

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów w sterowania
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego
nr 3, zadanie nr 1

Zespół Z01

Hubert Kozubek, Przemysław Michalczewski

Warszawa, 2021

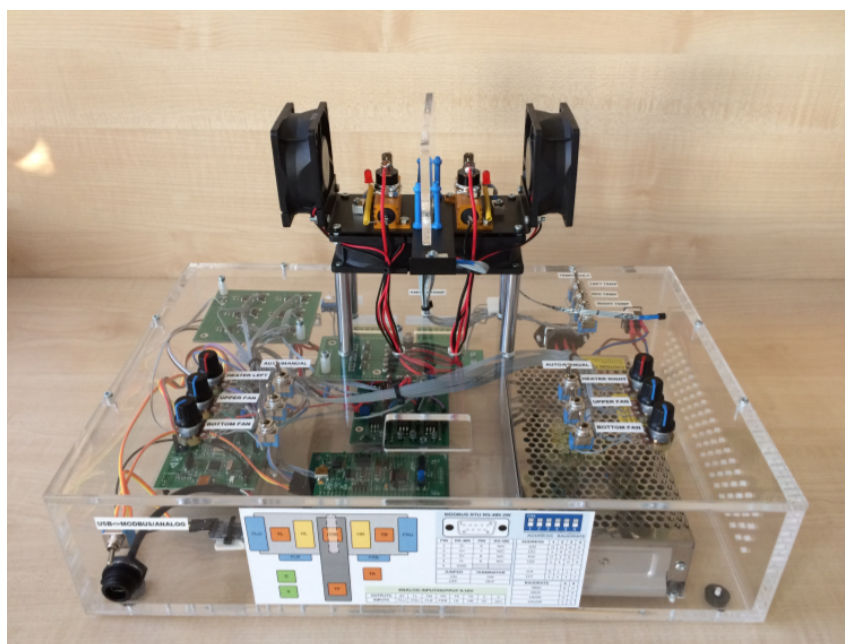
Spis treści

1. Laboratorium	2
1. Cel laboratorium	2
2. Przebieg laboratorium	2
3. Punkt pracy stanowiska	3
4. Wzmocnienie w funkcji sterowania	3
5. Regulatory dla obiektu liniowego	4
6. Rozmyty PID	5
7. Rozmyty DMC	5
8. Dobór parametrów λ	7
2. Projekt	10
1. Informacje wstępne	10
2. Sprawdzenie poprawności punktu pracy	10
3. Odpowiedzi skokowe procesu	10
4. Regulatory cyfrowe	12
5. Regulatory rozmyte	21
6. Liczba regulatorów lokalnych	26
7. Dobór parametrów λ regulatorów lokalnych	28

1. Laboratorium

1. Cel laboratorium

Celem niniejszego laboratorium była implementacja, weryfikacja poprawności działania i dobór parametrów algorytmów regulacji jednowymiarowego nieliniowego procesu laboratoryjnego dla stanowiska grzejąco-chłodzącego przedstawionego na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Stanowisko grzejąco-chłodzące używane w trakcie laboratoriów.

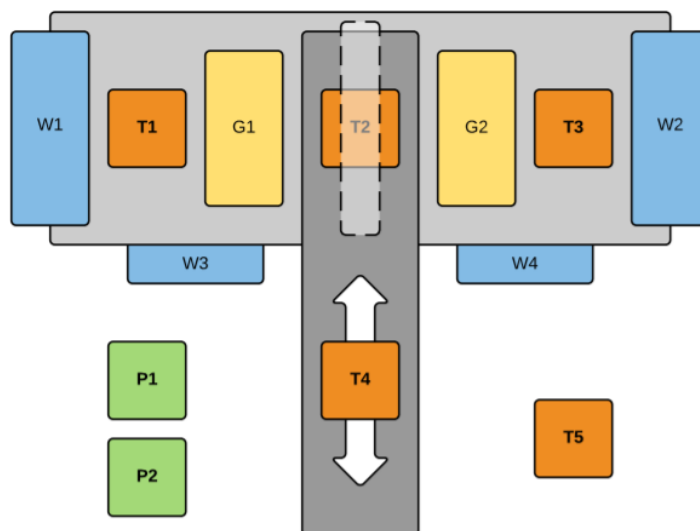
2. Przebieg laboratorium

Rozpoczynając pracę na stanowisku grzejąco-chłodzącym sprawdzono możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem. W szczególności sygnały sterujące wykorzystywane podczas niniejszego laboratorium W1, G1, Z oraz pomiaru T1 (elementy wykonawcze przedstawiono na rys. 1.2). Przez cały czas trwania laboratorium moc wentylatora W1 była ustawiona na 50%, a wentylator był traktowany jako cecha otoczenia. Dodatkowo sprawiał on, że temperatura grzałki opadała szybciej, co było szczególnie przydatne pomiędzy doświadczeniami.

W ramach laboratorium należało wykonać 6 zadań:

1. Odczytać wartość pomiaru temperatury dla termometru T1 dla mocy 26% grzałki G1 w stanie ustalonym (wyznaczyć punkt pracy).
2. Przeprowadzić eksperyment mający na celu określenie wzmocnienie w funkcji sterowania: dla kolejnych wartości sterowania: 20, 30, ..., 80 pozyskać wartość ustabilizowanego sygnału wyjściowego i na ich podstawie narysować punkty tworzące charakterystykę statyczną.
3. Dla trajektorii zmian sygnałów zadanych: T_{pp} , $T_{pp} + 5$, $T_{pp} + 15$, T_{pp} przetestować regulatory z laboratorium 1.

4. Zaimplementować rozmyty algorytm PID i dla tej samej trajektorii zmian sygnału wartości zadanej spróbować dobrać parametry lokalnych algorytmów PID w taki sposób, aby osiągnąć lepszą jakość regulacji w porównaniu z regulatorem pojedynczym.
5. Zaimplementować rozmyty algorytm DMC w najprostszej wersji analitycznej, o parametrach $N_u = N = D$ i $\lambda = 1$ i dla powyższej trajektorii zmian sygnału wartości zadanej wykonać eksperymenty dla 3 regulatorów lokalnych.
6. Dobrać parametry określające karę za przyrosty sterowania lokalnych algorytmów DMC metodą eksperymentalną.



Rys. 1.2. Schemat stanowiska grzejąco-chłodzącego; zaznaczone elementy wykonawcze: wentylatory W1, W2, W3, W4, grzałki G1, G2, czujniki temperatury T1, T2, T3, T4, T5 (temperatura otoczenia), pomiar prądu P1, pomiar napięcia P2.

3. Punkt pracy stanowiska

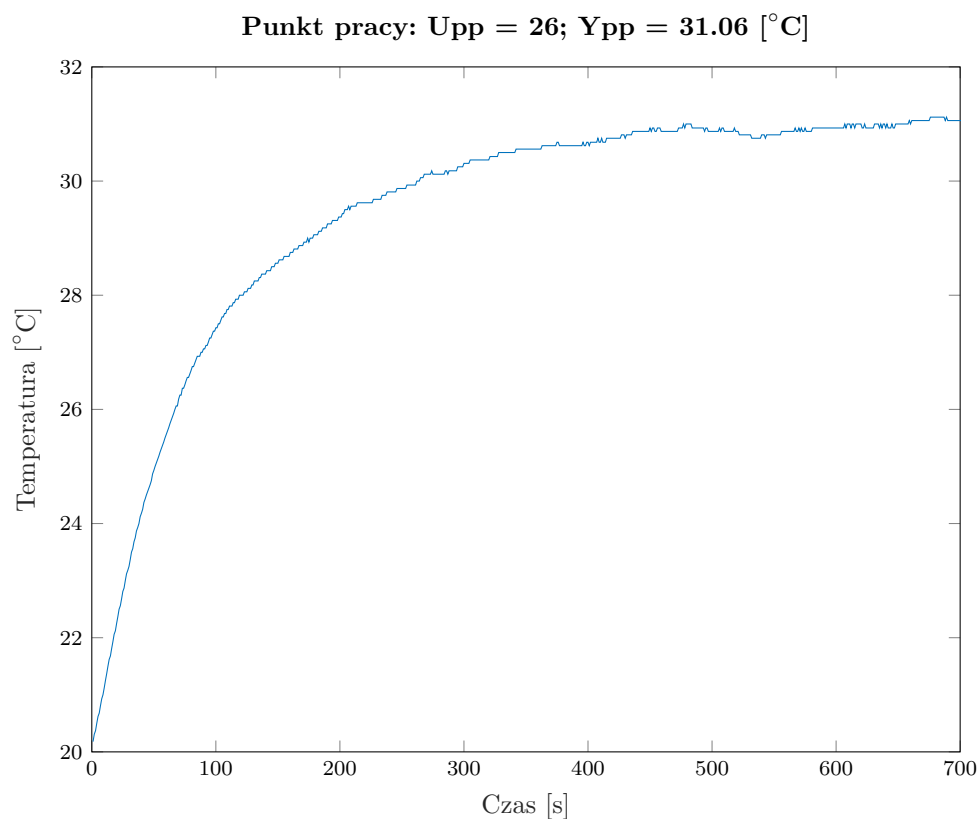
W celu wyznaczenia punktu pracy stanowiska dla mocy grzałki $G1=26\%$ zadano tę wartość dla sygnału sterującego grzałką za pomocą polecenia `sendNonlinearControls(u)`. Następnie poczekano, aż temperatura T1 ustali się. Wynik eksperymentu przedstawiono na rys. 1.3. Odczytana wartość temperatury dla termometru T1 wyniosła $31,06\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Wzmocnienie w funkcji sterowania

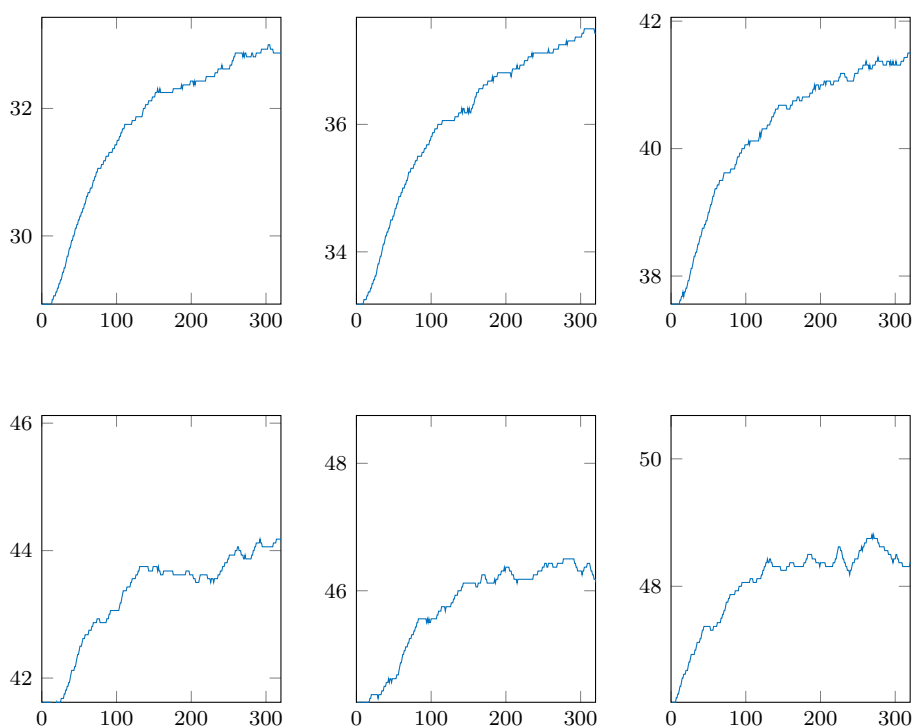
W celu wyznaczenia wzmocnienia w funkcji sterowania na stanowisku zadawano kolejne wartości sterowania, a następnie czekali aż wyjście się ustabilizuje. W taki sposób przeprowadzono 6 eksperymentów zadając kolejno wartości sterowania: 20, 30, -, 80. Wyniki eksperymentów przedstawiono na rys. 1.4

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów sporządzono wykres punktowy pokazujący charakterystykę statyczną procesu. Wykres ten jest przedstawiony na rys. 1.5

Jak widać z wykresu charakterystykę można przybliżyć do charakterystyki liniowej. Niemniej jednak widoczna jest nieliniowość, w szczególności porównując wartości dla u z przedziału (20,50) i z przedziału (50,80) Dla przybliżonej liniowo charakterystyki $K_{\text{stat}} =$



