

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów w sterowania
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego
nr 2, zadanie nr 1

Zespół Z01

Hubert Kozubek, Przemysław Michalczewski

Warszawa, 2021

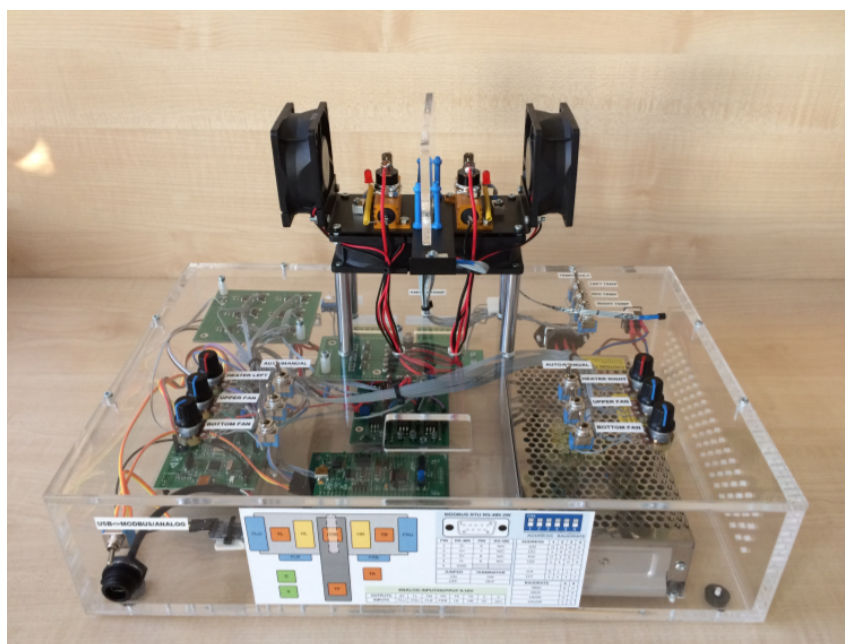
Spis treści

1. Laboratorium	2
1. Cel laboratorium	2
2. Przebieg laboratorium	2
3. Punkt pracy stanowiska	3
4. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście	3
5. Odpowiedzi skokowe dla algorytmu DMC	5
6. Algorytm DMC z pomiarem zakłóceń	10
7. Dobór parametrów dla algorytmu DMC	12
8. Regulacja procesu bez pomiaru zakłócenia	13
9. Regulacja procesu z pomiarem zakłócenia	13
2. Projekt	16
1. Informacje wstępne	16
2. Sprawdzenie poprawności punktu pracy	16
3. Odpowiedzi skokowe toru wejście-wyjście	17
4. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście	17
5. Charakterystyki statyczne torów procesu	18
6. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych wykorzystywanych w algorytmie DMC	20
7. Implementacja algorytmu regulacji DMC dla procesu symulowanego	21
8. Dobór parametrów algorytmu DMC	23
9. Porównanie regulacji DMC z pomiarem zakłócenia oraz bez pomiaru	26
10. Działanie algorytmu DMC przy zakłóceniach sinusoidalnych	28
11. Badanie odporności algorytmu DMC na szum pomiarowy sygnału zakłócenia	29

1. Laboratorium

1. Cel laboratorium

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



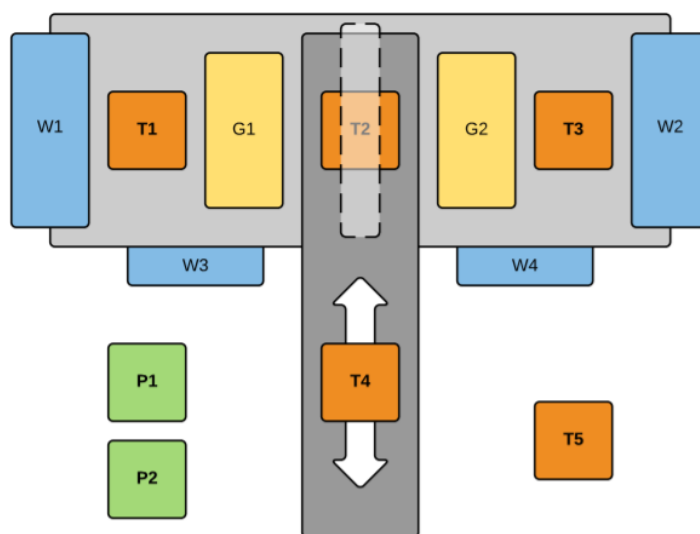
Rys. 1.1. Stanowisko grzejąco-chłodzące używane w trakcie laboratoriów.

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 5 zadań:

1. Odczytać wartość pomiaru temperatury dla termometru T1 dla mocy 26% grzałki G1 w stanie ustalonym (wyznaczyć punkt pracy).
2. Wyznaczyć odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjscie dla trzech różnych zmian sygnału zakłócającego Z rozpoczynając z punktu pracy.
3. Przygotować odpowiedzi skokowe wykorzystywane w algorytmie DMC.
4. Zaimplementować algorytm DMC do regulacji procesu stanowiska w języku MATLAB.
5. Dobrać parametr D^z dla algorytmu DMC i przeprowadzić eksperymenty.



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.

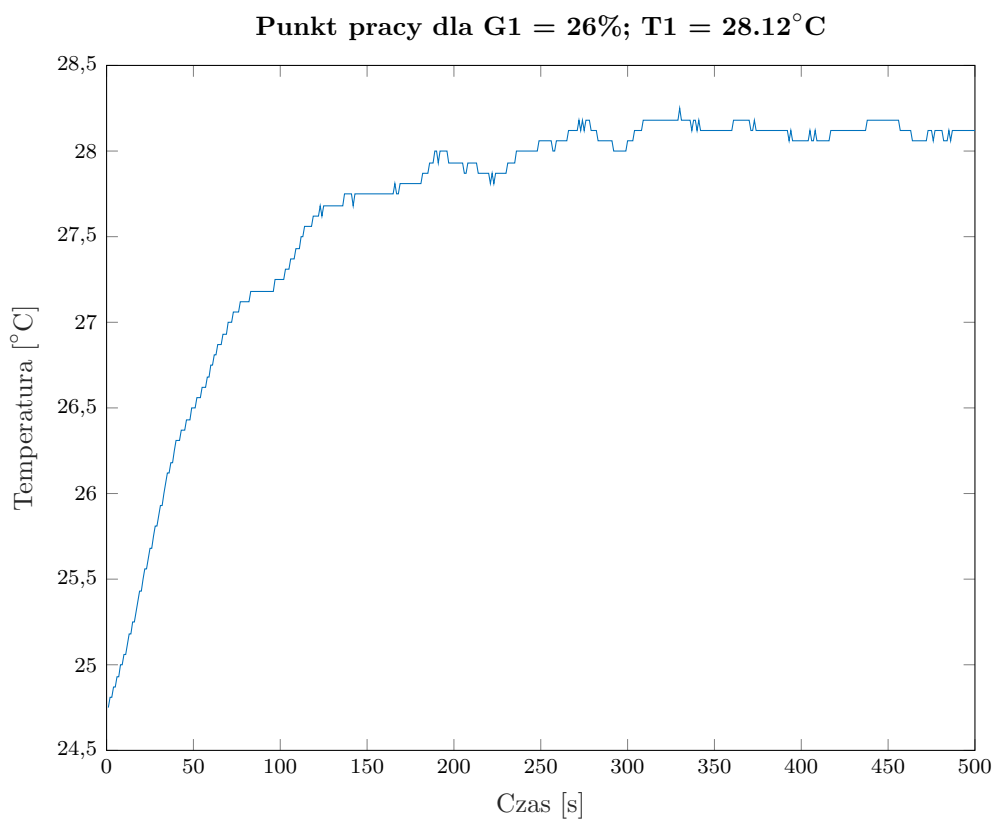
3. Punkt pracy stanowiska

W celu wyznaczenia punktu pracy stanowiska dla mocy grzałki $G1=26\%$ zadano tę wartość dla sygnału sterującego grzałką. Następnie poczekano, aż temperatura T1 ustali się. Wynik eksperymentu przedstawiono na rys. 2.1. Odczytana wartość temperatury dla termometru T1 wyniosła $28,12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

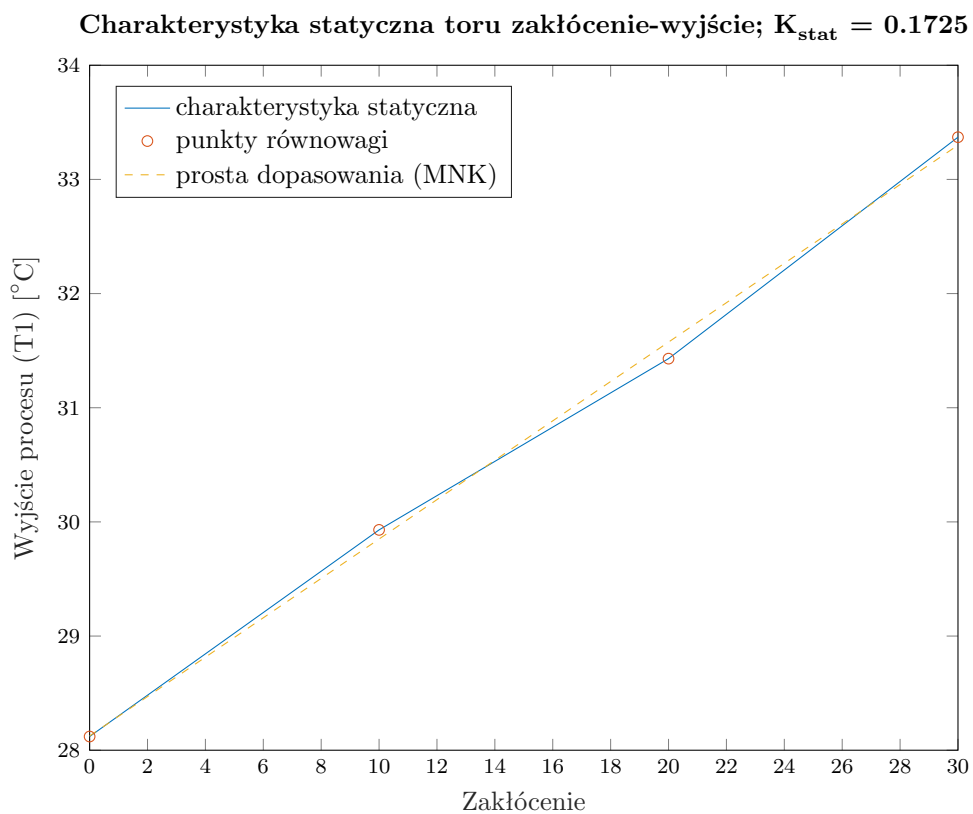
4. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście

Dla stanowiska pracującego w ustalonym punkcie pracy ($G1=26\%$; $T1=28,12^{\circ}\text{C}$) zadano 3 różne wartości skoku zakłócenia. Eksperyment wykonano dla skoków sygnału zawsze z wartości $Z=0$ do kolejno wartości: $Z=10$, $Z=20$ oraz $Z=30$. Wyniki przedstawiono na rys. 1.5. Różnica w początkowych wartościach temperatury T1 dla poszczególnych skoków wynika z zakłóceń powodowanych przez zmianę temperatury w pracowni laboratoryjnej oraz nagrzewania się stanowiska grzejąco-chłodzącego.

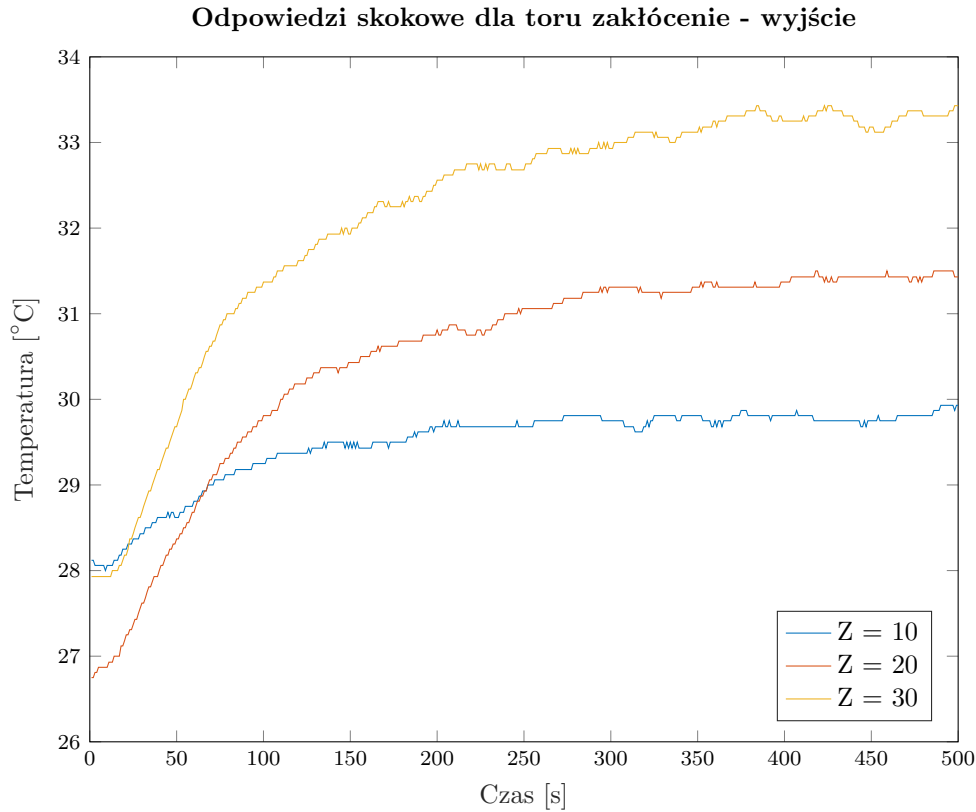
Na podstawie wyznaczonej charakterystyki statycznej dla toru zakłócenie-wyjście przedstawionej na rys. 1.4 można stwierdzić, że właściwości statyczne są w przybliżeniu liniowe. Wzmocnienie statyczne dla tego toru procesu wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów i otrzymano wartość $K_{\text{stat}} = 0.1725$.



Rys. 1.3. Ustalanie się temperatury dla punktu pracy.



Rys. 1.4. Charakterystyka statyczna dla toru zakłócenie - wyjście.



Rys. 1.5. Odpowiedzi skokowe dla toru zakłócenie - wyjście.

5. Odpowiedzi skokowe dla algorytmu DMC

W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście wybrano trzecią odpowiedź skokową przedstawioną na rys. 1.5, tj. skok zakłócenia do wartości $Z=30$. Do przekształcenia zebranej odpowiedzi skokowej skorzystano z przekształcenia:

$$S(i) = \frac{Y(i) - Y_{pp}}{Z_{skok} - Z_{pp}} \quad (1.1)$$

gdzie:

- $S(i)$ - odpowiedź skokowa potrzebna do algorytmu DMC,
- $Y(i)$ - odpowiedź skokowa przed przekształceniem,
- Y_{pp} - wartość wyjścia w chwili $k=0$ (tutaj $Y_{pp} = 27,93$),
- Z_{skok} - wartość sterowanie w chwili $k=0$ i później (tutaj $Z_{skok} = 30$),
- Z_{pp} - wartość sterowania przed chwilą $k=0$ (tutaj $Z_{pp} = 0$)

Otrzymana odpowiedź skokowa dla toru zakłócenie wyjście została przedstawiona na rys. 2.7. Następnie dokonano aproksymacji odpowiedzi skokowej poprzez przybliżenie używając w tym celu członu inercyjnego drugiego stopnia z opóźnieniem:

$$G(s) = \frac{K}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} e^{-T_d s} \quad (1.2)$$

Po dyskretyzacji danej transmitancji otrzymujemy:

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} z^{-T_d} \quad (1.3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -\alpha_1 - \alpha_2 \\
 a_2 &= \alpha_1 \alpha_2 \\
 \alpha_1 &= e^{-\frac{1}{T_1}} \\
 \alpha_2 &= e^{-\frac{1}{T_2}} \\
 b_1 &= \frac{K}{T_1 - T_2} [T_1(1 - \alpha_1) - T_2(1 - \alpha_2)] \\
 b_2 &= \frac{K}{T_1 - T_2} [\alpha_1 T_2(1 - \alpha_2) - \alpha_2 T_1(1 - \alpha_1)]
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Dla otrzymanej w ten sposób transmitancji w postaci dyskretnej napisano funkcję `AproksSkokZak_DMC(X)`, która przyjmowała parametry T_1 , T_2 oraz K . Wartość parametru $T_d = 12$ odczytano z odpowiedzi skokowej, ponieważ jest to opóźnienie. Funkcja ta zwraca sumaryczny błąd kwadratowy pomiędzy aproksymacją otrzymaną dla zadanych parametrów a eksperymentalnie wyznaczoną odpowiedzią skokową dla toru zakłócenie-wyjście. Implementacja funkcji `AproksSkokZak_DMC(X)`:

```
% aproksymacja odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście

function ERR = AproksSkokZak_DMC(X)

    data = load('S_z.mat');
    S_z = data.S_z;

    time = length(S_z);

    T1 = X(1);
    T2 = X(2);
    K = X(3);
    Td = 12;
    z(1:time) = 0;

    alpha1 = exp(-1/T1);
    alpha2 = exp(-1/T2);
    a1 = -alpha1-alpha2;
    a2 = alpha1*alpha2;
    b1 = K*(T1*(1-alpha1)-T2*(1-alpha2))/(T1-T2);
    b2 = K*(alpha1*T2*(1-alpha2)-alpha2*T1*(1-alpha1))/(T1-T2);

    for k = Td+3:time
        z(k) = b1 + b2 - a1*z(k-1) - a2*z(k-2);
    end

    e = S_z - z';

    ERR = (norm(e))^2;

end
```

Do wyznaczenia współczynników transmitancji użyto funkcji `ga` dostępnej w programie MATLAB, która wykorzystuje algorytm generyczny do wyznaczenia minimum funkcji. Dla naszej

funkcji jest to równoważne ze znalezieniem najlepiej dopasowanej aproksymacji odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście. Parametry związane z algorytmem generycznym to kolejno:

$$\begin{aligned} StallGenLimit &= 200 \\ PopulationSize &= 400 \\ FunctionTolerance &= 1e^{-8} \end{aligned} \quad (1.5)$$

gdzie:

- *StallGenLimit* oznacza maksymalną ilość iteracji algorytmu, dla których wartość różnicy między wartościami wyniku funkcji optymalizowanej jest mniejsza niż *FunctionTolerance*.
- *PopulationSize* oznacza ilość ziaren dla algorytmu generycznego w każdej iteracji.
- *FunctionTolerance* oznacza wartość wskaźnika tolerancji, który determinuje dla jakiej dokładności algorytm uznaje, że otrzymany wynik jest ostateczny.

