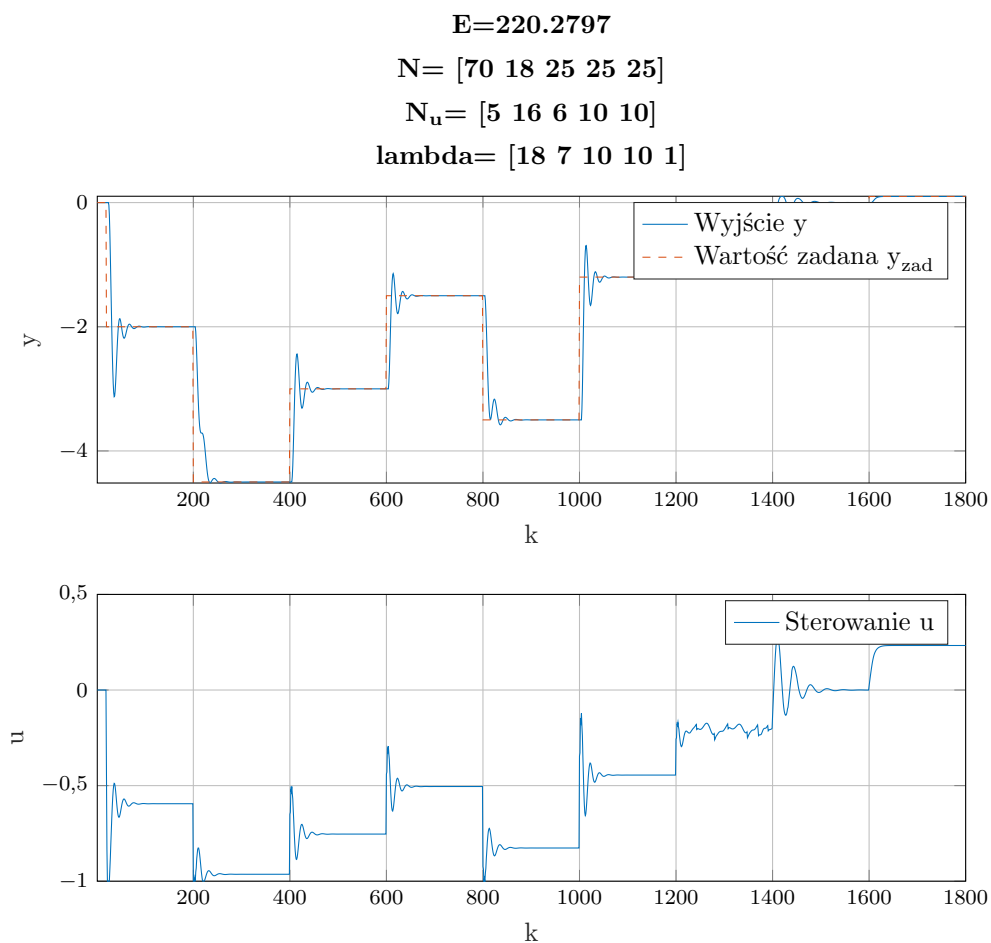
Rys. 1.20. Dwa regulatory lokalne DMC



Rys. 1.21. Trzy regulatory lokalne DMC



Rys. 1.22. Cztery regulatory lokalne DMC



Rys. 1.23. Pięć regulatorów lokalnych DMC

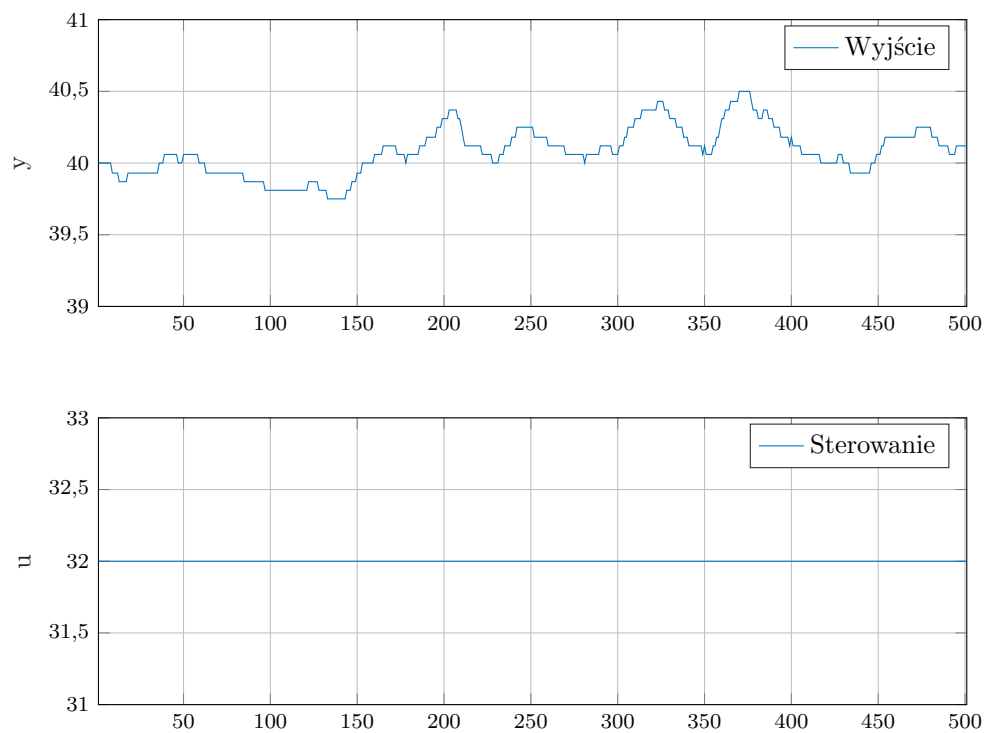
### 1.7.2. Wnioski

Ostatnim krokiem w dostrajaniu regulatora rozmytego było wyznaczenie współczynnika kary  $\lambda$  dla wszystkich regulatorów lokalnych, za pomocą którego można zapewnić kompromis pomiędzy szybkością regulacji a postacią sygnału sterującego. Ponownie był on wyznaczany metodą testowania. Spośród wszystkich regulatorów najlepszym względem współczynnika jakości regulacji okazał się być rozmyty regulator DMC o 4 regulatorach lokalnych oraz nastawach:

## 2. Laboratorium

### 2.1. Poprawność podanego punktu pracy

Sprawdzono możliwość sterowania i komunikacji ze stanowiskiem.



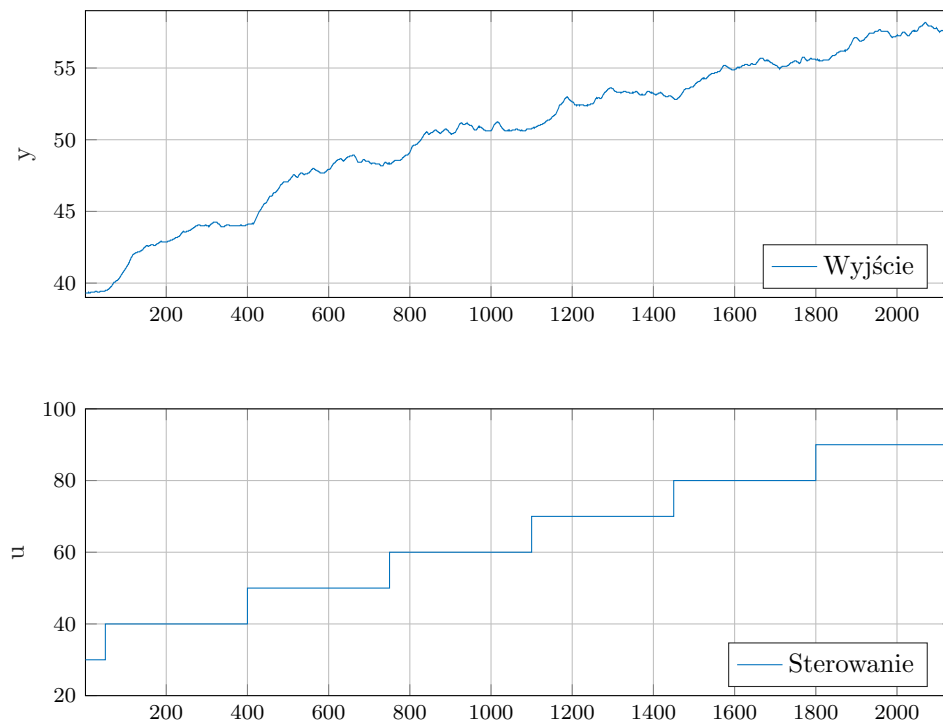
Rys. 2.1. Punkt pracy obiektu

Ustalona wartość wyjścia obiektu wynosi średnio  $T1 = 40,1^{\circ}C$ .

## 2.2. Eksperymentalne wyznaczenie odpowiedzi skokowych

Przeprowadzono eksperyment mający na celu określenie wzmocnienia sterowania. Ustawiono kolejno wartości sterowania równe: 20, 30, 40, ..., 80, 90, a następnie pozyskano wartości ustabilizowanego sygnału wyjściowego.