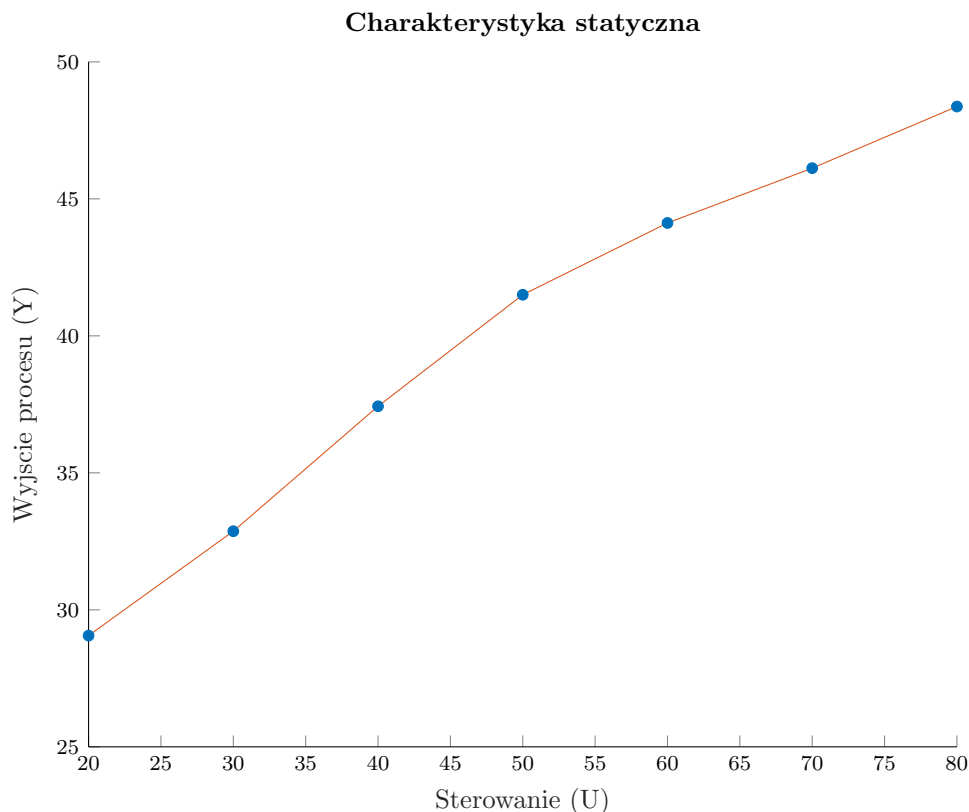
Rys. 1.3. Ustalenie się temperatury dla punktu pracy.



Rys. 1.4. Odpowiedzi stanowiska dla kolejnych wartości sterowania

5. Regulatory dla obiektu liniowego

Wykorzystując regulatory zaimplementowane na laboratorium 1. został przeprowadzony eksperyment, którego celem było sprawdzić jak regulatory przeznaczone do regulacji obiektów li-



Rys. 1.5. Charakterystyka statyczna procesu

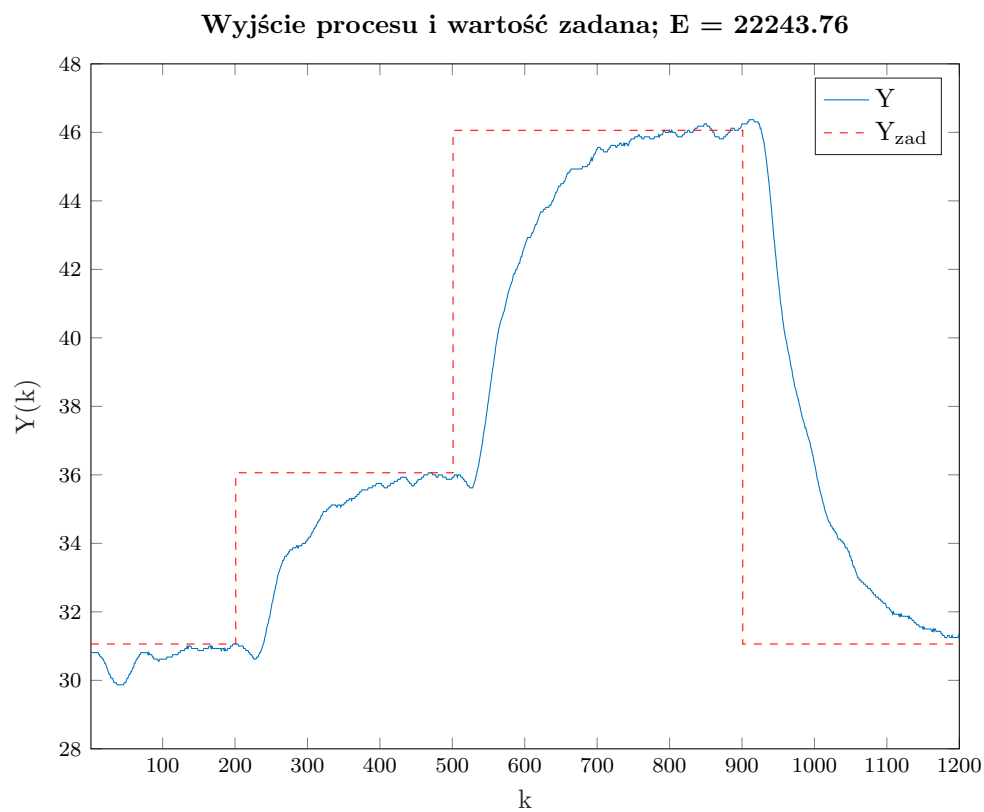
niowych poradzą sobie z obiektem nieliniowym. W tym celu jako trajektorię wartości zadanej przyjęto 3 skoki: z 31,06 do 36,06, z 36,06 do 46,06 i z 46,06 do 31,06. Następnie dla danej trajektorii uruchomiono regulator PID, a następnie powtórzono eksperyment dla regulatora DMC. Wyniki eksperymentu przedstawiono odpowiednio na rys. 1.6 - PID liniowy i rys. 1.7 - DMC liniowy.

6. Rozmyty PID

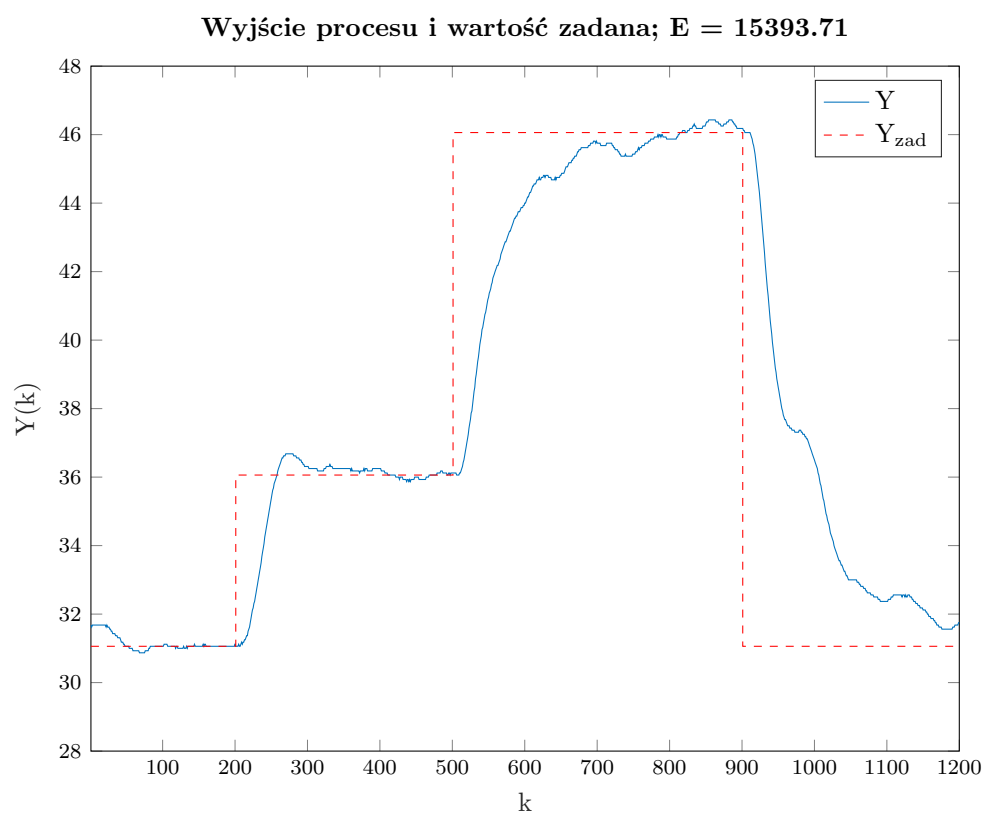
W celu lepszej regulacji obiektu nieliniowego został zaimplementowany regulator rozmyty PID. W tym celu utworzono funkcje dzwonek, które decydowały który regulator i w jakim stopniu ma wpływ na wyjście. Odpalanie się regulatorów PID zależało od aktualnej wartości wyjścia obiektu. Regulator został podzielony na 3 regulatory lokalne, każdy z nich został dostrojony metodą eksperymentalną, gdzie wartości startowe zaczerpnięto z regulatora PID z 1. laboratorium. Dzięki charakterystyce statycznej można było np. stwierdzić że regulator dla wyższych wartości wyjścia powinien mieć większy parametr proporcjonalny, niż regulator lokalny dla mniejszych wartości wyjścia, z racji że wzmocnienie statyczne rośnie wolniej dla wyższych wartości wyjścia, niż dla niższych. Działanie regulatora rozmytego przedstawiono na rys. 1.8. Funkcje przynależności zastosowane w eksperymentach pokazano na rys. 1.10.

7. Rozmyty DMC

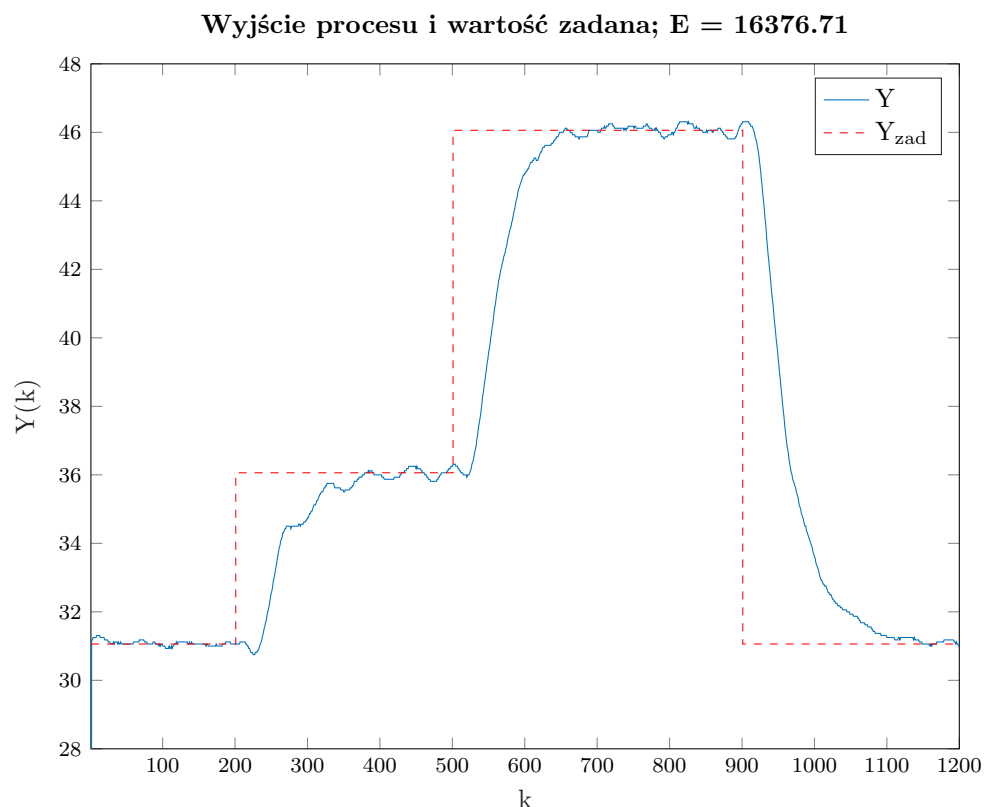
Również dla regulatora DMC skorzystano z 3 regulatorów lokalnych, także sterowanych wartościami wyjścia obiektu. Dla regulatorów lokalnych wybrano odpowiednio odpowiedź skokową dla sterowań z 20 do 30, z 40 do 50 i z 60 do 70. Dla tak przygotowanych regulatorów wybrano