Wybrane wartości powyższych parametrów pozwalają na aproksymację z małym błędem, co sprawdzono poprzez kilkakrotne wywołanie algorytmu i dostrojenie eksperymentalne parametrów. Implementacja optymalizacji:

```
ERR = @(X) AproksSkokZak_DMC(X);

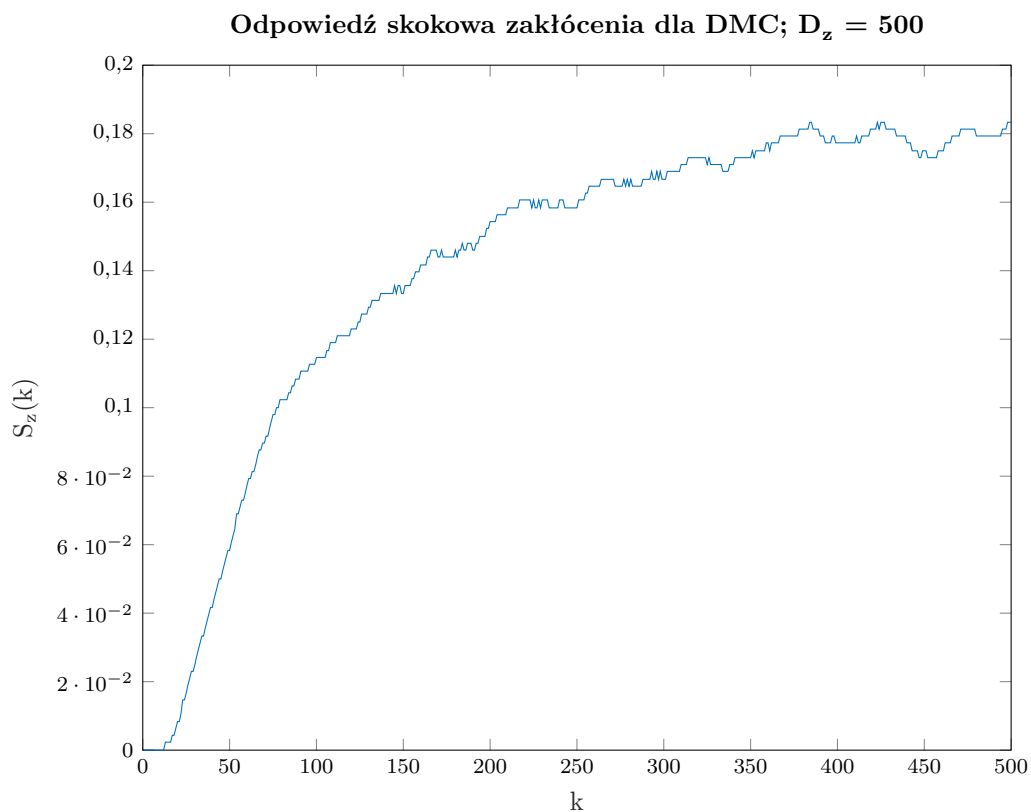
options = optimoptions('ga','StallGenLimit', 200, ...
    'PopulationSize', 400, 'FunctionTolerance', 1e-8);
[x_apro_zak, Err_apro_zak] = ga(ERR, 3, [], [], [], ...
    [], [], [], [], [], options);

fprintf('\nT1 = %f; T2 = %f; K = %f;\n', x_apro_zak)
% T1=88.311400; T2=0.010351; K=0.177293;
```

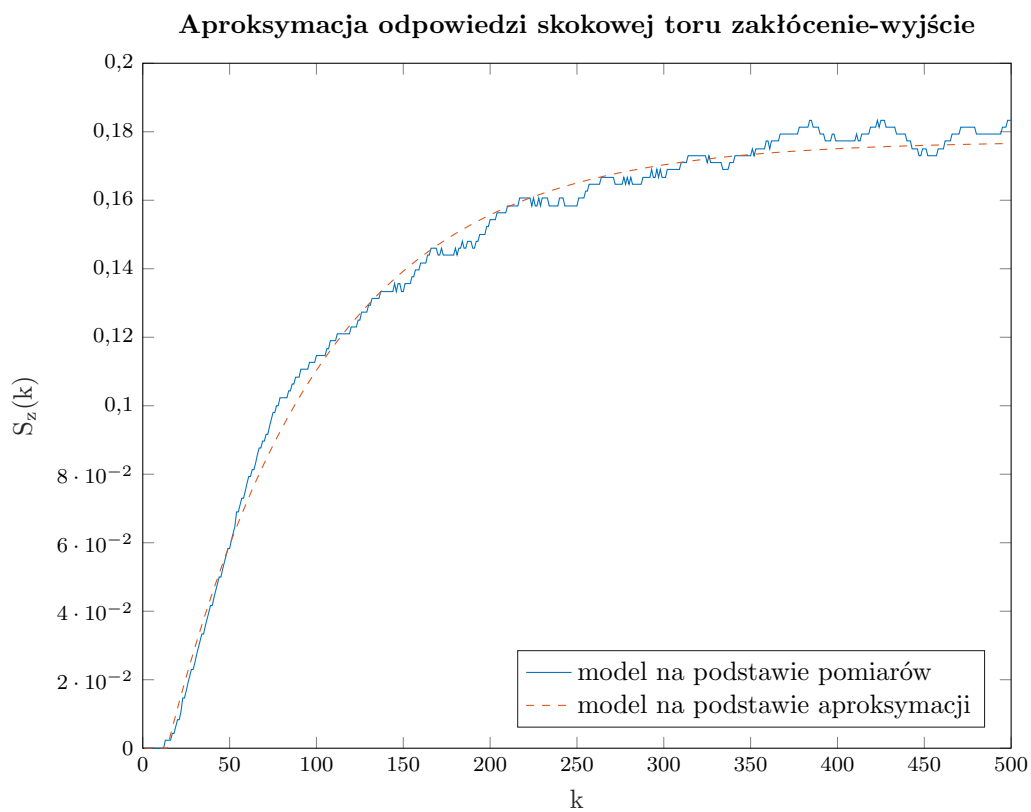
Ponieważ do minimalizacji funkcji użyto algorytmu generycznego to wyniki podczas kolejnych odtworzeń mogą się różnić. Jednak po wykonaniu testów, dla których błąd aproksymacji był bardzo zbliżony przyjęto wartości parametrów:

$$\begin{aligned} K &= 0.1772938 \\ T_1 &= 88.311400 \\ T_2 &= 0.010351 \\ T_d &= 12 \end{aligned} \quad (1.6)$$

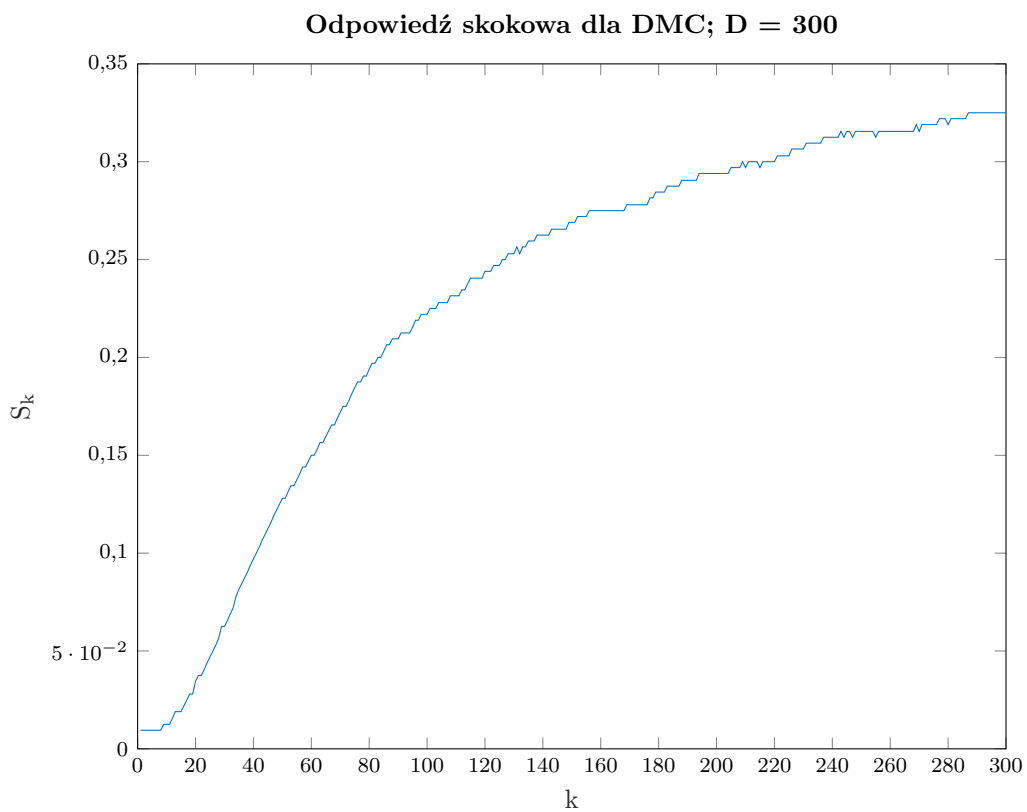
Otrzymałą aproksymowaną odpowiedź skokową dla toru zakłócenie-wyjście dla algorytmu regulacji DMC przedstawiono na rys. 1.7. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście dla algorytmu DMC została zaczerpnięta z laboratorium nr 1, przedstawiono ją na rys. 1.8. Analogicznie jak dla odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście wykonano dla niej aproksymację przedstawioną na rys. 1.9.