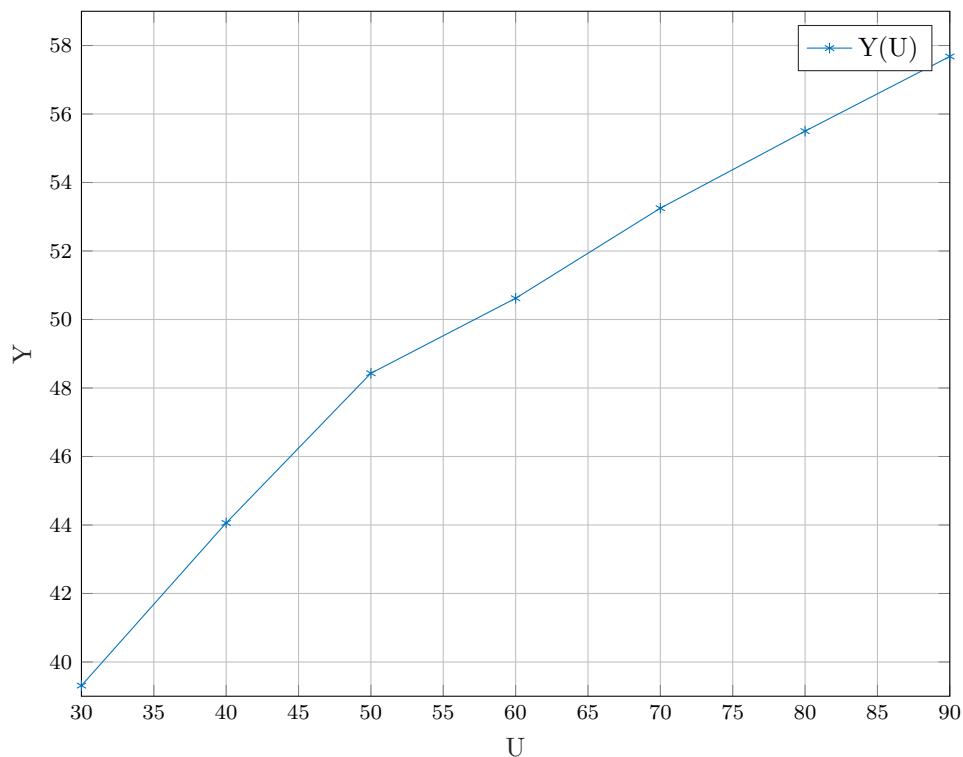
### 2.2.1. Odpowiedzi skokowe



Rys. 2.2. Przebieg serii skoków sterowania

### 2.2.2. Charakterystyka statyczna

Na podstawie przebiegów uzyskano charakterystykę statyczną oraz dokonano jej aproksymacji



Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna obiektu

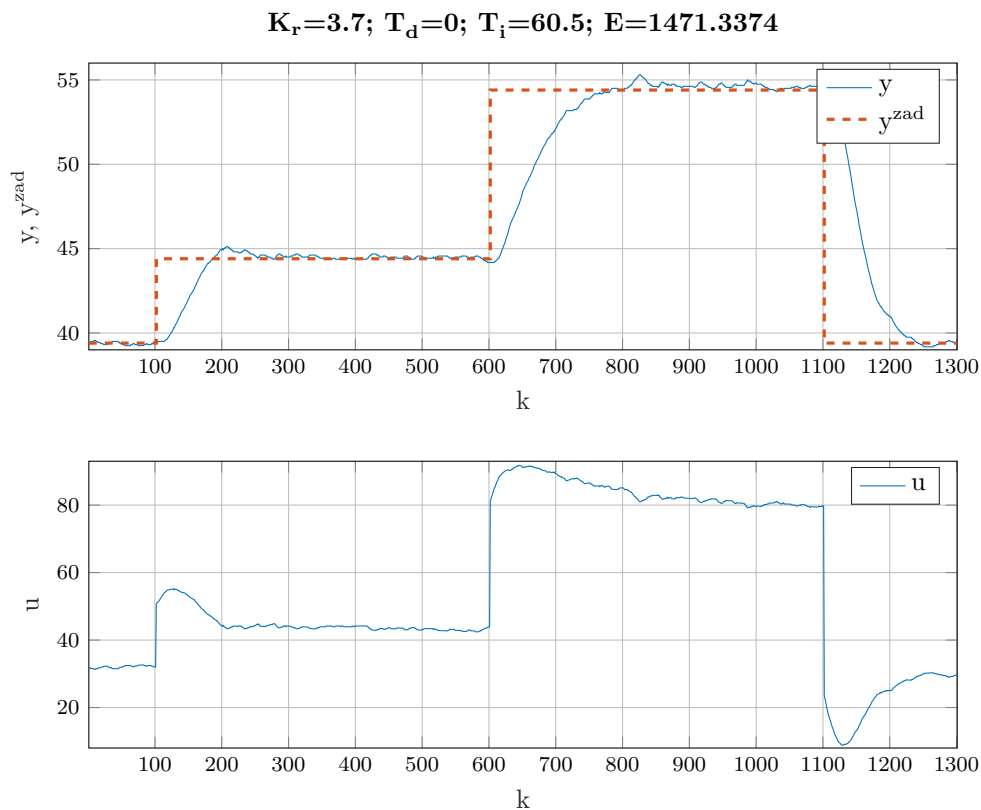
Charakterystyka statyczna pokazuje, że właściwości statyczne obiektu nie są liniowe, wartości sygnału wyjściowego w zależności od sygnału wejściowego nie zachowują się liniowo.