Rys. 1.6. Regulator liniowy PID dla obiektu nieliniowego



Rys. 1.7. Regulator liniowy DMC dla obiektu nieliniowego

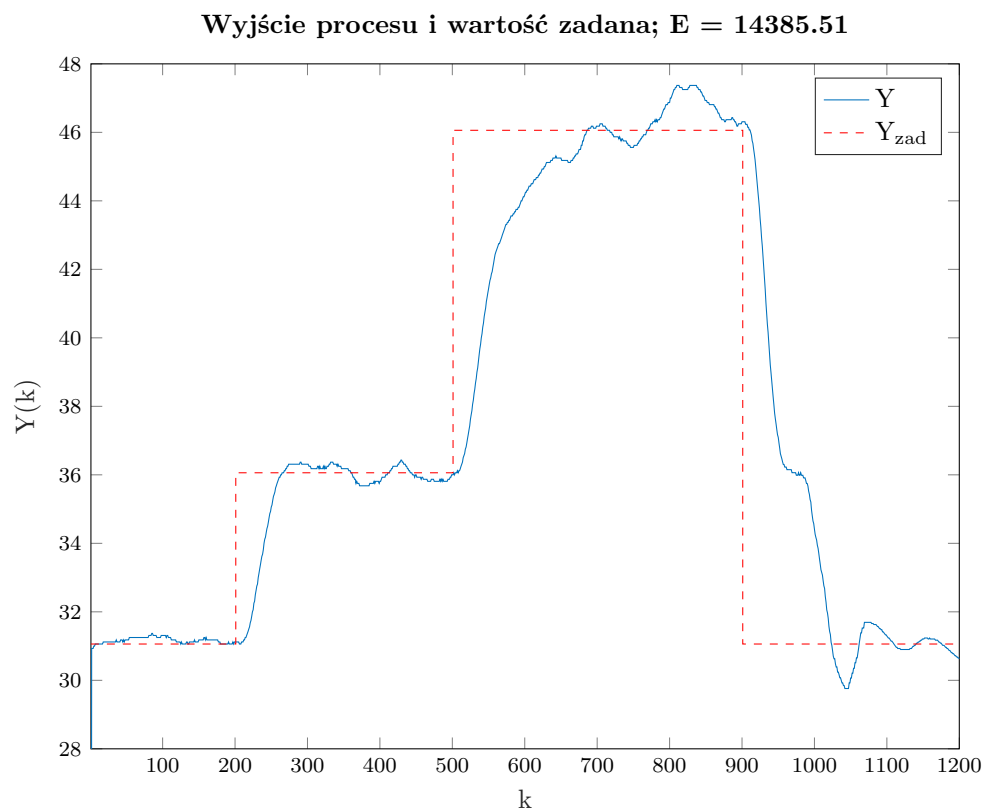


Rys. 1.8. Regulator rozmyty PID

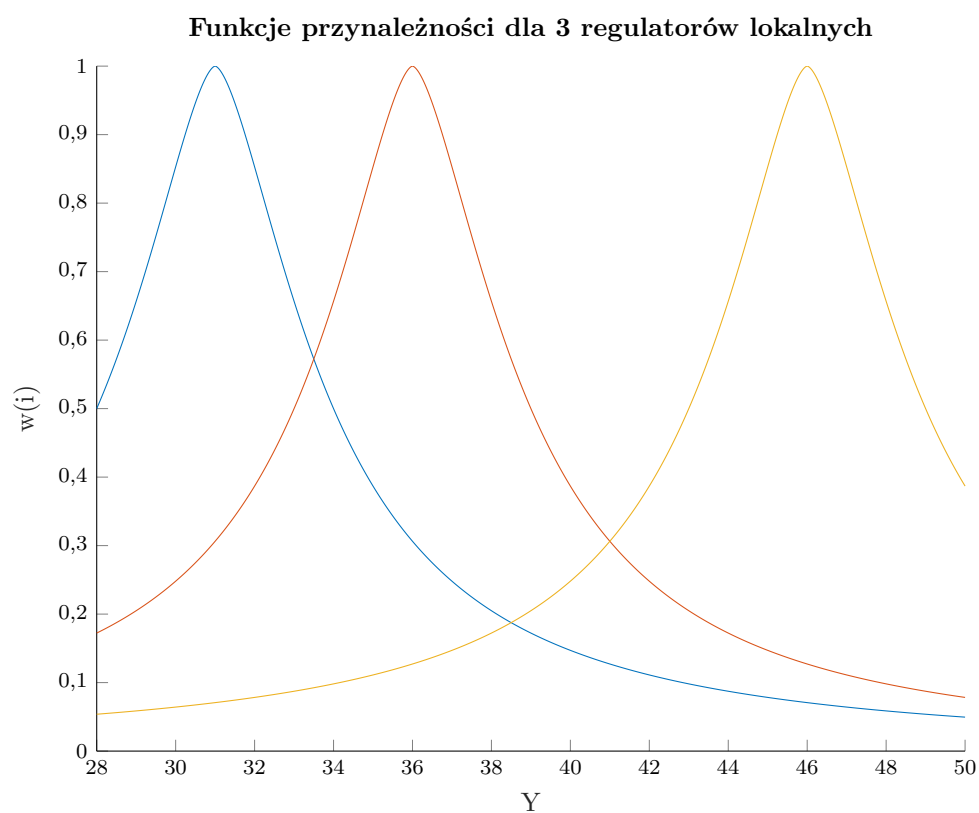
najprostsze parametry $D = N = N_u = 320$ i $\lambda = 1$. Następnie rozmyty regulator DMC został przetestowany dla tej samej trajektorii co w sekcji 5. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rys. 1.9. Funkcje przynależności zastosowane w eksperymentach pokazano na rys. 1.10.

8. Dobór parametrów λ

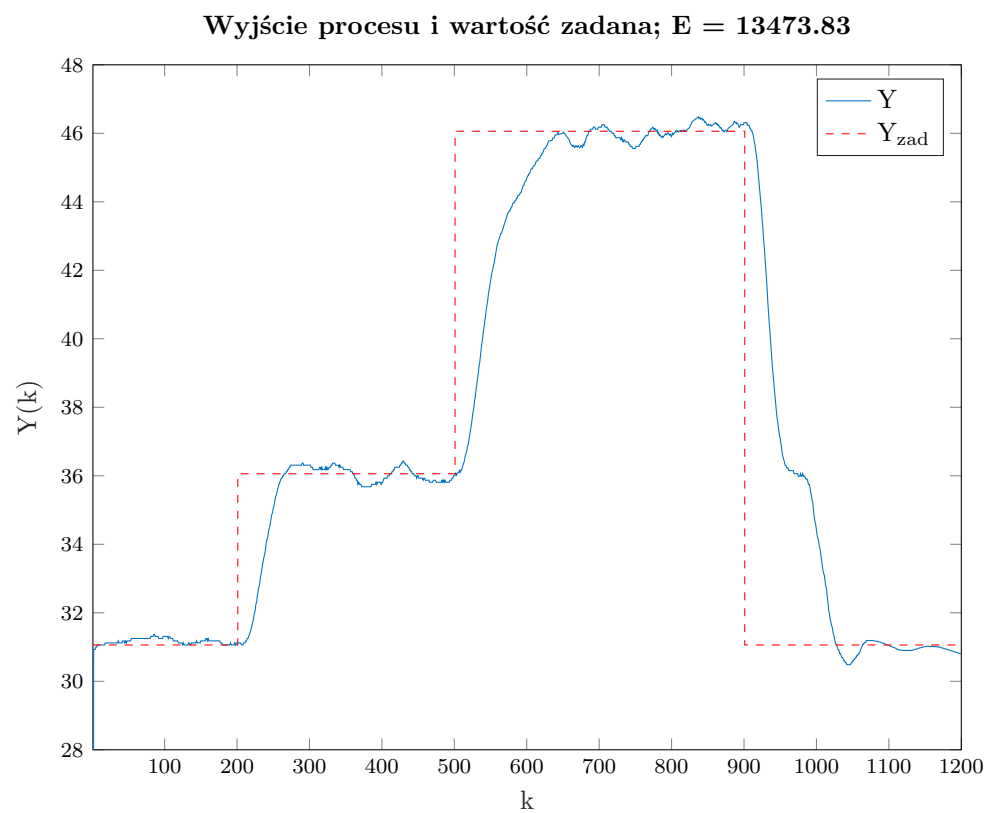
Parametry λ regulatorów lokalnych zostały dobrane eksperymentalnie. Najlepszy nastaw został przedstawiony na rys. 1.11. Jak widać z wykresów zarówno dla regulatora PID jak i DMC oddzielne strojenie każdego z regulatorów lokalnych, pomimo że czasochłonne, pozwoliło uzyskać lepszą regulację niż w przypadku takich samych nastawów. Taki wynik eksperymentu jest intuicyjny, gdyż regulator z takimi samymi parametrami regulatorów lokalnych zachowuje się tak samo jak pojedynczy regulator liniowy. Szczególnie znaczące okazała się zmiana wartości λ dla regulatora DMC. Pozwoliło to regulatorom lokalnym na swobodniejszy dobór sterowania, co skutkowało lepszą regulacją.



Rys. 1.9. Regulator rozmyty DMC



Rys. 1.10. Funkcje dzwonowe względem których odbywało się rozmywanie regulatorów lokalnych



Rys. 1.11. Regulator rozmyty DMC, $\lambda = [1; 0.9; 0.6]$

2. Projekt

1. Informacje wstępne

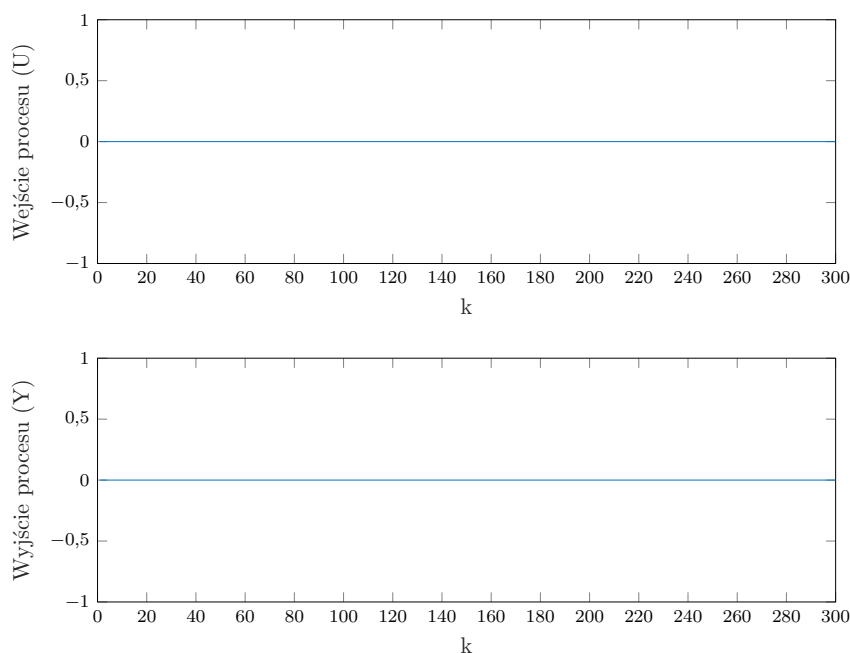
Zadanie projektowe wykorzystywało symulowany obiekt regulacji. Wyjście obiektu można wyznaczyć przy pomocy polecenia:

$$y(k) = \text{symulacja_obiektu_1y_p3}(u(k-5), u(k-6), y(k-1), y(k-2))$$

Wartości sygnałów wejścia i wyjścia procesu w punkcie pracy wynoszą $u = y = 0$; okres próbkowania wynosi 0,5 sekundy.

2. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

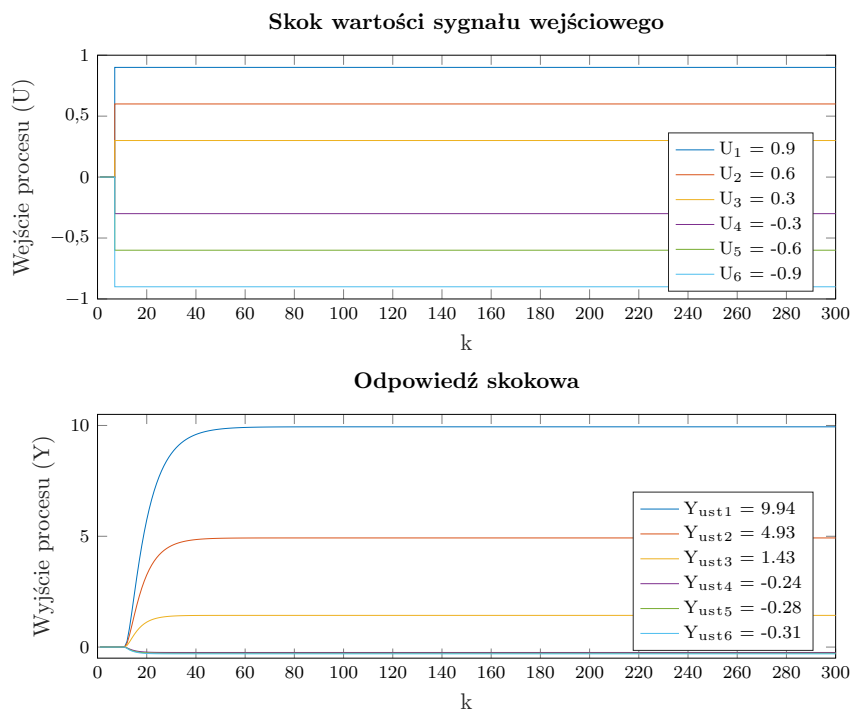
W celu sprawdzenia poprawności punktu pracy została przeprowadzona symulacja, gdzie na wejście podano sterowanie $u = 0$, jako poprzednie wartości wyjścia podano $y = 0$ i sprawdzono wartość wyjścia procesu w następnych chwilach. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 2.1. Wartość sygnału wyjściowego pozostała bez zmian, co potwierdza poprawność podanego punktu pracy.



Rys. 2.1. Sprawdzanie poprawności punktu pracy

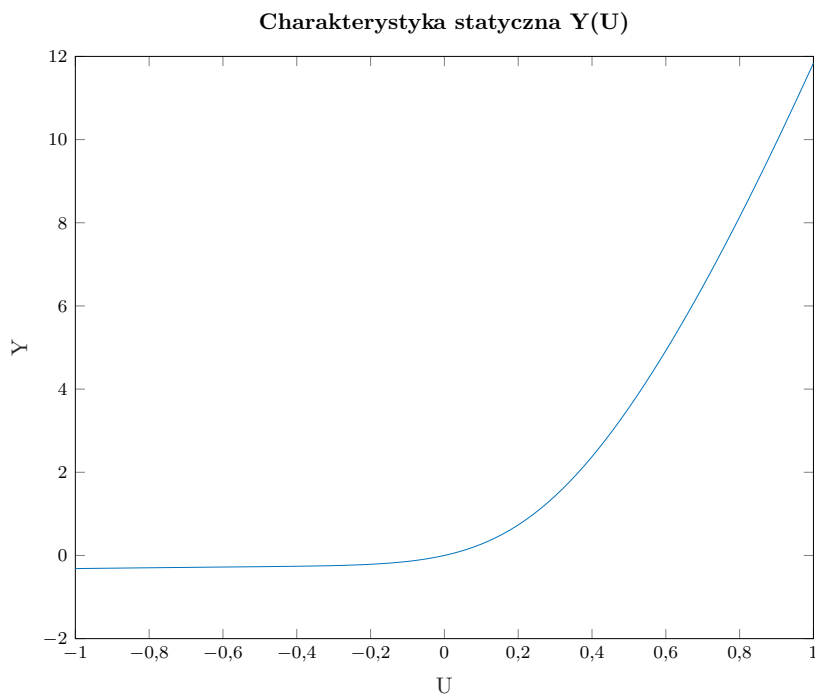
3. Odpowiedzi skokowe procesu

Wyznaczone zostały odpowiedzi skokowe dla kilku skoków wartości sygnału sterującego, gdzie wartość początkowa sterowania wynosiła $u=0$. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Odpowiedzi skokowe procesu

Na podstawie odpowiedzi skokowych wyznaczono charakterystykę statyczną procesu. Charakterystyka jest widoczna na rys. 2.3. Z wykresu możemy łatwo stwierdzić, że charakterystyka statyczna tego procesu nie jest liniowa.



Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna procesu

4. Regulatory cyfrowe

W celu regulacji danego procesu zostały zaimplementowany prosty cyfrowy regulator PID oraz analityczny regulator DMC.

Regulator PID:

```
function U = PID(e, K, Ti, Td, Tp, Umin, Umax)
% PID (Proportional Integral Derivative) controller
% U = PID(e, K, Ti, Td, Tp, Gmin, Gmax)
%         gives control signal for PID controller.
%
% Arguments:
% e - error value (e = y_zad - y);
% K - gain factor;
% Ti - integration time constant (Ti ~ = 0);
% Td - differentiation time constant;
% Tp - sampling period (Tp > 0);
% Umin - lower limit of U;
% Umax - upper limit of U.
%
% Warning!
% Upop is value of last iteration controll signal.
% In init it should have value of current operating point.
%
% See also PID_fuzzy, DMC, DMC_fuzzy.

persistent Upop
persistent e0
persistent e1
persistent e2
persistent r2
persistent r1
persistent r0

if isempty(e0)
    Upop = 0;           % sterowanie w punkcie pracy
    e0=0;
    e1=0;

    r2 = K*Td/Tp;
    r1 = K*(Tp/(2*Ti)-2*Td/Tp - 1);
    r0 = K*(1+Tp/(2*Ti) + Td/Tp);
end

% przesunięcie uchybów
e2 = e1;
e1 = e0;
e0 = e;

U = r2*e2 + r1*e1 + r0*e0 + Upop;

if U > Umax
```

```

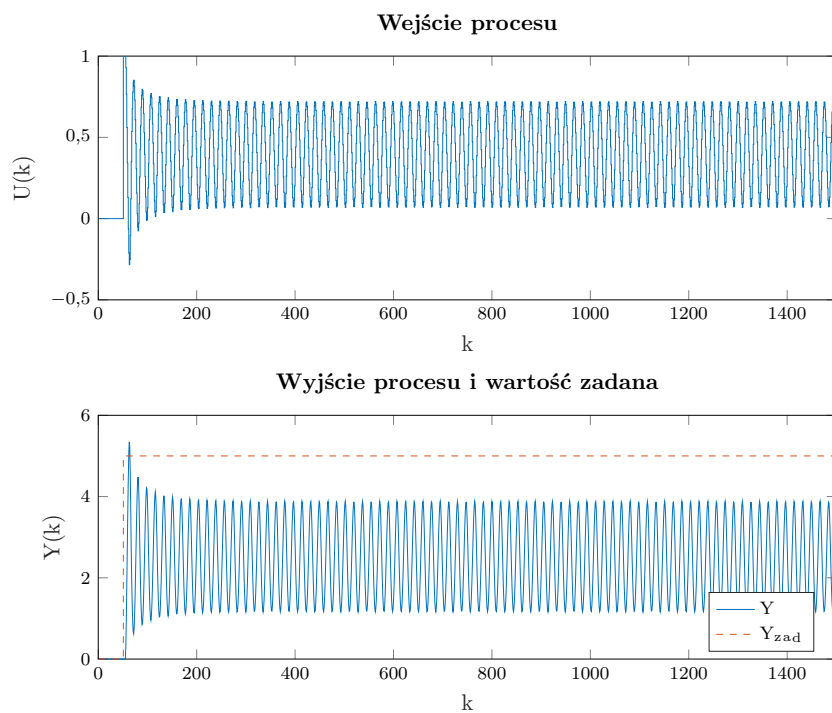
        U = Umax;
    end

    if U < Umin
        U = Umin;
    end

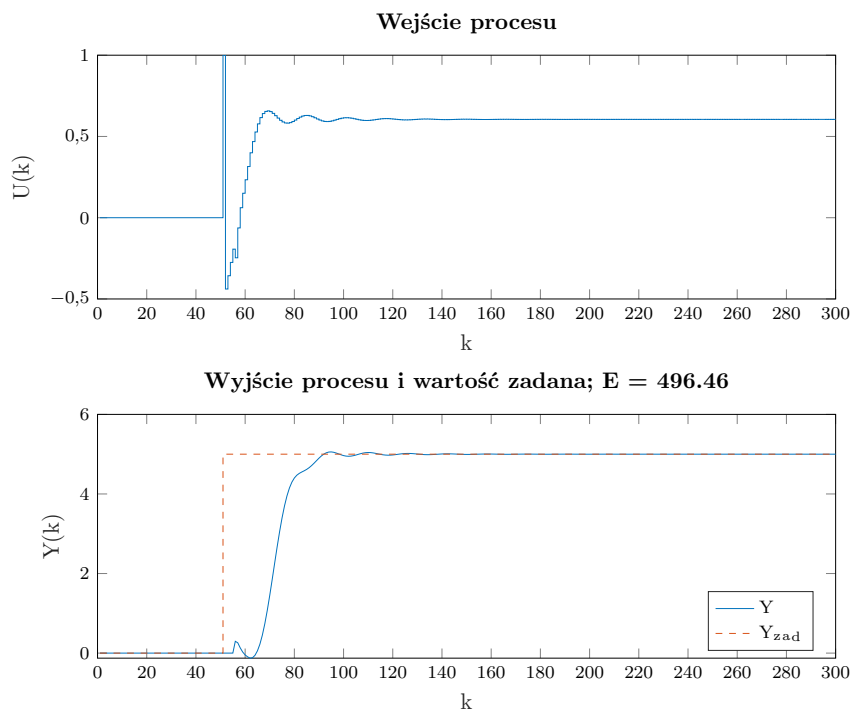
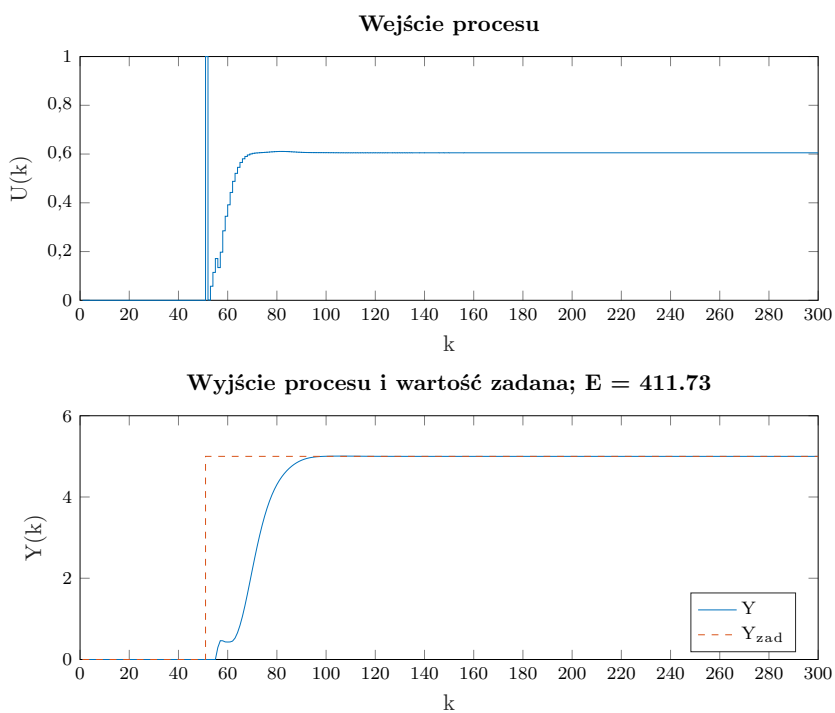
    Upop = U;
end

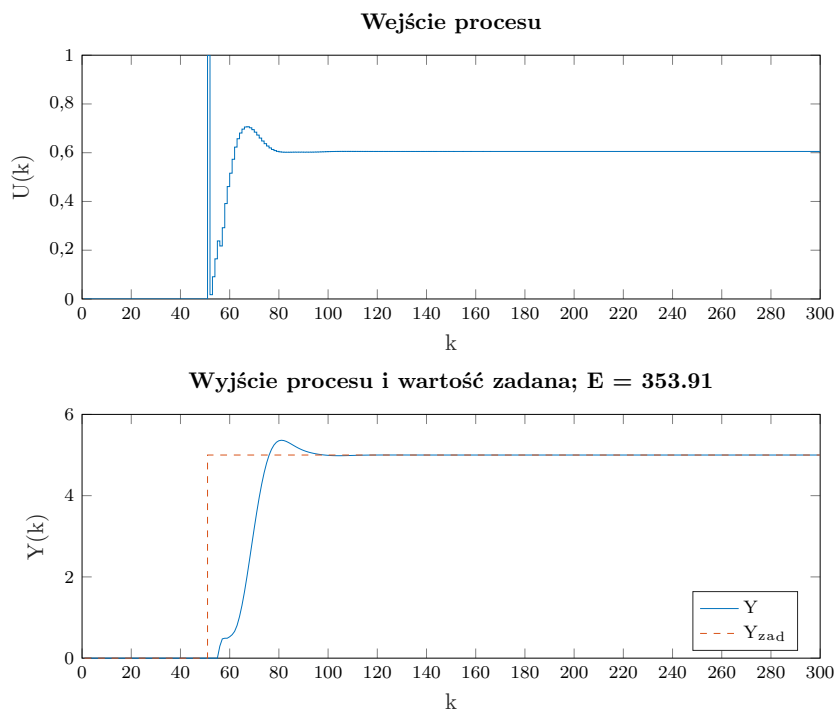
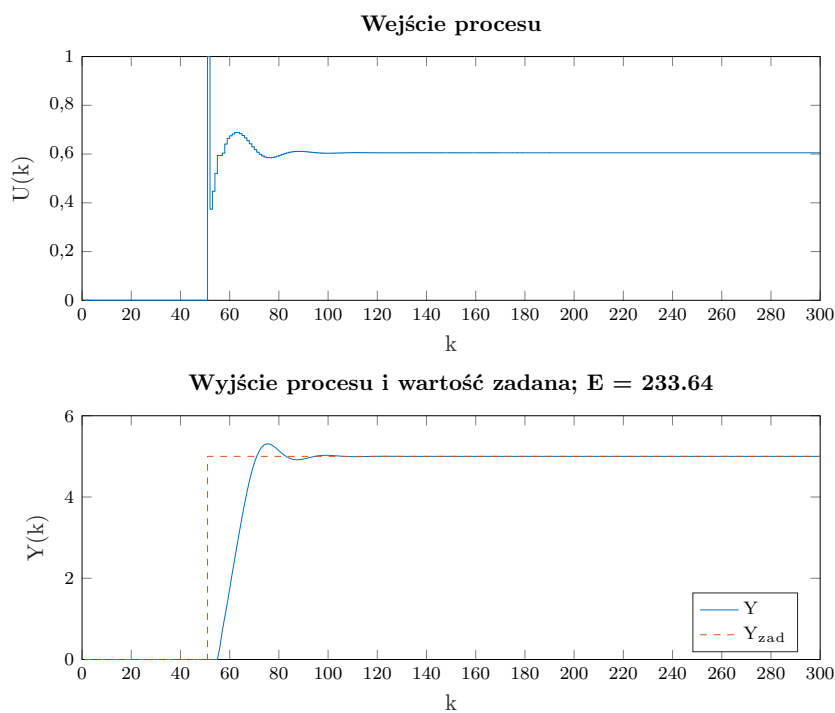
```