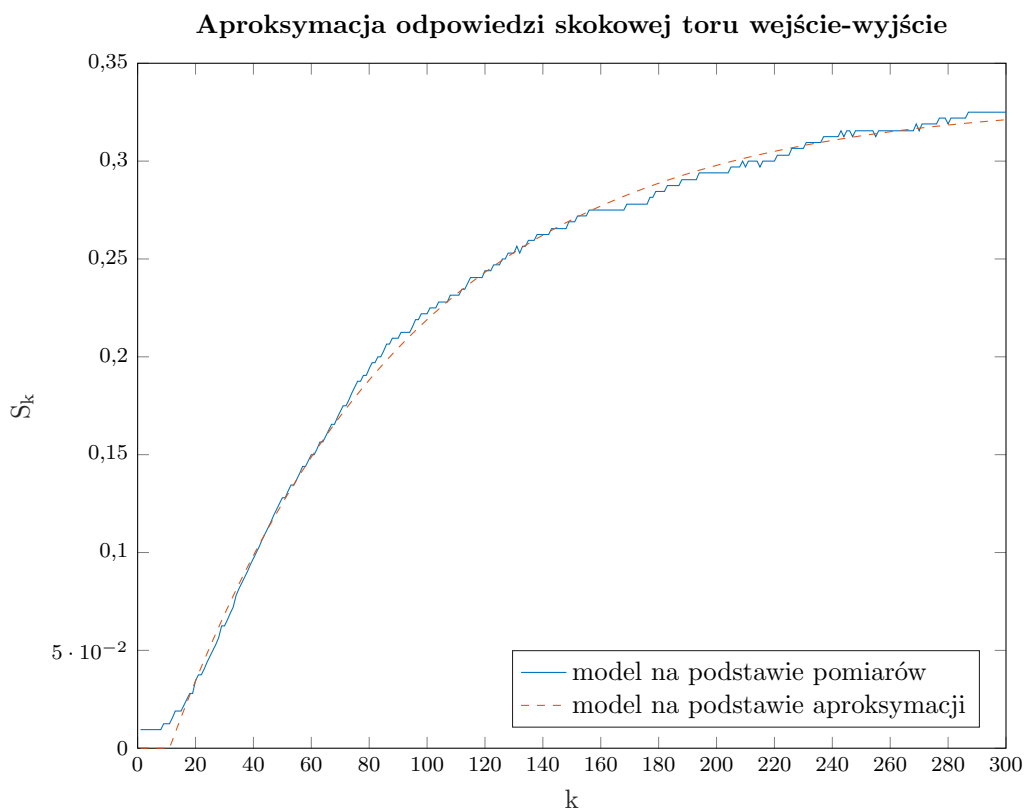
Rys. 1.6. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjscie dla algorytmu DMC.



Rys. 1.7. Aproksymacja odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjscie dla algorytmu DMC.



Rys. 1.8. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyście dla algorytmu DMC.



Rys. 1.9. Aproksymacja odpowiedzi skokowej toru wejście-wyście dla algorytmu DMC.

6. Algorytm DMC z pomiarem zakłóceń

Do sterowania procesem zaimplementowano algorytm DMC z pomiarem zakłóceń w języku MATLAB.

```
%implementacja DMC z pomiarem zaklocen
function U = DMC_zak(yzad, y, D, z, Dz, N, Nu, lambda)

    persistent init
    persistent S
    persistent S_z
    persistent M
    persistent Mp
    persistent Mzp
    persistent K
    persistent dUP
    persistent dZP
    persistent zp
    persistent Upop

    if isempty(init)
        %liczone offline
        % Wczytanie macierzy S z pliku dane1.mat
        data = load('dane1.mat');
        S = data.S;

        % Wczytanie macierzy S_z
        data2 = load('S_z.mat');
        S_z = data2.S_Z;

        %
        data3 = load('S_z_apro.mat');
        %
        S_z = data3.S_Z_apro;

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

        % przedluzenie wektora S_z
        for i = Dz+1:Dz+N
            S_z(i) = S_z(Dz);
        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

    Mzp = zeros(N, Dz);
    Mzp(1:N, 1) = S_z(1:N);
    for i = 2:Dz
        Mzp(1:N, i) = S_z(i:N+i-1) - S_z(i-1);
    end

    I = eye(Nu);

    K = ((M*M + lambda*I)^(-1))*M';
    dUP = zeros(D-1,1);
    dZP = zeros(Dz,1);
    Upop = 26;
    zp = 0;
    init = 1;
end

% Ograniczenia sterowania
Gmax = 100;
Gmin = 0;

Y0 = zeros(N,1);
dU = zeros(Nu,1);

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

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

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

for n = Dz:-1:2
    dZP(n) = dZP(n-1);
end
dZP(1) = z - zp;
zp = z;

U = Upop + du;

% ograniczenia sterowania
if U > Gmax
    U = Gmax;

```

```

end

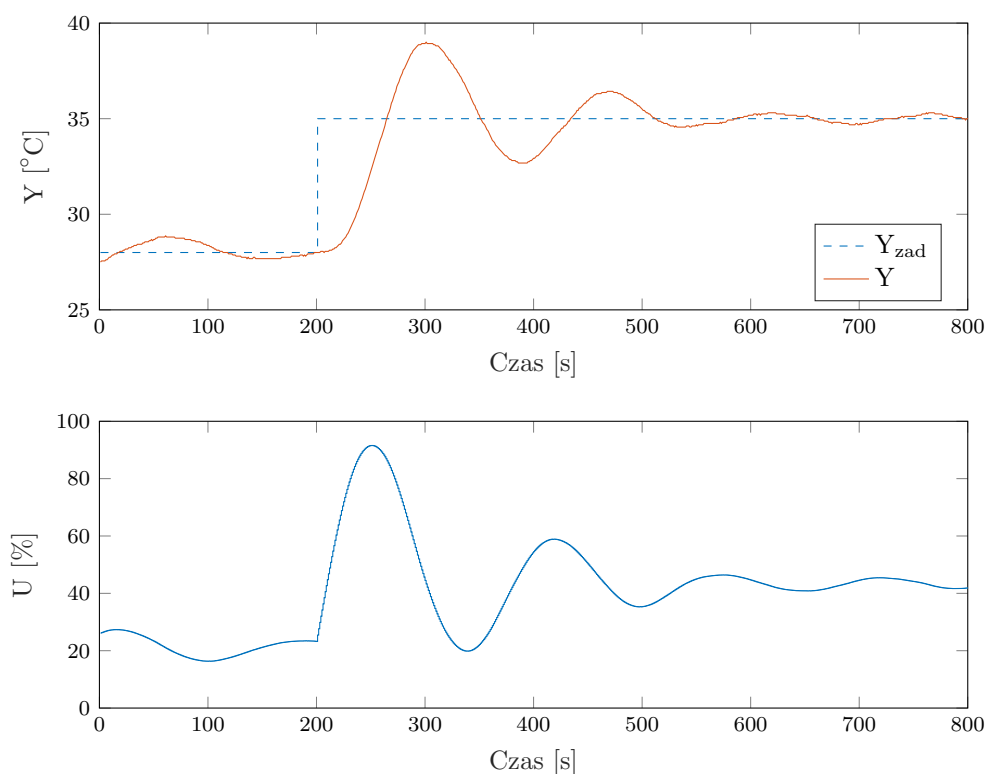
if U < Gmin
    U = Gmin;
end

Upop = U;
end

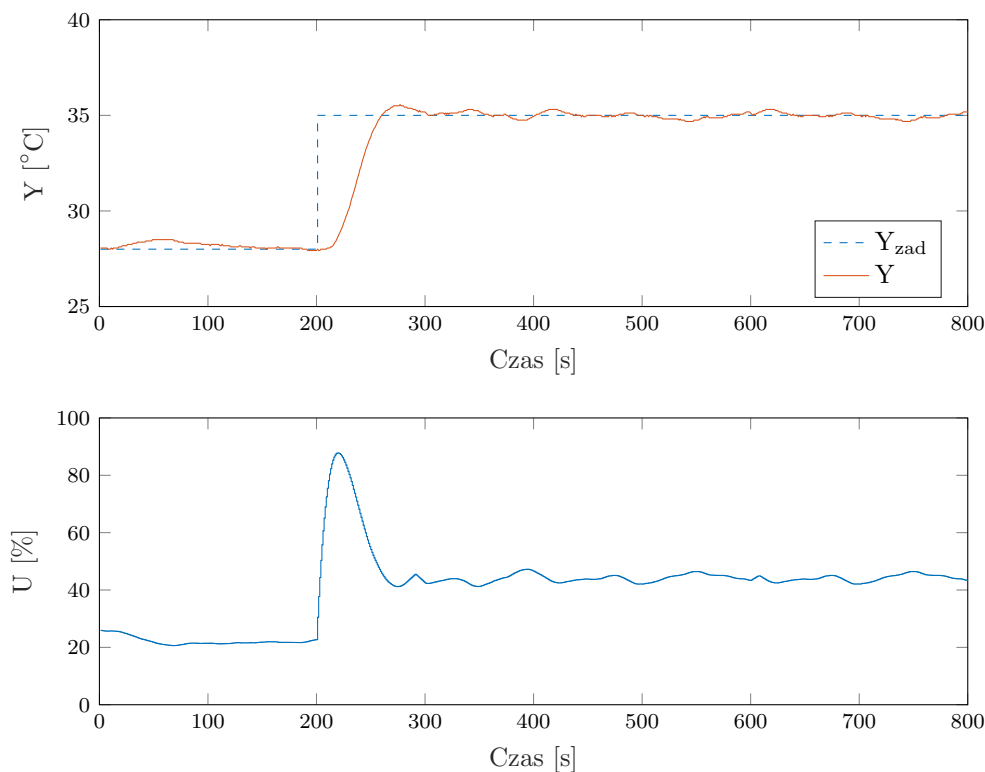
```

7. Dobór parametrów dla algorytmu DMC

W celu doboru parametrów algorytmu DMC zadawano skokową wartość sygnału temperatury zadanej z punktu pracy $G1=26$, $T1=28,12^{\circ}\text{C}$ do temperatury zadanej 35°C . Eksperymenty dla wybranych parametrów przedstawiono na rys. 1.10 i 1.11. Można zauważyć, że parametry są dobrane znacznie lepiej dla eksperymentu drugiego (rys. 1.11). Ilościowa jakość regulacji jest znacząco lepsza, błąd jest prawie 2-krotnie mniejszy. Porównując jakościowo regulację zauważalne jest znacznie mniejsze przesterowanie od wartości zadanej temperatury. W porównaniu do pierwszego eksperymentu dla drugiego praktycznie niezauważalne są oscylacje sygnału wyjściowego. W dalszej części laboratorium przyjęto właśnie te parametry algorytmu DMC: $D = 300$, $N = 50$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.