## 2.3. Testy klasycznych regulatorów PID i DMC

Regulatory PID oraz DMC opracowane na laboratorium 1 dla obiektu liniowego zostały przetestowane dla obiektu nieliniowego. Ustawiono trajektorię zmian sygnałów zadanych  $T = 39.4, 44.4, 54.439.4$

### 2.3.1. Klasyczny algorytm PID

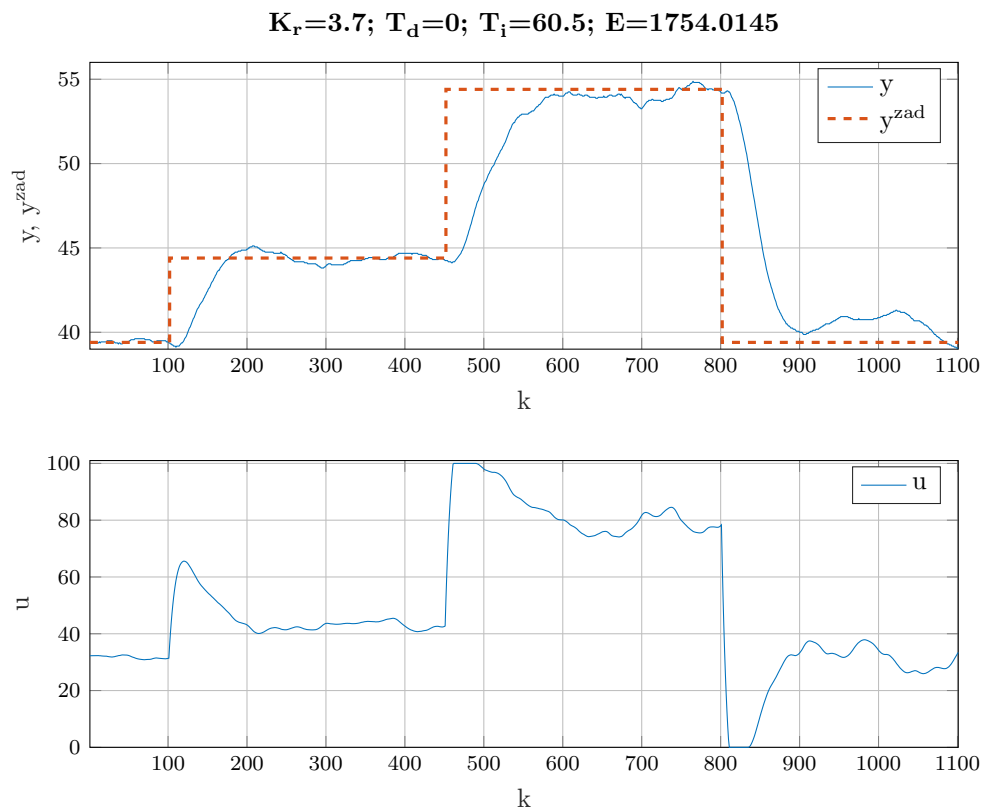


Rys. 2.4. Test klasycznego regulatora PID

Znormalizowana wartość wskaźnika jakości regulacji  $E$  wyniosła 1,4713

Jakość regulacji jest niska, powodem jest nieliniowość obiektu, jeden klasyczny regulator PID niewykorzystujący rozmycia daje bardzo słabe wyniki, ponieważ jego parametry dostosowane są do obiektu liniowego.