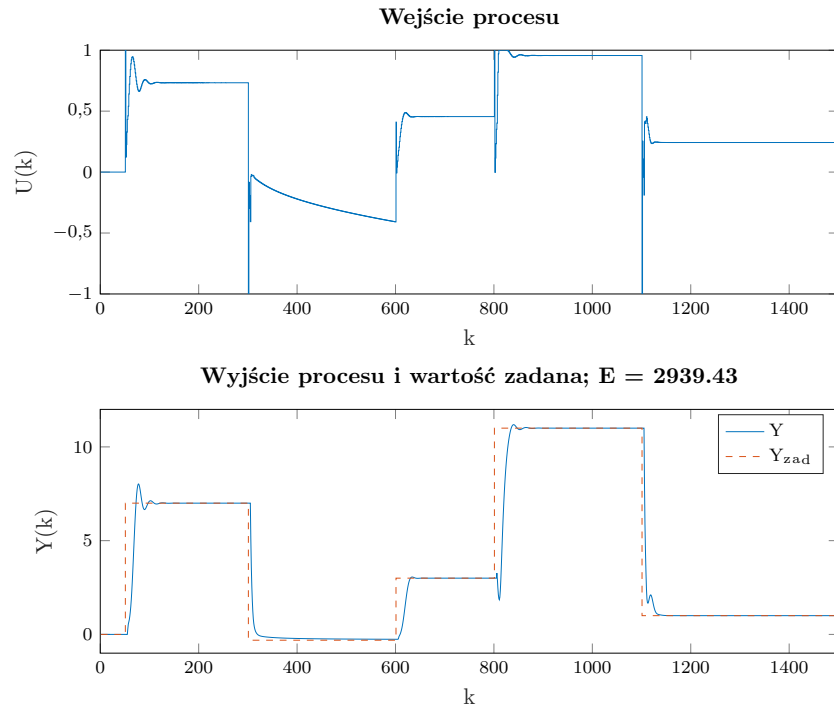
Dla podanego regulatora dobrano nastawy w sposób eksperymentalny. W pierwszej kolejności skorzystano z metody Zieglera-Nicholsa, do wyznaczenia początkowej wartości parametrów. Metoda Zieglera-Nicholsa została przedstawiona na rys. 2.4. Następnie wartości parametrów w niewielkim stopniu modyfikowano i testowano dla tej samej trajektorii wartości zadanej. Eksperymenty wykonywane podczas dobierania parametrów regulatora PID przedstawiono na rys. 2.5, rys. 2.6, rys. 2.7 i rys. 2.8. Przebieg regulatora PID z ostatecznymi nastawami został przedstawiony na rys. 2.9.



Rys. 2.4. Metoda Zieglera-Nicholsa, $K_{kryt} = 0,24$, $T_{kryt} = 8,8$

Rys. 2.5. Regulator PID, $K = 0,144$, $T_i = 4,4$, $T_d = 1,056$ Rys. 2.6. Regulator PID, $K = 0,1$, $T_i = 4,4$, $T_d = 1,056$

Rys. 2.7. Regulator PID, $K = 0,1, T_i = 3,4, T_d = 1,056$ Rys. 2.8. Regulator PID, $K = 0,1, T_i = 3,4, T_d = 0,7$

Rys. 2.9. Trajektoria docelowa, regulator PID, $K = 0,1, T_i = 3,4, T_d = 0,7$

Regulator DMC:

```
function U = DMC(S, yzad, y, D, N, Nu, lambda, Umin, Umax)
% DMC (Dynamic Matrix Control) controller
%   U = DMC(S, yzad, y, D, N, Nu, lambda, Umin, Umax)
%           gives control signal for DMC controller.
%
% Arguments:
% S – step answer for DMC controller (matrix);
% yzad – set point value;
% y – controlled variable;
% D – dynamic horizon;
% N – prediction horizon;
% Nu – control horizon;
% lambda – penatly factor;
% Umin – lower limit of U;
% Umax – upper limit of U.
%
% Warning!
% Upop is value of last iteration control signal.
% In init it should have value of current operating point.
%
% See also DMC_fuzzy, PID, PID_fuzzy.

persistent init
persistent M
persistent Mp
persistent K
persistent dUP
```

```

persistent Upop

if isempty(init)
    % przedłużenie wektora S
    for i = D+1:D+N
        S(i) = S(D);
    end

    % Inicjalizacja macierzy
    M = zeros(N, Nu);
    for i = 1:Nu
        M(i:N, i) = S(1:N-i+1);
    end

    Mp = zeros(N, D-1);
    for i = 1:(D-1)
        Mp(1:N, i) = S(i+1:N+i) - S(i);
    end

    I = eye(Nu);

    K = ((M'*M + lambda*I)^(-1))*M';
    dUP = zeros(D-1, 1);
    Upop = 0;
    init = 1;
end

% liczone online
Yzad = yzad*ones(N, 1);
Y = y*ones(N, 1);

Y0 = Y + Mp*dUP;
dU = K*(Yzad - Y0);
du = dU(1);

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

U = Upop + du;

if U > Umax
    U = Umax;
end

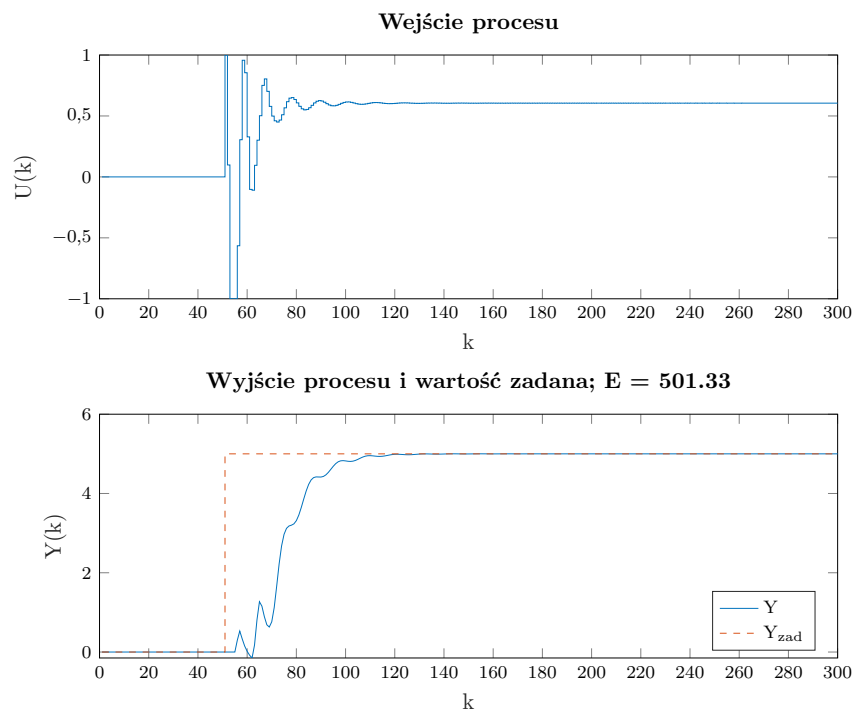
if U < Umin
    U = Umin;
end

Upop = U;

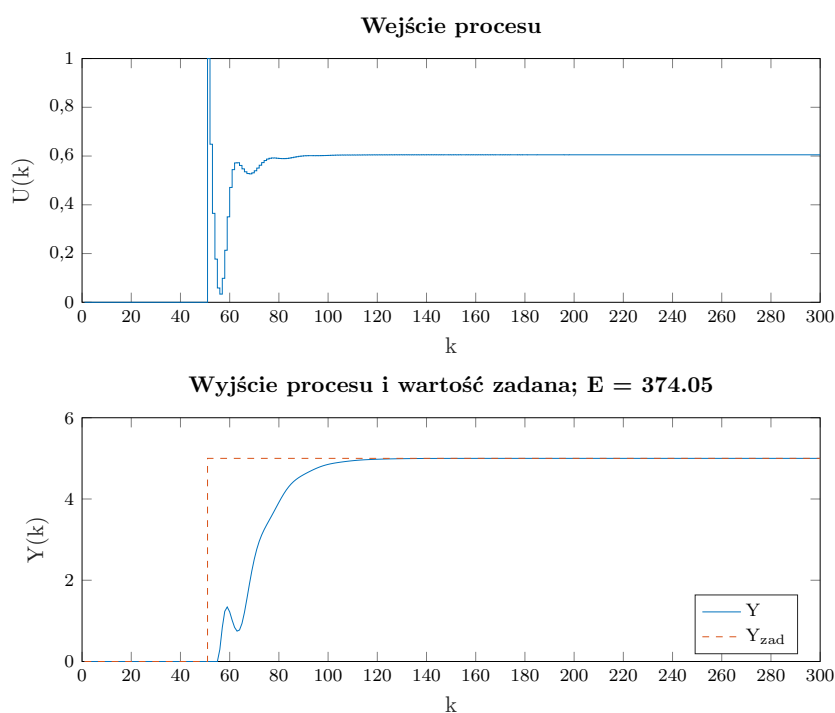
```