Rys. 1.10. Dobór parametrów dla algorytmu DMC: $D=300$, $N=10$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$.
Wskaźnik jakości regulacji $E=2808$.



Rys. 1.11. Dobór parametrów dla algorytmu DMC: $D=300$, $N=50$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.
Wskaźnik jakości regulacji $E=1467$.

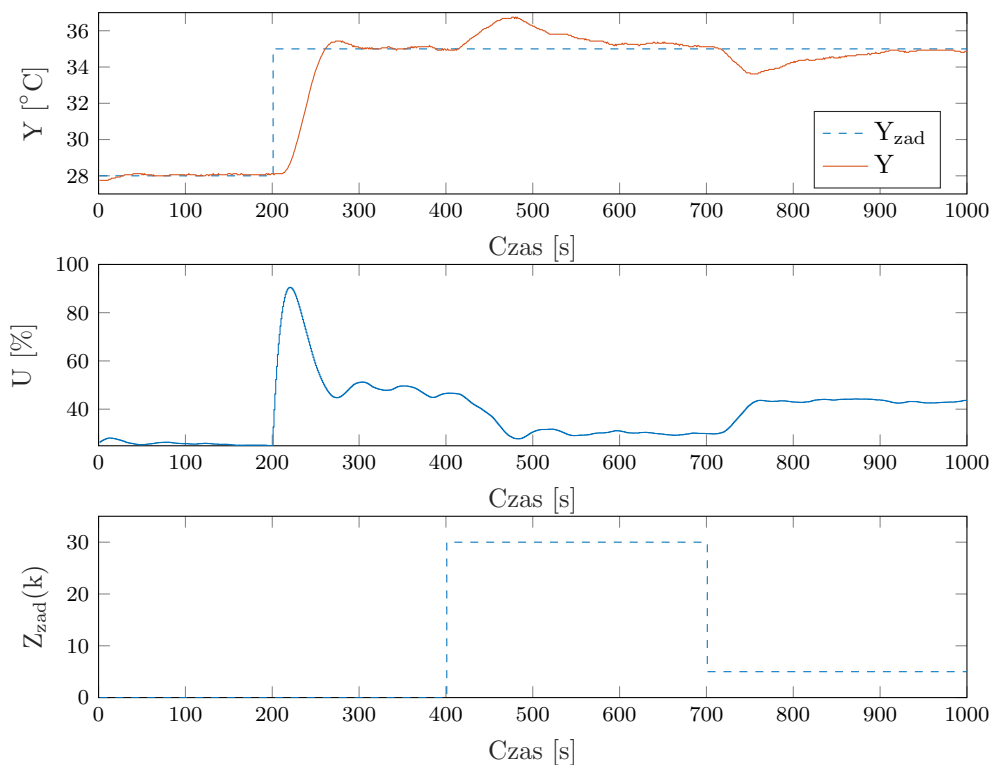
8. Regulacja procesu bez pomiaru zakłócenia

Do regulacji przyjęto parametr $D_z = 500$, ponieważ dla tej ilości iteracji ustalała się odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście. Regulację z wykorzystaniem algorytmu DMC bez pomiaru zakłócenia przedstawiono na rys. 1.12. Na wykresie wartości wyjściowej procesu można zauważyć znaczące odchylenia od wartości zadanej w momentach skoków zakłócenia, tj. 300[s] oraz 700[s].

9. Regulacja procesu z pomiarem zakłócenia

Regulację z wykorzystaniem algorytmu DMC z eksperymentalnie wyznaczoną odpowiedzią skokową toru zakłócenie-wyjście z pomiarem zakłócenia przedstawiono na rys. 1.13. Można zauważyć znaczącą poprawę jakości regulacji względem regulacji bez pomiaru zakłócenia. Widoczna jest poprawa wskaźnika jakości regulacji oraz zauważalnie mniejsze odchylenia od wartości zadanej podczas występowania skoków zakłóceń.

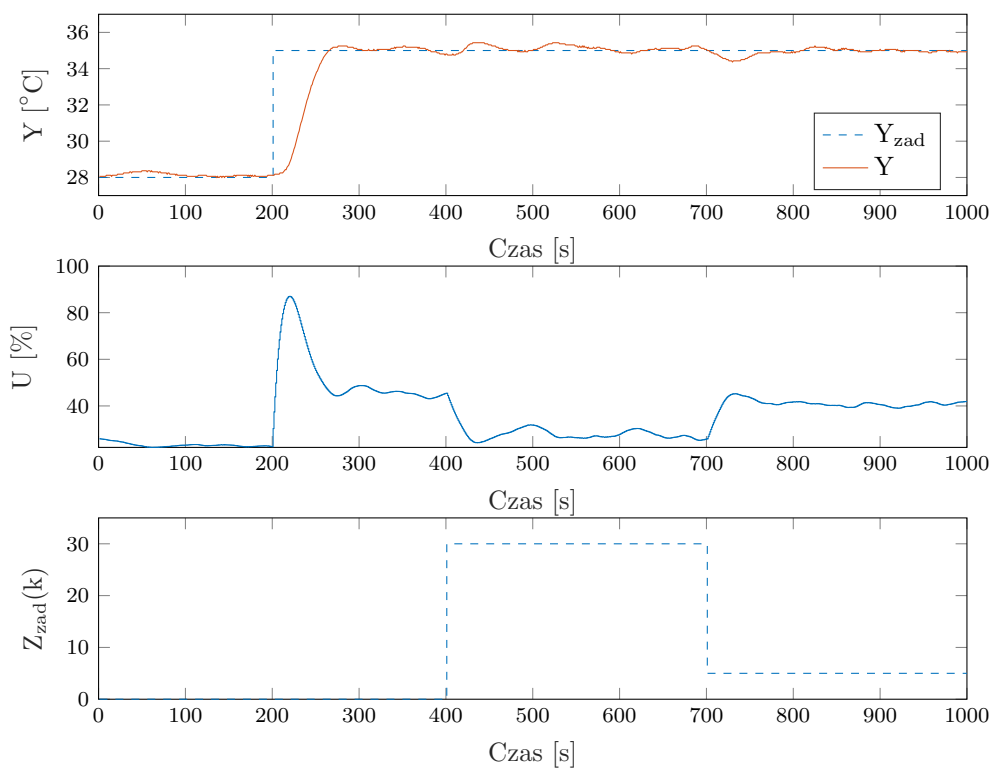
W celu eksperymentalnym wykonano regulację z wykorzystaniem algorytmu DMC z aproksymowaną odpowiedzią skokową toru zakłócenie-wyjście z pomiarem zakłócenia. Wyniki przedstawione są na rys. 1.14. Jakość regulacji jest porównywalna do otrzymanej z wykorzystaniem eksperymentalnie uzyskanej odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście. Zarówno jakościowa jak i ilościowa analiza tych regulacji nie pozwala jednoznacznie stwierdzić, który wybór odpowiedzi skokowej jest lepszy. Niewielkie różnice w jakości regulacji mogą wynikać z innych niemierzonych zakłóceń, takich jak przepływ powietrza w pracowni laboratoryjnej.



Rys. 1.12. Regulacja z wykorzystaniem algorytmu DMC bez pomiaru zakłóceń.

Użyte parametry DMC: $D_z = 500$, $D = 300$, $N = 50$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.

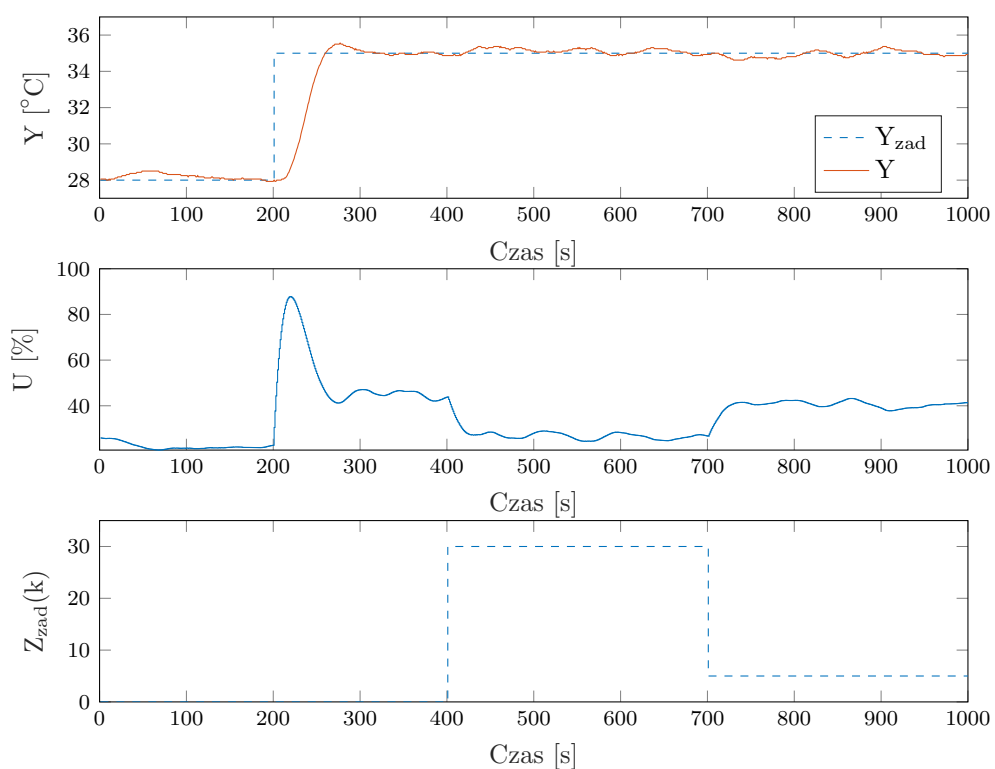
Wskaźnik jakości regulacji $E=1750$.