### 2.3.2. Klasyczny algorytm DMC



Rys. 2.5. Test klasycznego regulatora DMC

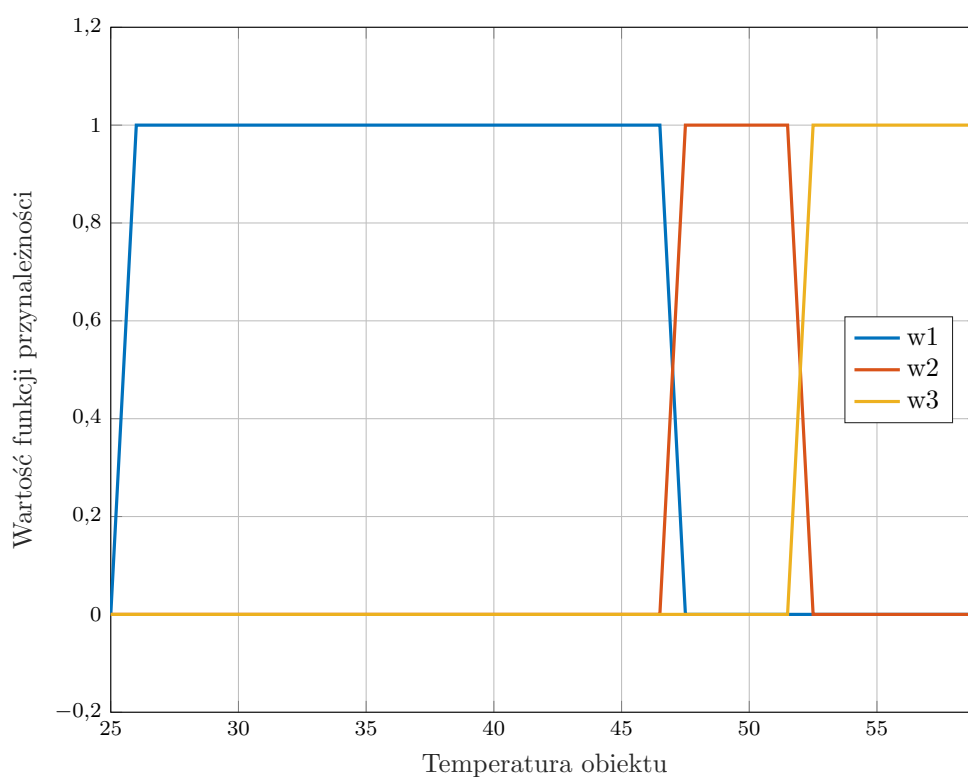
Znormalizowana wartość wskaźnika jakości regulacji  $E$  wyniosła 1,7540

Jakość regulacji jest niska analogicznie do regulatora PID, powodem jest nieliniowość obiektu, jeden klasyczny regulator DMC niewykorzystujący rozmycia daje bardzo słabe wyniki, ponieważ jego parametry dostosowane są do obiektu liniowego.

## 2.4. Testy rozmytych regulatorów PID

### 2.4.1. Funkcje przynależności

Poprzez zastosowanie wielu lokalnych regulatorów dla poszczególnych punktów pracy zaimplementowano rozmyty algorytm PID. Wybór regulatora dokonywany jest dzięki funkcji przynależności. Jako funkcja przynależności posłużyła nam funkcja trapezoidalna. Funkcja ta zawiera współczynniki, które definiują jak duży wpływ na dane wyjście ma dany regulator w badanym obszarze. Dobór tych współczynników został przeprowadzony poprzez obserwację zachowania obiektu. Dla każdego z lokalnych regulatorów PID należało dobrać parametry osobno w jego punkcie pracy, w tym celu została opracowana funkcja optymalizująca je, wykorzystano do niej wbudowaną funkcję programu MATLAB `fmincon`. Ostatecznie regulatory zostały połączone w funkcji. Dzięki wykorzystaniu rozmytego algorytmu PID możemy zniwelować problem nieliniowości obiektu.



Rys. 2.6. Funkcje rozmycia

## 2.4.2. Implementacja rozmytego algorytmu PID

Listing 2.1. "Wyznaczanie nastaw rozmytych regulatorów PID"

```
% regulacja z uzyciem regulatora PID fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'PID_fuzzy') )
    %nastawy regulatorow PID
    Kr = [ 4.2  6.5      8.35]; % P
    Ti = [ 67.8 83.7     90.4]; % I
    Td = [ 0.0  0.0      0.3 ]; % D

    fuzzyN = length(Kr);
    settings(fuzzyN).N = fuzzyN;
    for n=1:fuzzyN
        settings(n).Tp = Tp;
        settings(n).r0 = Kr(n)*(1+Tp/(2*Ti(n))+Td(n)/Tp);
        settings(n).r1 = Kr(n)*(Tp/(2*Ti(n))-2*Td(n)/Tp-1);
        settings(n).r2 = Kr(n)*Td(n)/Tp;
        settings(n).u1 = G1;
    end
end
```