end

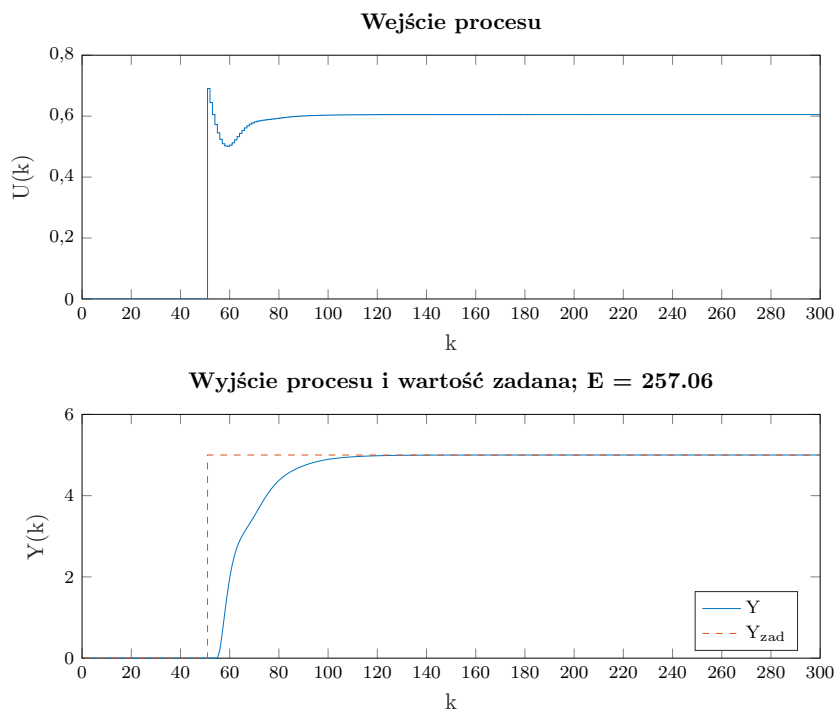
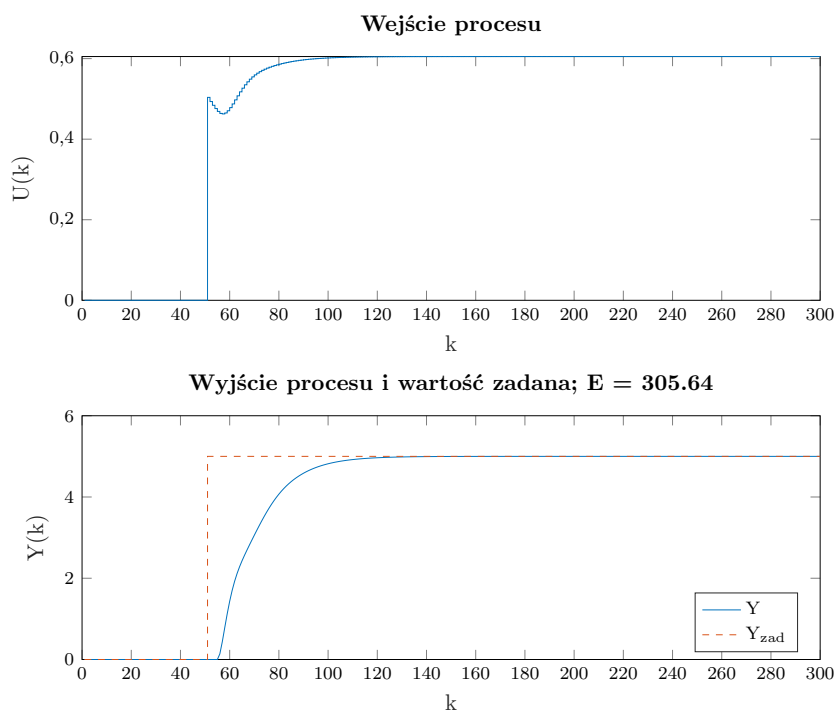
Również dla regulatora DMC wartości parametrów były dobierane w sposób eksperymentalny. Wartości parametrów były modyfikowane i porównywane w celu znalezienia najlepszego nastawu. Eksperymenty wykonywane podczas dobierania parametrów regulatora DMC przedstawiono na rys. 2.10 - rys. 2.15. Ostateczny sposób działania regulatora DMC przedstawiono na rys. 2.16.

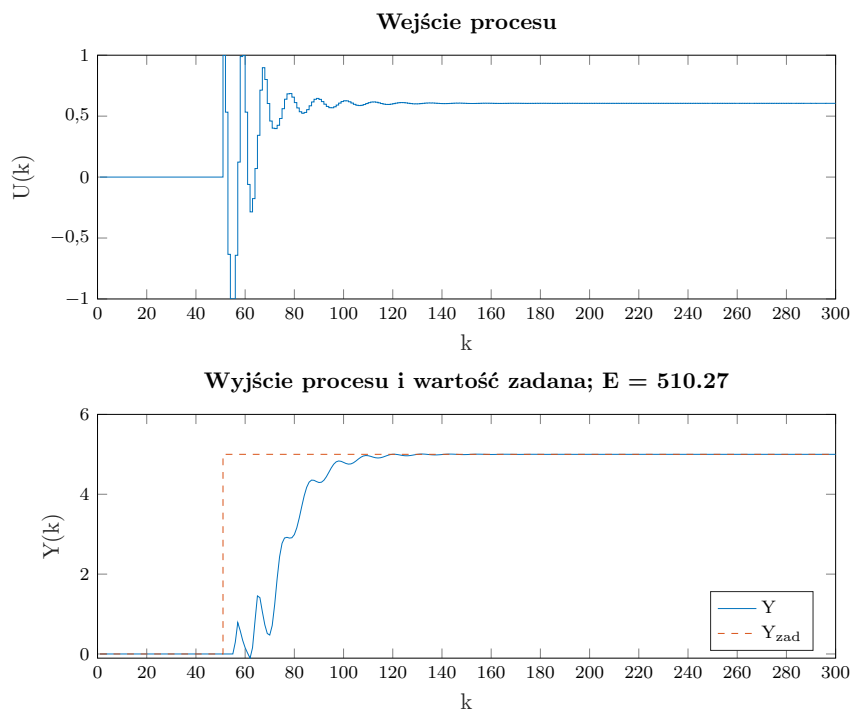
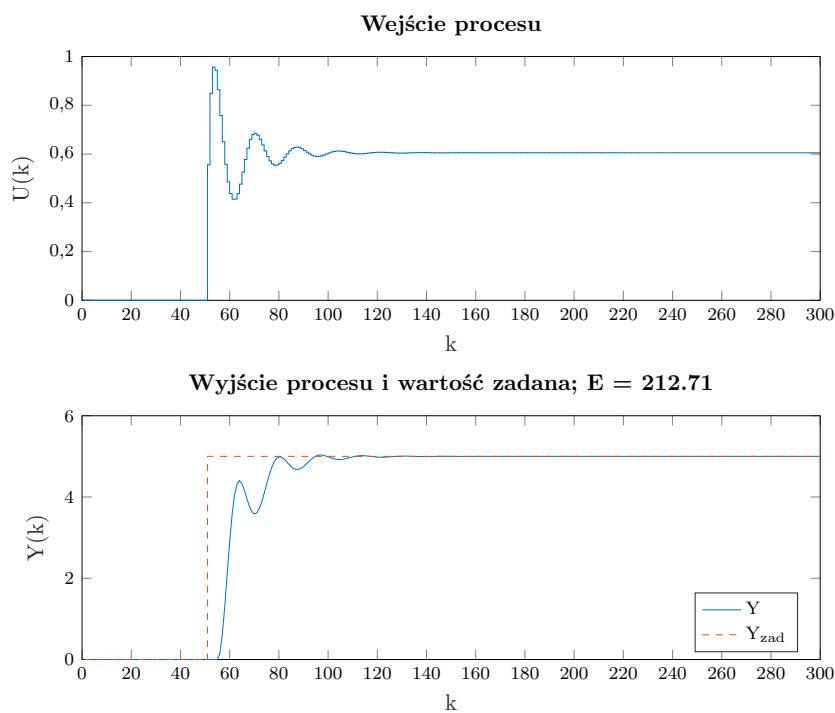


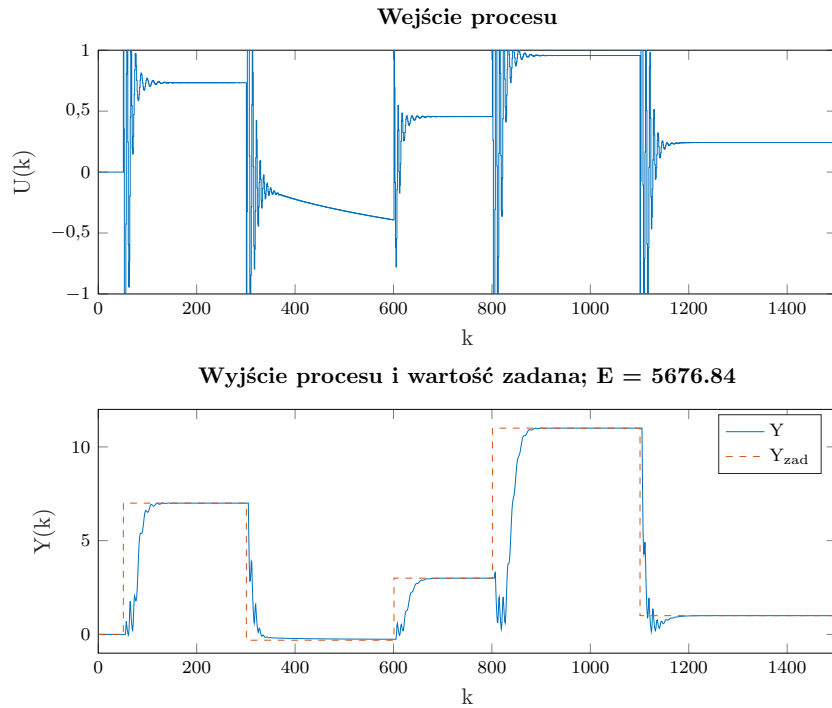
Rys. 2.10. Regulator DMC, $N = 7$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$



Rys. 2.11. Regulator DMC, $N = 10$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$

Rys. 2.12. Regulator DMC, $N = 20$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$ Rys. 2.13. Regulator DMC, $N = 40$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$

Rys. 2.14. Regulator DMC, $N = 20$, $N_u = 5$, $\lambda = 1$ Rys. 2.15. Regulator DMC, $N = 20$, $N_u = 20$, $\lambda = 50$

Rys. 2.16. Trajektoria docelowa, regulator DMC, $N = 20$, $N_u = 20$, $\lambda = 50$

Pomimo że obiekt jest nieliniowy regulatory z laboratorium 1. dobrze sobie radzą z zadaniem regulacji. Wynika to z tego, że znacząca część charakterystyki statycznej jest liniowa. Jedynie dla wartości wyjścia $Y \in (-0,3; 1)$ obiekt jest zdecydowanie nieliniowy. Z tego powodu regulacja dla wartości zadanych $Y_{\text{zad}} \in (1; 11,84)$ przebiega bardzo dobrze. Ze względu na wąski przedział, który znacząco różni się zachowaniem wzmocnieniem od reszty procesu, jego wpływ na sumaryczny błąd kwadratowy (wskaźnik jakości) jest niewielki. Na rys. 2.9 i rys. 2.16 możemy zauważyć, że dla wartości zadanej $Y_{\text{zad}} = -0,31$ oba regulatory bardzo słabo sobie radzą z wysterowaniem obiektu do wartości zadanej.

5. Regulatory rozmyte

Regulator rozmyty PID:

```
function U = PID_fuzzy(e, num, y, K, Ti, Td, Tp, Umin, Umax)
% PID (Proportional Integral Derivative) controller in fuzzy version
% U = PID_fuzzy(e, num, y, K, Ti, Td, Tp, Umin, Umax)
%         gives control signal for fuzzy PID controller.
%         It uses process output(y) as selection variable.
%         It uses bell function as membership function (gbellmf).
%
% Arguments:
% e - error value (e = y_zad - y);
% num - number of local linear PID controllers (2, 3, 4, ...);
% y - value of process output;
% K [num, 1] - gain factor;
% Ti [num, 1] - integration time constant (Ti ~= 0);
% Td [num, 1] - differentiation time constant;
% Tp - sampling period (Tp > 0);
% Umin - lower limit of U;
```

```

% Umax – upper limit of U.
%
% Warning!
% Upop is value of last iteration controll signal.
% In init it should have value of current operating point.
%
% See also PID, DMC_fuzzy, DMC, gbellmf.

persistent Upop
persistent e0
persistent e1
persistent e2
persistent r2
persistent r1
persistent r0
persistent a
persistent b
persistent center

if isempty(e0)
    Upop = 0;           % sterowanie w punkcie pracy
    e0=0;
    e1=0;

    r2 = zeros(num, 1);
    r1 = zeros(num, 1);
    r0 = zeros(num, 1);

    for i = 1:num
        r2(i) = K(i)*Td(i)/Tp;
        r1(i) = K(i)*(Tp/(2*Ti(i))-2*Td(i)/Tp - 1);
        r0(i) = K(i)*(1+Tp/(2*Ti(i)) + Td(i)/Tp);
    end

    % parametry funkcji przynaleznosci (wyznaczone manualnie)
    if num == 2
        a = [0.3; 2];
        b = [1.5; 1];
        center = [-0.3; 6];
    end

    if num == 3
        a = [0.1; 0.3; 3];
        b = [1.5; 1.5; 4];
        center = [-0.3; 0.2; 6];
    end

    if num == 4
        a = [0.1; 0.2; 0.5; 3];
        b = [1.5; 1.5; 1.2; 4];
        center = [-0.3; 0; 1.5; 7];
    end
end