Rys. 1.13. Regulacja z wykorzystaniem algorytmu DMC z pomiarem zakłóceń, odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście wyznaczona eksperymentalnie.

Użyte parametry DMC: $D_z = 500$, $D = 300$, $N = 50$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.

Wskaźnik jakości regulacji $E=1391$.



Rys. 1.14. Regulacja z wykorzystaniem algorytmu DMC z pomiarem zakłóceń, odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście wyznaczona aproksymacyjnie.

Użyte parametry DMC: $D_z = 500$, $D = 300$, $N = 50$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.

Wskaźnik jakości regulacji $E=1477$.

2. Projekt

1. Informacje wstępne

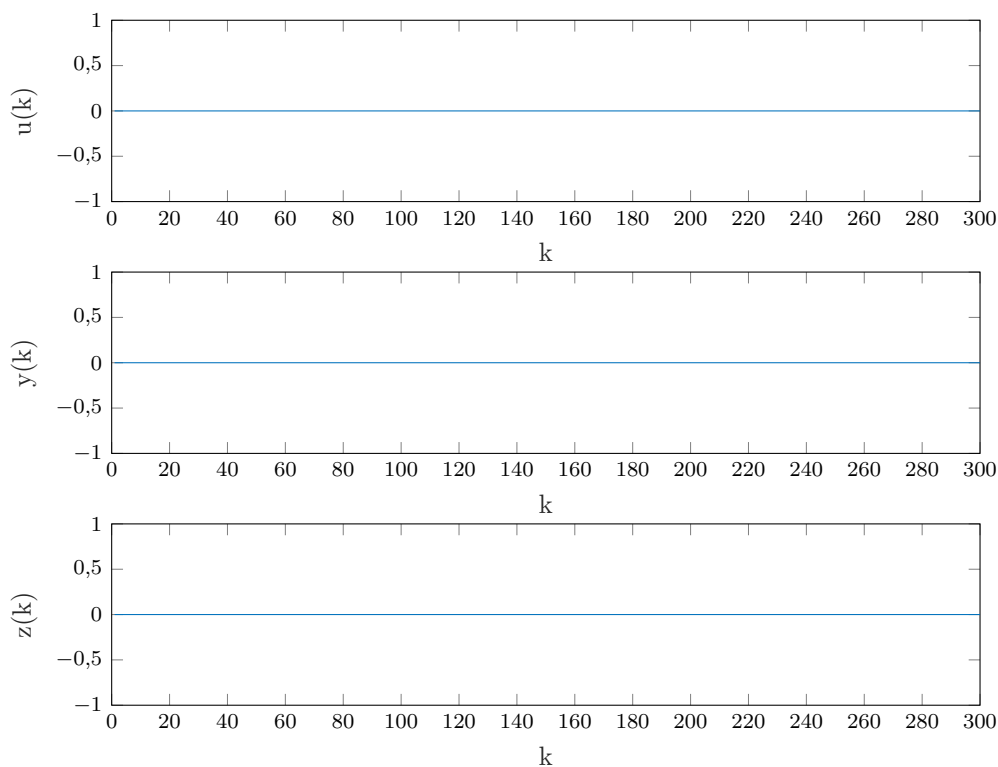
Zadanie projektowe wykorzystywało symulowany obiekt regulacji. Wyjście obiektu można wyznaczyć przy pomocy polecenia:

$$y(k) = \text{symulacja_obiektu1y_p2}(u(k-6), u(k-7), z(k-2), z(k-3), y(k-1), y(k-2))$$

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

2. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

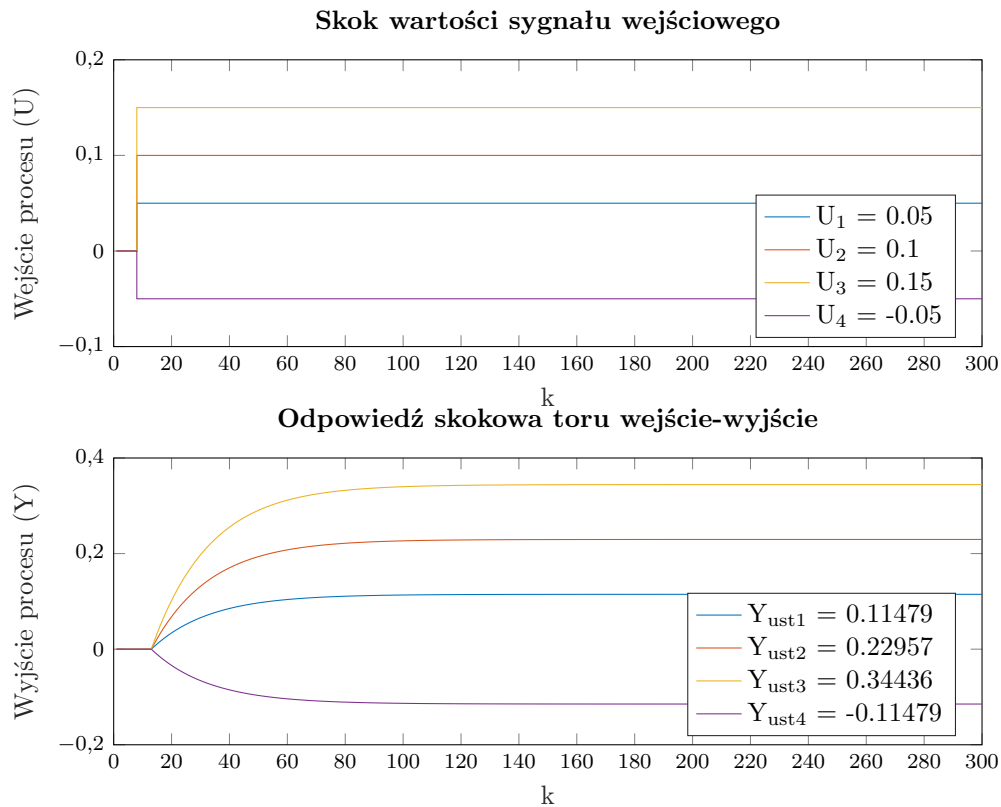
W celu sprawdzenia poprawności punktu pracy została przeprowadzona symulacja, gdzie na wejście podano sterowanie $u = 0$, jako poprzednie wartości wyjścia podano $y = 0$, wartość zakłócenia podano $z = 0$ i sprawdzono wartość wyjścia procesu w następnych chwilach. Wyniki symulacji przedstawiono na rys.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



Rys. 2.1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

3. Odpowiedzi skokowe toru wejście-wyście

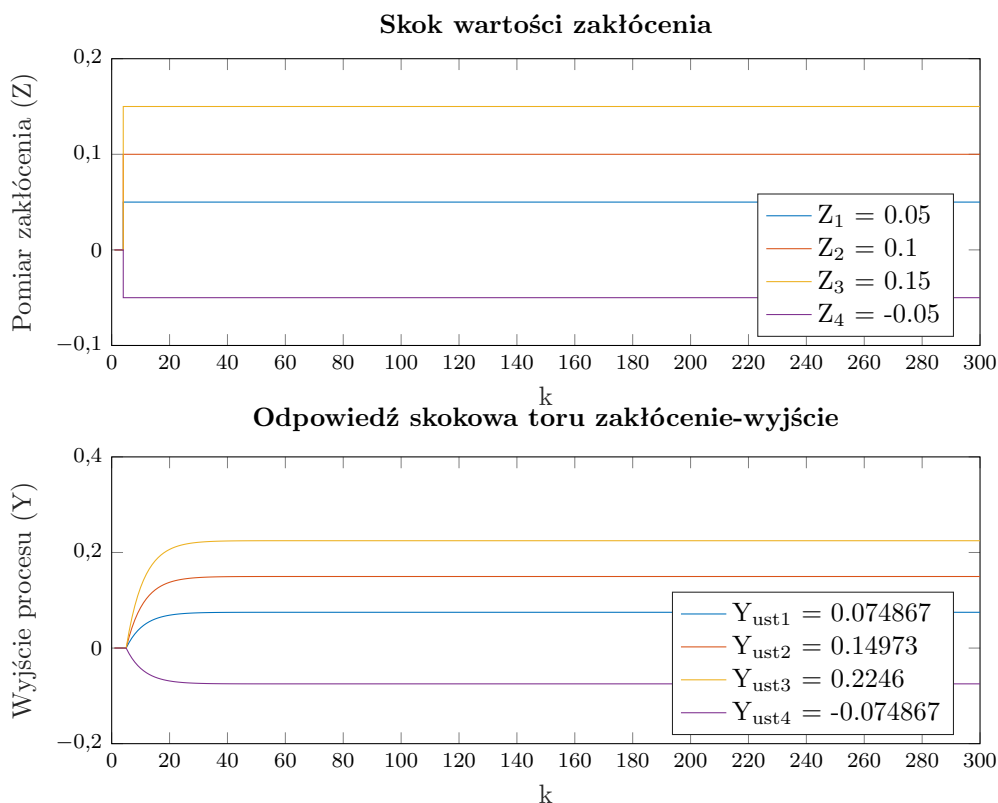
Wyznaczone zostały odpowiedzi skokowe dla kilku skoków wartości sygnału sterującego, gdzie wartość początkowa sterowania wynosiła $u=0$. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Odpowiedzi skokowe toru wejście-wyście.

4. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyście

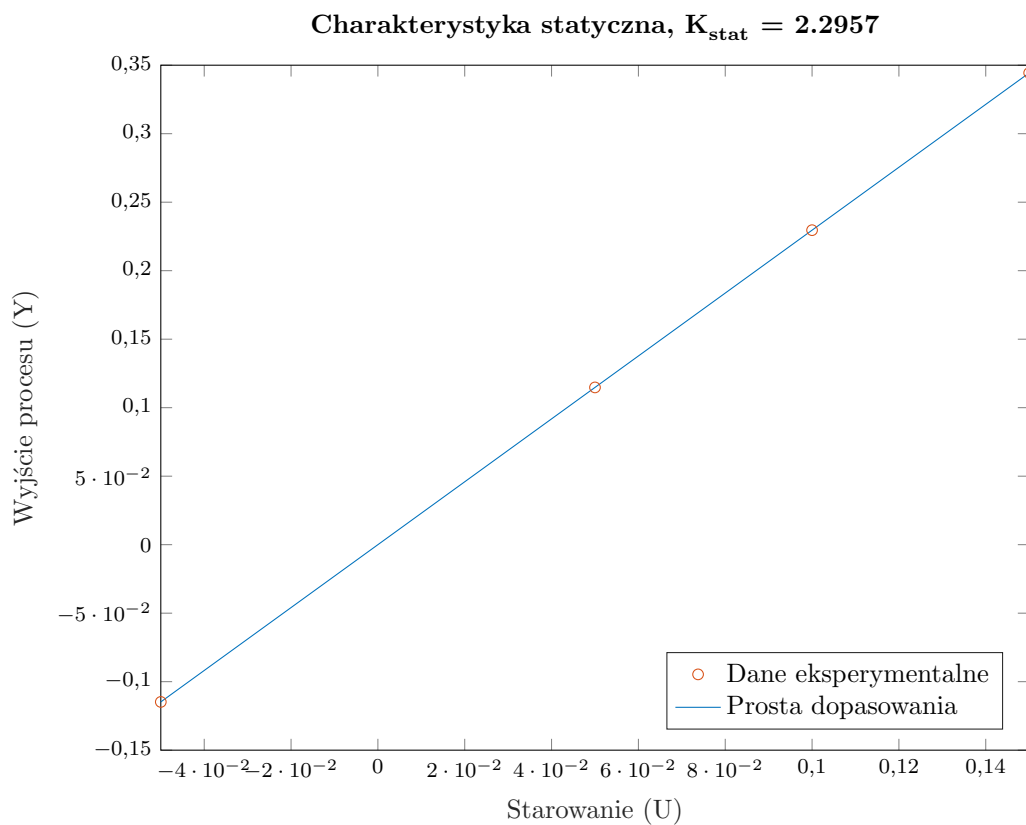
Wyznaczone zostały odpowiedzi skokowe dla kilku skoków zakłócenia mierzonego, gdzie wartość początkowa zakłócenia wynosiła $z=0$. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 2.3.



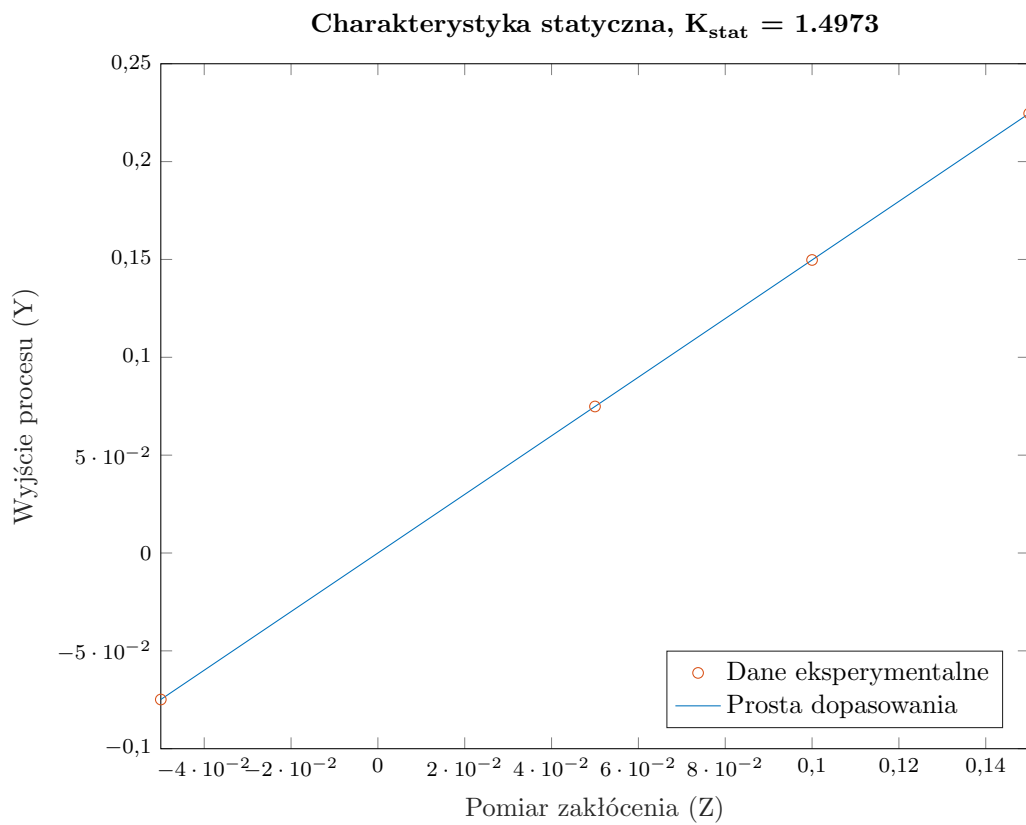
Rys. 2.3. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście.

5. Charakterystyki statyczne torów procesu

Na podstawie odpowiedzi skokowych wyznaczono charakterystyki statyczne dla toru wejście-wyjście (rys. 2.4) oraz toru zakłócenie-wyjście (rys. 2.5) korzystając z ustalonych wartości wyjścia dla zadawanych sygnałów, odpowiednio wejścia i zakłócenia. Z wykresów widać, że właściwości procesu są w przybliżeniu liniowe. Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono wzmocnienia statyczne tych procesów. Dla toru wejście-wyjście otrzymano $K_{stat} = 2.2957$, zaś dla toru zakłócenie-wyjście otrzymano $K_{stat} = 1.4973$.