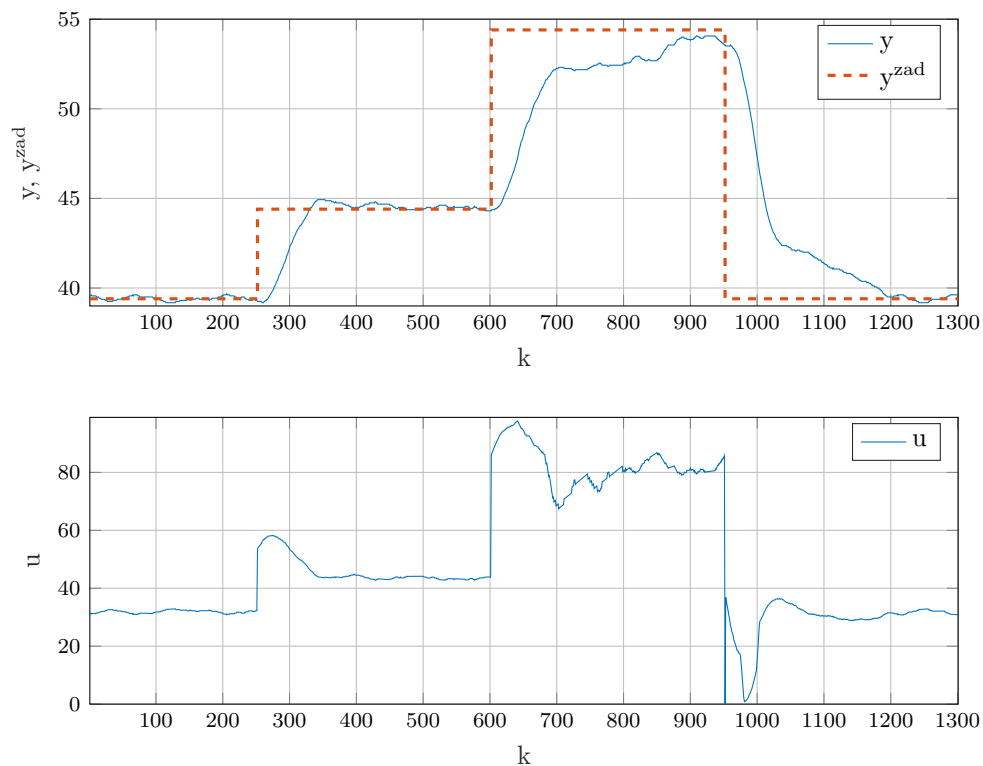
Listing 2.2. "Wyznaczenie wartości sterowania u"

```
% regulacja z uzyciem regulatora PID fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'PID_fuzzy') )
    u_ = zeros(1, fuzzyN);
    for n=1:fuzzyN
        %wyznaczenie nowej wartosci sterowania od regulatora
        u_(n) = getPIDcontrol(settings(n), e(k), e(k-1), e(k-2), settings(n).u1);
        %nalozenie ograniczen sterowania
        if( u_(n)>umax )
            u_(n) = umax;
        elseif( u_(n)<umin )
            u_(n) = umin;
        end
        %regulator moze uzyc poprzedniej wartosci sterowania
        settings(n).u1 = u_(n);

        %funkcja wagi regulatora
        w = [];
        if( isequal(mode, 'real') )
            w = fun_przyn_lab(y(k));
            w = w(n);
        else

        end
        w
        u_(n) = u_(n) * w;
    end
    u_
    % wyznaczenie sterowania rozmytego
    u(k) = sum(u_);
```

### 2.4.3. Dobór parametrów lokalnych regulatorów PID



Rys. 2.7. Testy rozmytych regulatorów PID

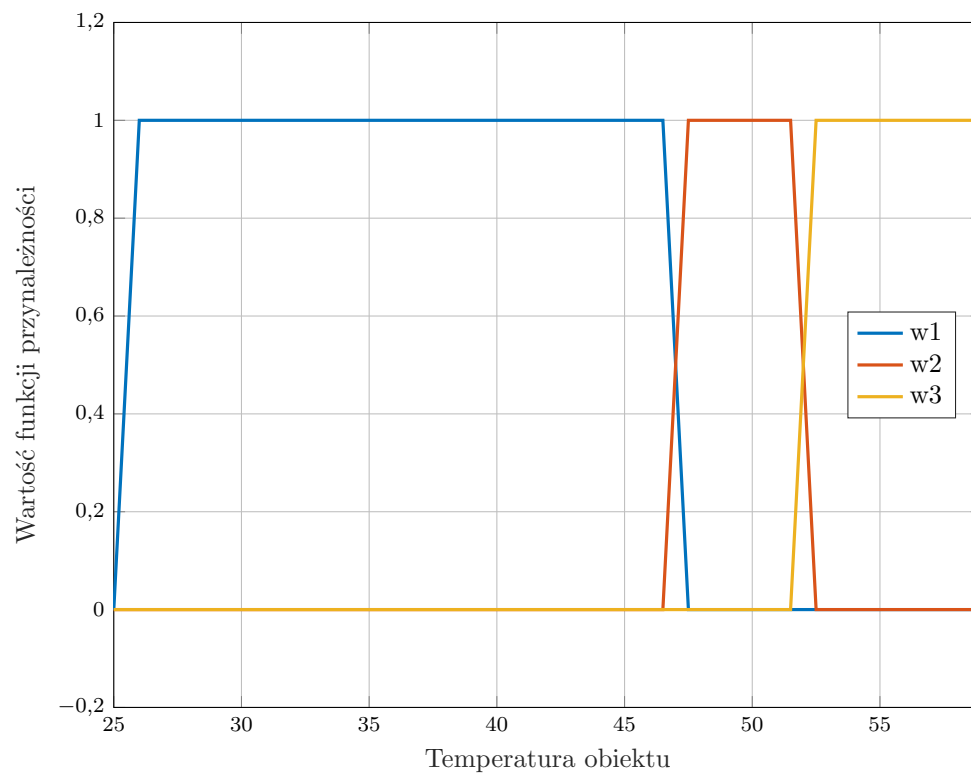
Znormalizowana wartość wskaźnika jakości regulacji  $E$  wyniosła 1,7845