```

```

        end

        if num == 5
            a = [0.1; 0.1; 0.5; 2; 2];
            b = [1.5; 2; 2; 3; 3];
            center = [-0.3; 0; 1.5; 5; 8];
        end

    end

    % przesuniecie uchybow
    e2 = e1;
    e1 = e0;
    e0 = e;

    % Kolejno dla kazdego regulatora lokalnego:
    %   wyznaczenie sterowan dla poszczegolnych 'num' regulatorow
    %   wyznaczenie wspoczynnikow przynalezności
    %   wnioskowanie rozmyte

    w = zeros(num, 1);
    U = 0;

    for i = 1:num
        u_fuzzy = Upop + r2(i)*e2 + r1(i)*e1 + r0(i)*e0;
        w(i) = gbellmf(y, [a(i) b(i) center(i)]);
        U = U + w(i)*u_fuzzy;
    end
    U = U/sum(w);

    % ograniczenia sterowania
    if U > Umax
        U = Umax;
    end

    if U < Umin
        U = Umin;
    end

    Upop = U;
end

```

Regulator rozmyty DMC:

```

function U = DMC.fuzzy(S_fuzzy, num, yzad, y, D, N, Nu, lambda, Umin, Umax)
% DMC (Dynamic Matrix Control) fuzzy controller
%   U = DMC_fuzzy(S_fuzzy, num, yzad, y, D, N, Nu, lambda, Umin, Umax)
%       gives control signal for DMC fuzzy controller.
%
% Arguments:
%   S_fuzzy {num} – step answers for local DMC controllers
%               {[matrix],[matrix],...};

```



```

% num – number of local DMC controllers;
% yzad – set point value;
% y – controlled variable;
% D – dynamic horizon;
% N – prediction horizon;
% Nu – controll horizon;
% lambda[num, 1] – penatly factor;
% Umin – lower limit of U;
% Umax – upper limit of U.
%
% Warning!
% Upop is value of last iteration controll signal.
% In init it should have value of current operating point.
%
% See also DMC, PID_fuzzy, PID, gbellmf.

persistent init

persistent S
persistent M
persistent Mp
persistent K

persistent Upop
persistent dUP

persistent a
persistent b
persistent center

if isempty(init)
    init = 1;
    Upop = 0;
    dUP = zeros(D-1,1);

    % parametry funkcji przynaleznosci (wyznaczone manualnie)
    if num == 2
        a = [0.3; 2];
        b = [1.5; 1];
        center = [-0.3; 6];
    end

    if num == 3
        a = [0.1; 0.3; 3];
        b = [1.5; 1.5; 4];
        center = [-0.3; 0.2; 6];
    end

    if num == 4
        a = [0.1; 0.2; 0.5; 3];

```

```

        b = [1.5; 1.5; 1.2; 4];
        center = [-0.3; 0; 1.5; 7];
    end

    if num == 5
        a = [0.1; 0.1; 0.5; 2; 2];
        b = [1.5; 2; 2; 3; 3];
        center = [-0.3; 0; 1.5; 5; 8];
    end

    S = cell(num);
    M = cell(num);
    Mp = cell(num);
    K = cell(num);

    for j = 1:num
        S{j} = S_fuzzy{j};

        % przedluzenie wektora S
        for i = D+1:D+N
            S{j}(i) = S{j}(D);
        end

        % Inicjalizacja macierzy
        M{j} = zeros(N, Nu);
        for i = 1:Nu
            M{j}(i:N, i) = S{j}(1:N-i+1);
        end

        Mp{j} = zeros(N, D-1);
        for i = 1:(D-1)
            Mp{j}(1:N, i) = S{j}(i+1:N+i) - S{j}(i);
        end

        I = eye(Nu);

        K{j} = ((M{j}'*M{j} + lambda(j)*I)^(-1))*M{j}';
    end
end

U = 0;
w = zeros(num, 1);

Yzad = yzad*ones(N,1);
Y = y*ones(N,1);

for j = 1:num
    % tu juz online
    Y0 = Y + Mp{j}*dUP;
    dU = K{j}*(Yzad - Y0);
    du = dU(1);

```

```

    u_fuzzy = Upop + du;

    % wnioskowanie rozmyte
    w(j) = gbellmf(y, [a(j) b(j) center(j)]);
    U = U + w(j)*u_fuzzy;
end
U = U/sum(w);

du = U - Upop;
for n=D-1:-1:2
    dUP(n) = dUP(n-1);
end
dUP(1) = du;

if U > Umax
    U = Umax;
end

if U < Umin
    U = Umin;
end

Upop = U;
end

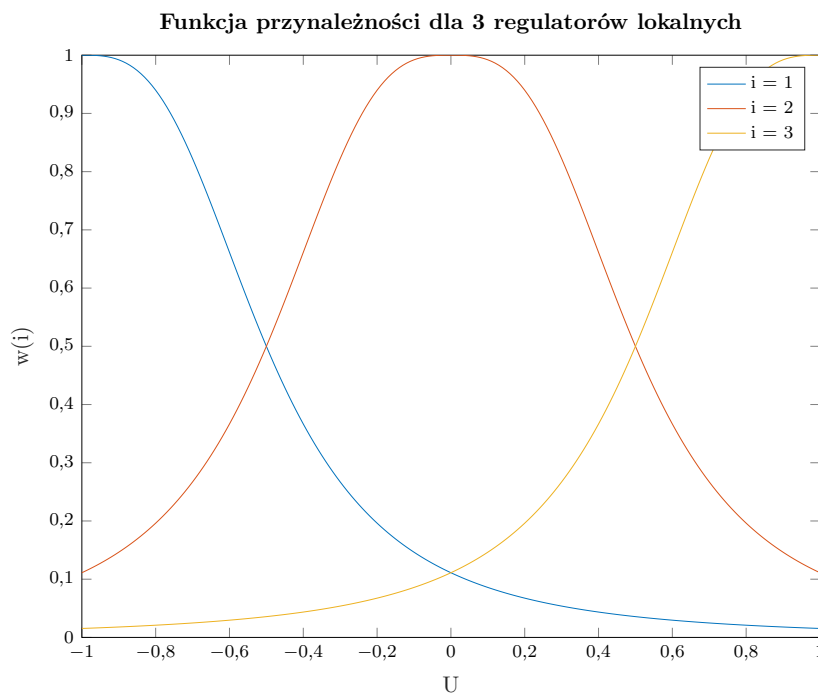
```

Jako zmienną, na podstawie której dokonywane jest rozmywanie wybrano wyjście procesu "Y". Zmienna ta została wybrana na podstawie otrzymanej charakterystyki statycznej. Wynika to z tego, że jest ona dobrą reprezentacją w jakim stanie obecnie znajduje się symulowany obiekt (w jakim punkcie pracuje). Zmienna sterowania w przeciwieństwie do zmiennej wyjściowej waha się znacząco niezależnie od obecnego wyjścia dla skoków wartości zadanej.

Jako rodzaj funkcji przynależności wybrano funkcje dzwonowe, ponieważ w łatwy sposób można dostosowywać jej kształt do potrzeb rozmywania. Ważnym atutem funkcji dzwonowej jest fakt, że kilka regulatorów może działać jednocześnie i wpływać w pewnym stopniu na wartość sterowania. Jest to rozwiązanie lepsze od przykładu w którym każdy regulator lokalny działa niezależnie od innych, tylko dla swojego przedziału pracy. Kształt funkcji przynależności jest uzależniony od otrzymanej charakterystyki statycznej. Ponieważ dla zmiennej wyjściowej nieliniowość procesu jest silna dla wartości w wąskim przedziale $(-0,31; 1)$, zaś proces jest stosunkowo liniowy dla wartości w szerokim przedziale $(1; 11,84)$ to dobierano funkcje przynależności, tak aby zawierały one w przybliżeniu liniowe fragmenty charakterystyki. Dzięki takiemu zabiegowi już dla niewielkiej ilości regulatorów lokalnych można było uzyskać zadowalające wyniki regulacji. Funkcje dzwonowe względem których dokonywane było rozmycie przedstawiono na rys 2.17.

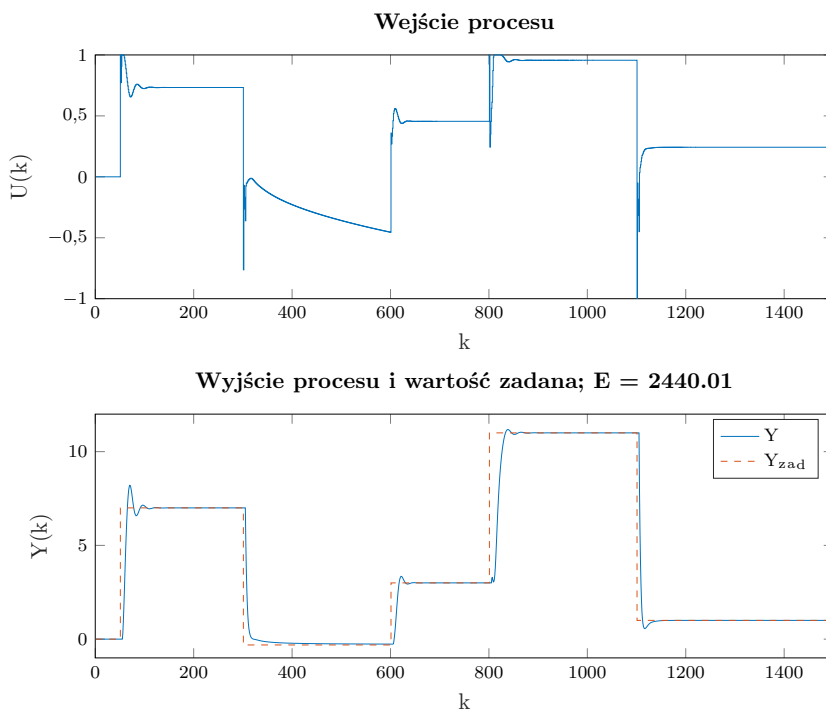
6. Liczba regulatorów lokalnych

Nastawy regulatorów lokalnych wybrano metodą eksperymentalną, w taki sposób aby uzyskać jak najlepszą jakość regulacji wokół punktu pracy danego regulatora. Na rys. 2.18 - rys. 2.21 pokazano jak działa rozmyty regulator PID w zależności od liczby regulatorów lokalnych (od 2 do 5). Na rys. 2.22 - rys. 2.25, pokazano natomiast działanie rozmytego regulatora DMC w zależności od liczby lokalnych regulatorów (od 2 do 5). Z racji, że λ dla najlepszego nastawu

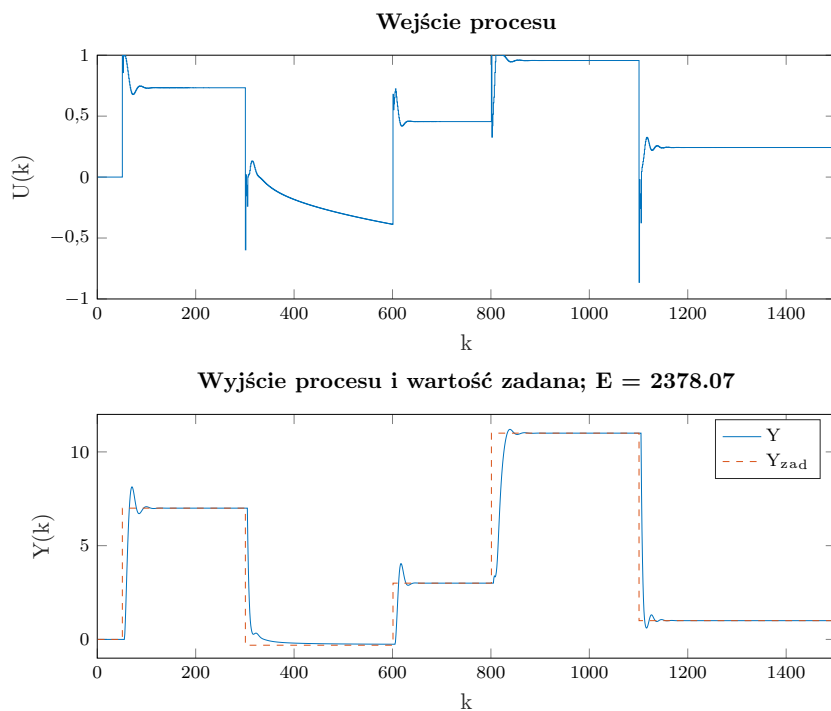


Rys. 2.17. Przykład funkcji dzwonowych dla 3 regulatorów lokalnych, na podstawie których dokonywano rozmycia

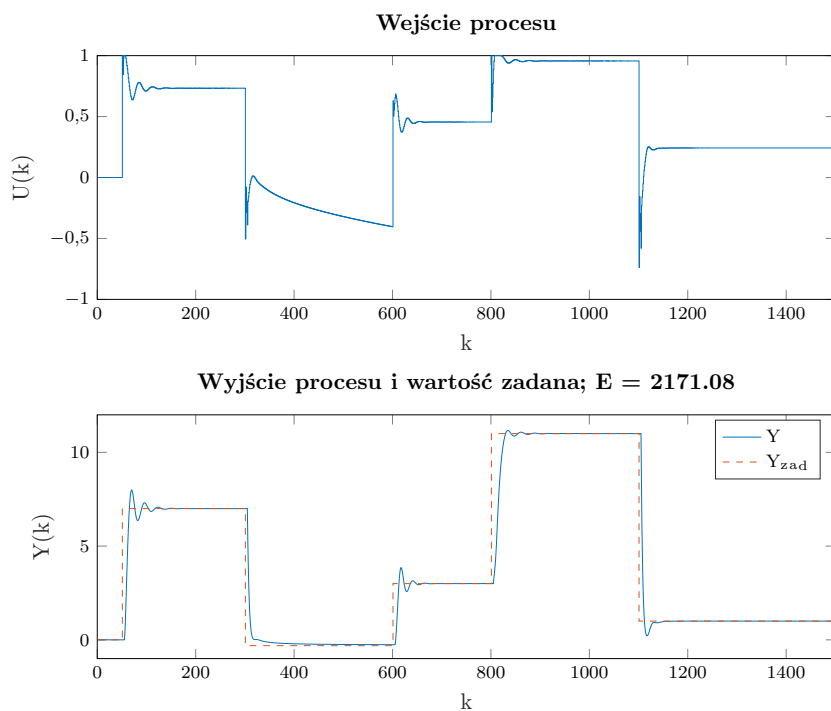
regulatora liniowego DMC wynosiła 50, to każdy regulator lokalny domyślnie startował z taką wartością λ .



Rys. 2.18. Rozmyty regulator PID z 2 regulatorami lokalnymi



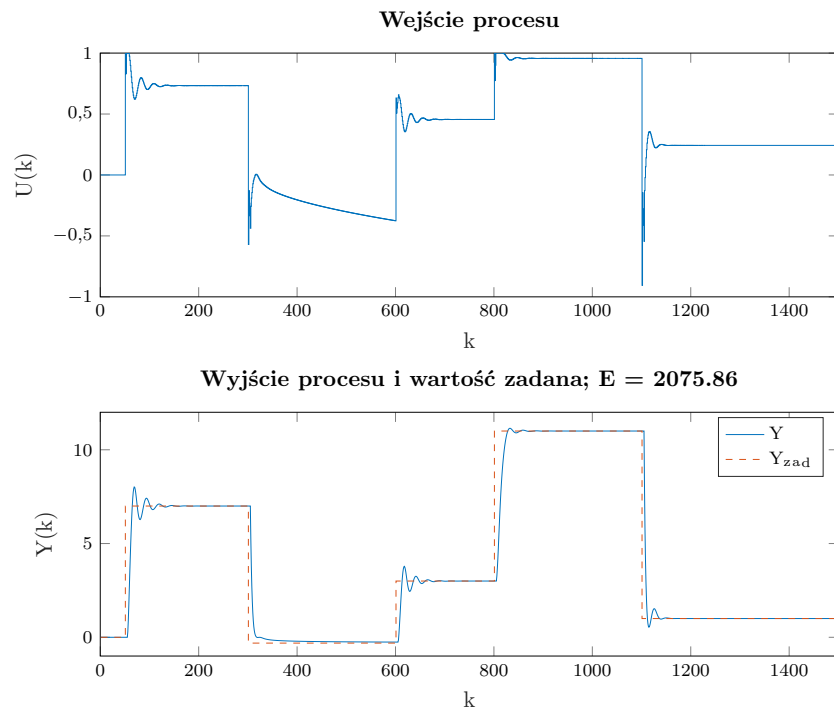
Rys. 2.19. Rozmyty regulator PID z 3 regulatorami lokalnymi



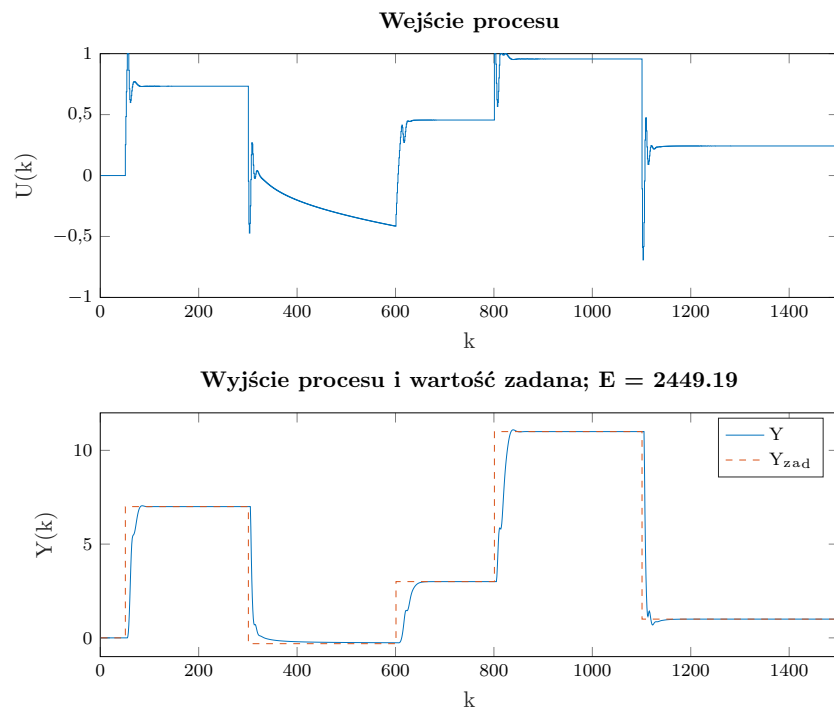
Rys. 2.20. Rozmyty regulator PID z 4 regulatorami lokalnymi

7. Dobór parametrów λ regulatorów lokalnych

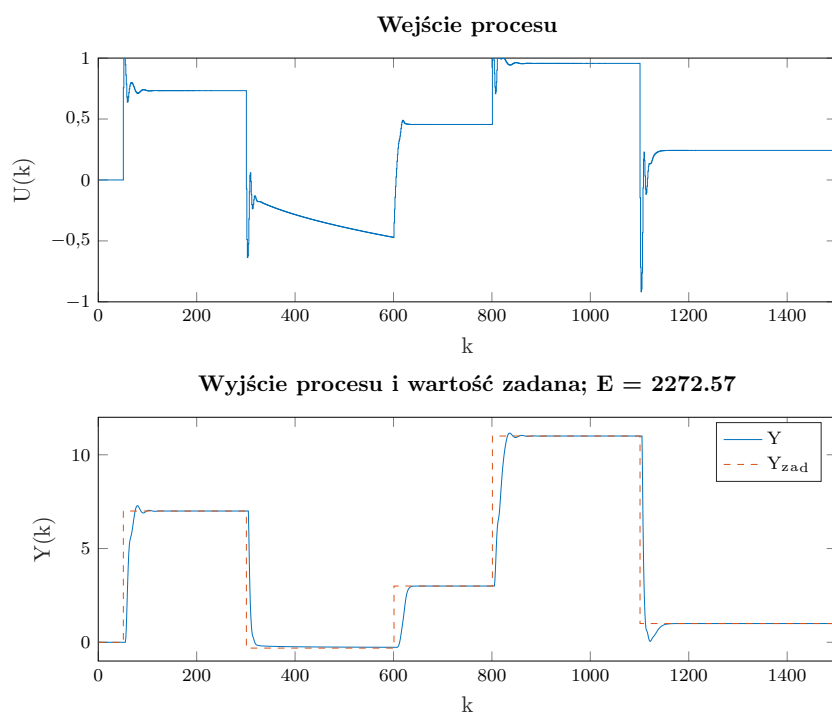
Wykonując eksperymenty dla różnych wartości λ można było wywnioskować, że jakość regulacji nie zmienia się w znaczący sposób, dlatego pozostano przy wartości wyznaczonej dla regulatora liniowego $\lambda = 50$.



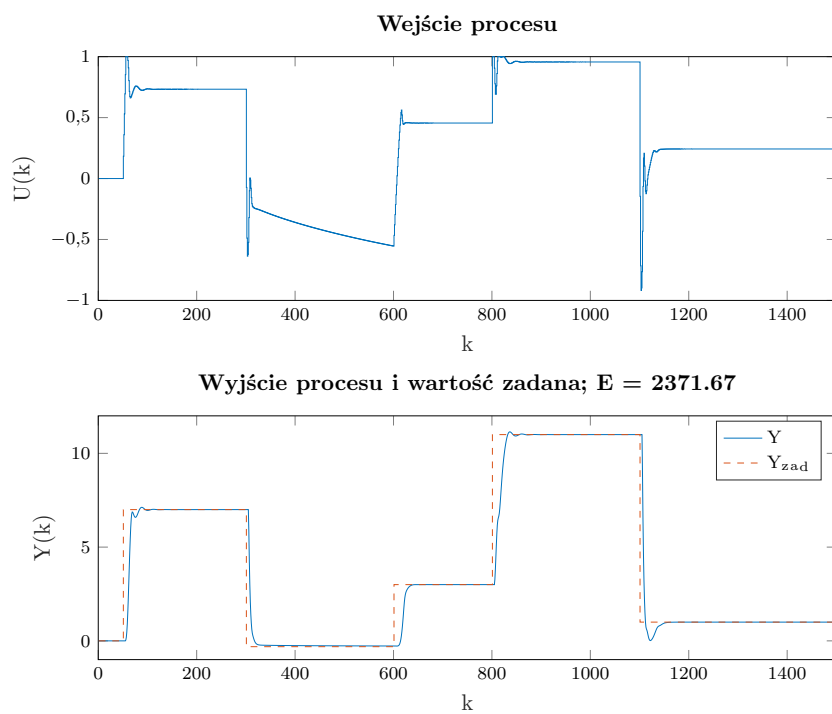
Rys. 2.21. Rozmyty regulator PID z 5 regulatorami lokalnymi



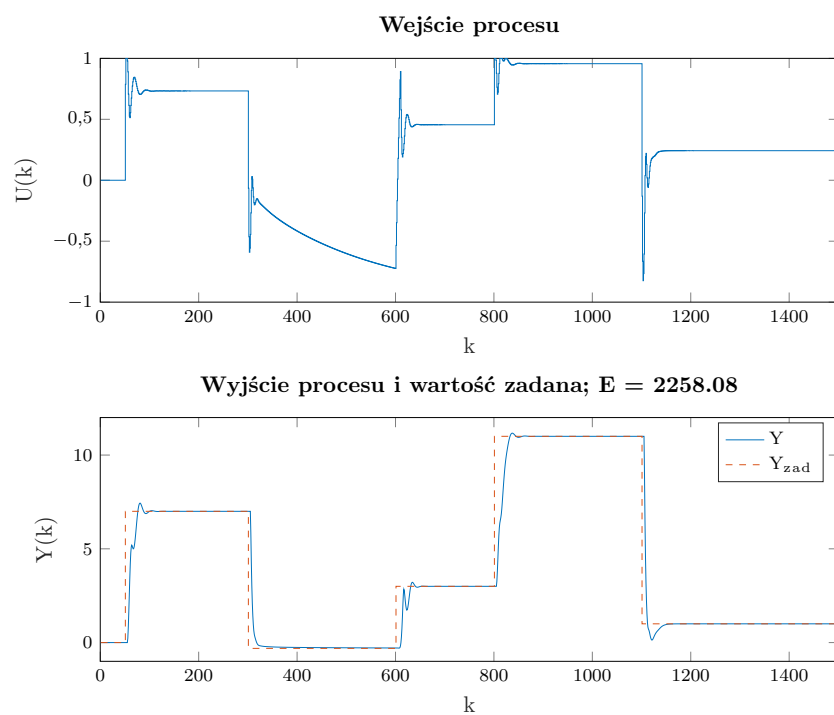
Rys. 2.22. Rozmyty regulator DMC z 2 regulatorami lokalnymi



Rys. 2.23. Rozmyty regulator DMC z 3 regulatorami lokalnymi



Rys. 2.24. Rozmyty regulator DMC z 4 regulatorami lokalnymi



Rys. 2.25. Rozmyty regulator DMC z 5 regulatorami lokalnymi