### 2.4.4. Wyniki eksperymentów

Dobrze dobrana funkcja przynależności i dobrze nastrojone regulatory lokalne dadzą znacznie lepszą jakość regulacji niż jeden klasyczny regulator bez rozmycia.

## 2.5. Testy rozmytych regulatorów DMC

### 2.5.1. Funkcje przynależności



Rys. 2.8. Funkcje rozmycia

## 2.5.2. Implementacja rozmytego algorytmu DMC

Listing 2.3. "Wyznaczanie nastaw rozmytych regulatorów DMC"

```
% regulacja z użyciem regulatora DMC fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'DMC_fuzzy') )
    fuzzyN = 3;
    %nastawy regulatora DMC
    N=200;
    Nu=10;

    lambdaVect = [1 1 1];
    for n=1:length(lambdaVect)
        lambda = lambdaVect(n);
        %wczytanie wektora s danego regulatora lokalnego
        load(strcat('s',num2str(n),'.mat'));
        D = length(s); % horyzont dynamiki

    N = D;
    Nu = N;
        run('DMC_init.m');

        settings(n).lambda = lambda;
        settings(n).N = N;
        settings(n).Nu = Nu;
        settings(n).D = D;
        settings(n).Mp = Mp;
        settings(n).K = K;
        settings(n).deltaUp = deltaUp;
    settings(n).u1 = G1;
end
```

Listing 2.4. "Wyznaczenie wartości sterowania u"

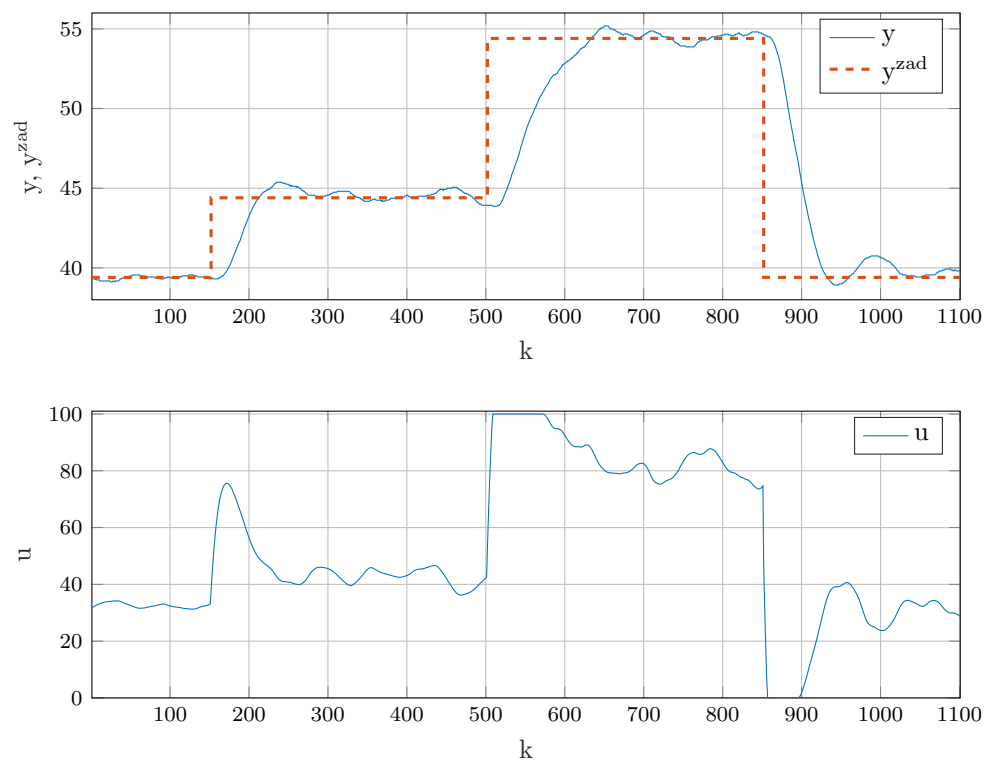
```
% regulacja z użyciem regulatora DMC fuzzy
elseif( isequal(regulator, 'DMC_fuzzy') )
    u_ = zeros(1, fuzzyN);
    for n=1:fuzzyN
        %wyznaczenie nowej wartosci sterowania od regulatora
        u_(n) = getDMCcontrol(settings(1), y, k, yzad);
        %nałożenie ograniczen sterowania
        if( u_(n)>umax )
            u_(n) = umax;
        elseif( u_(n)<umin )
            u_(n) = umin;
        end
        %regulator moze uzyc poprzedniej wartosci sterowania

        settings(n).deltaUp(k) = u_(n)-settings(n).u1;
        settings(n).u1 = u_(n);

        %funkcja wagi regulatora
        w = [];
        if( isequal(mode, 'real') )
            w = fun_przyn_lab(y(k));
            w = w(n);
        else

        end
        u_(n) = u_(n) * w
    end
    % wyznaczenie sterowania rozmytego
    u(k) = sum(u_);
```

### 2.5.3. Wyniki eksperymentów



Rys. 2.9. Testy rozmytych regulatorów DMC

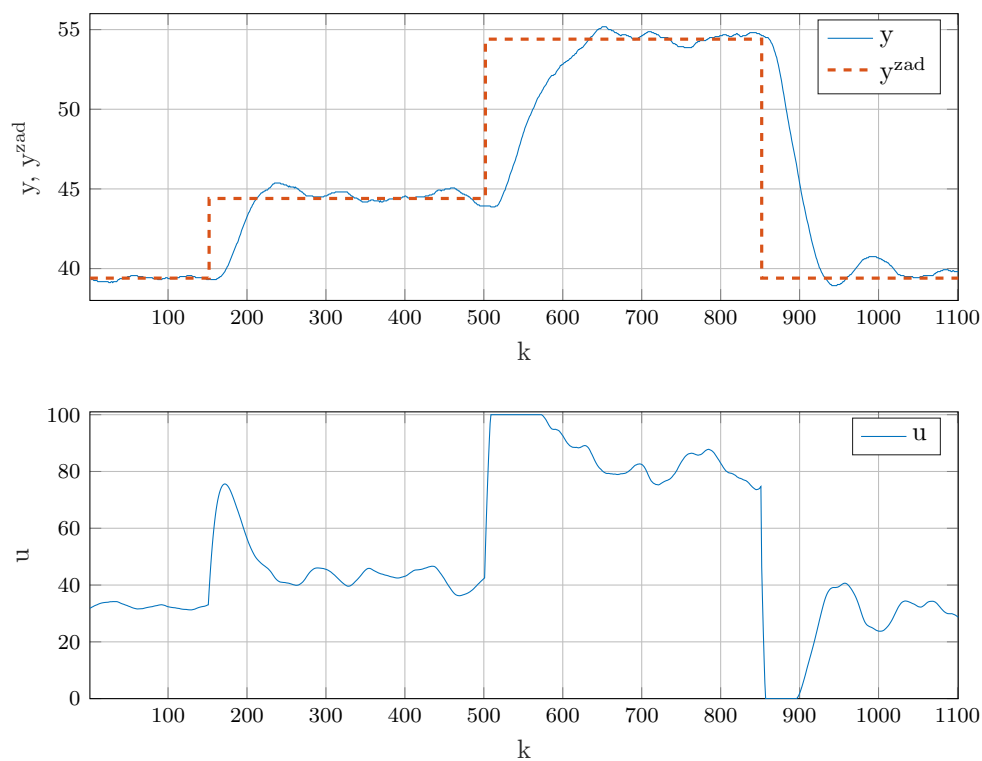
Znormalizowana wartość wskaźnika jakości regulacji  $E$  wyniosła 1,5830



## 2.6. Dobór parametrów lambda lokalnych regulatorów DMC

Złożoność rozmycia algorytmów DMC znacząco utrudnia intuicyjne dobieranie nastaw regulatorów. Metoda polega na wielu próbach osiągnięcia lepszego wyniku co w przypadku rzeczywistego obiektu o stosunkowo dużej inercji jest wyjątkowo czasochłonne.

### 2.6.1. Wyniki eksperymentów



Rys. 2.10. Testy rozmytych regulatorów DMC

Znormalizowana wartość wskaźnika jakości regulacji  $E$  wyniosła 1,5830

Wyznaczone wartości  $\lambda = 1$