Rys. 2.4. Charakterystyka statyczna dla toru wejście-wyjście

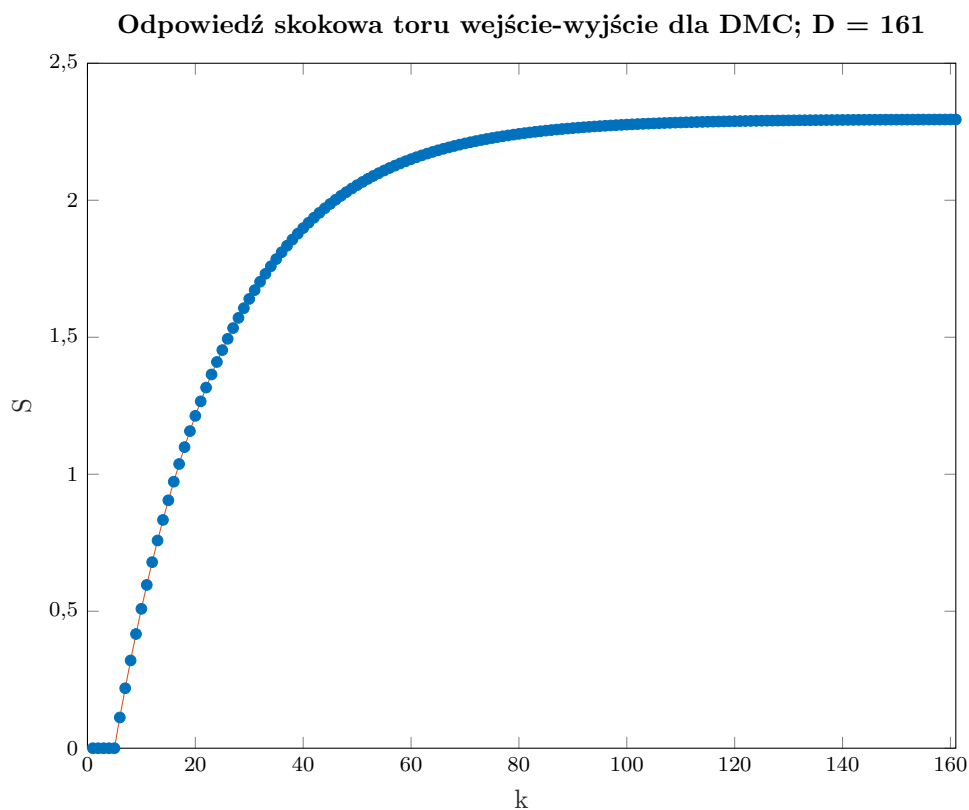


Rys. 2.5. Charakterystyka statyczna dla toru zakłócenie-wyjście

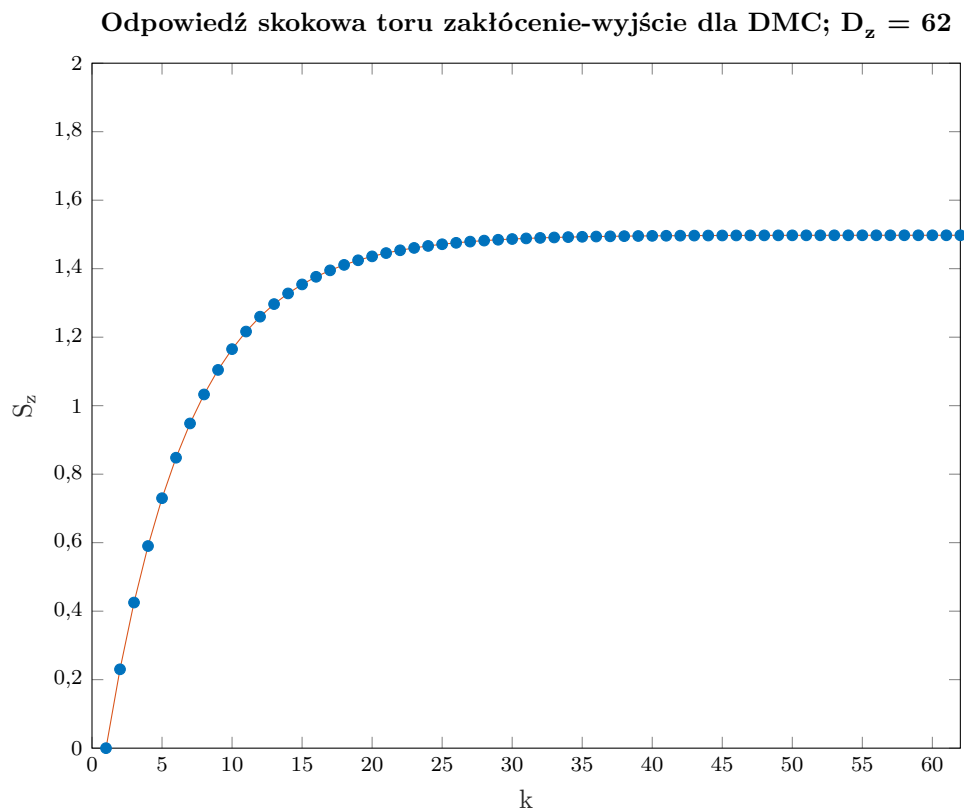
6. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych wykorzystywanych w algorytmie DMC

W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowej dla algorytmu DMC toru wejście-wyście dla symulowanego procesu wykonano skok wartości sterowania od 0 do 1 w chwili $k=0$. Odpowiedź skokowa dla tego toru znajduje się na rys. 2.6.

W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowej dla algorytmu DMC toru zakłócenie-wyście dla symulowanego procesu wykonano skok wartości zakłócenia od 0 do 1 w chwili $k=0$. Odpowiedź skokowa dla tego toru znajduje się na rys. 2.7.



Rys. 2.6. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyście dla algorytmu DMC.



Rys. 2.7. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście dla algorytmu DMC.

7. Implementacja algorytmu regulacji DMC dla procesu symulowanego

```
% maierz S i Sz tworzone sa plikach skokDMCSterowanie.m i skokDMCZaklocenie.m
load S
load Sz

% Punkt pracy
Upp = 0;
Ypp = 0;
Zpp = 0;

% Czas symulacji
time = 400;

Yzad(time,1) = 0;
Yzad(1:50) = Ypp;
Yzad(51:time) = 1;

% Parametry
N = 20; Nu = 20; lambda = 0.1;

U(1:time) = Upp;
Y(1:time) = Ypp;
Z(1:time) = Zpp;

Noise(1:time) = wgn(1,time,0.01)*0.05;

e(1:time) = 0;

% -----ALGORYTM DMC-----
```

```

% Obliczenia offline
S = [S; zeros(N,1)];
for i = D+1:D+N
    S(i) = S(D);
end

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

Sz = [Sz; zeros(N,1)];
for i = Dz+1:Dz+N
    Sz(i) = Sz(Dz);
end

Mpz = zeros(N, Dz);
for i = 1:(Dz)
    Mpz(1:N,i) = Sz(i+1:N+i) - Sz(i);
end

I = eye(Nu);
K = ((M'*M + lambda*I)^(-1))*M';

% inicjalizacja
dUP = zeros(D-1,1);
dZP = zeros(Dz, 1);
Y0 = zeros(N,1);
dU = zeros(Nu,1);
Yzad_DMC = zeros(N,1);
Y_DMC = zeros(N,1);

u = U - Upp;
yzad = Yzad - Ypp;

y(1:time) = 0;
u(1:time) = 0;

% liczone online
for k = 8:time
    Y(k) = symulacja_obiektu1y_p2(U(k-6),U(k-7),Z(k-2),Z(k-3),Y(k-1),Y(k-2));
    y(k) = Y(k) - Ypp;
    e(k) = (yzad(k) - y(k))^2;

    Yzad_DMC = yzad(k)*ones(N,1);
    Y_DMC = y(k)*ones(N,1);

    dZP(2:Dz) = dZP(1:Dz-1);
    dZP(1) = Z(k) - Z(k-1) + Noise(k);
    Y0 = Y_DMC + Mp*dUP + Mpz*dZP;
    dU = K*(Yzad_DMC - Y0);
    du = dU(1);

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

```

```

    u(k) = u(k-1) + du;

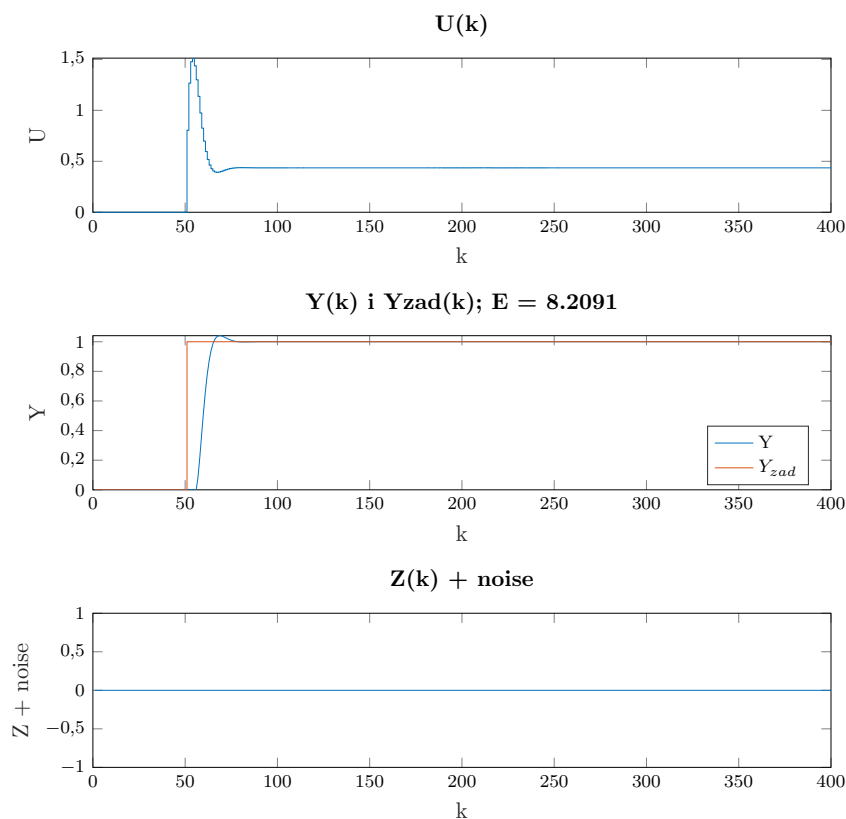
    U(k) = u(k) + Upp;
end

E = 0;
for k = 8:time
    E = E + e(k);
end

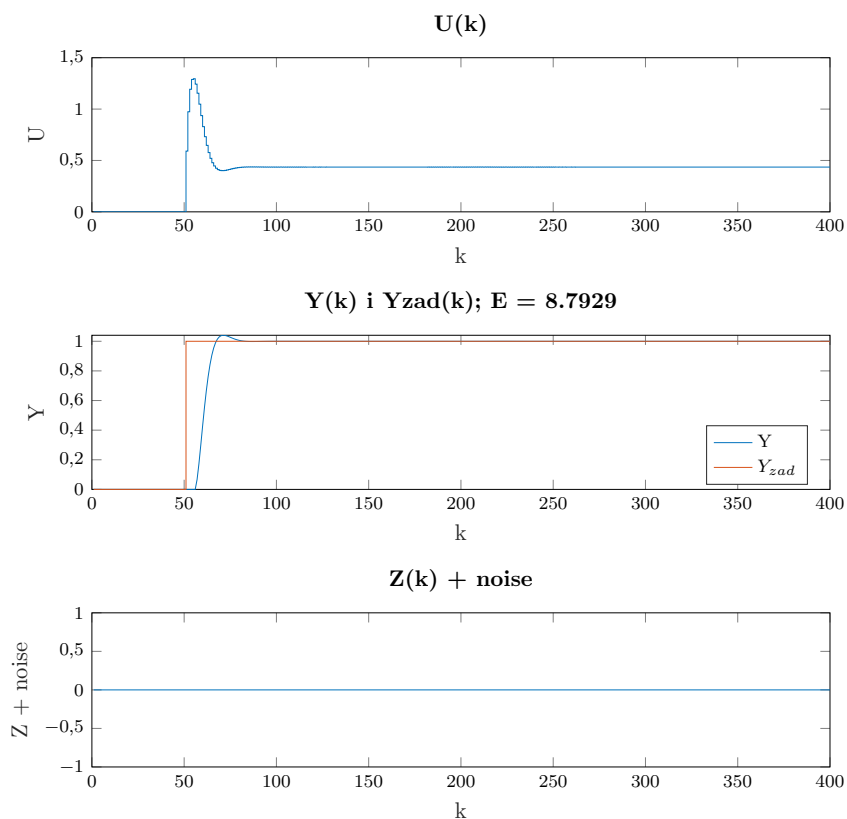
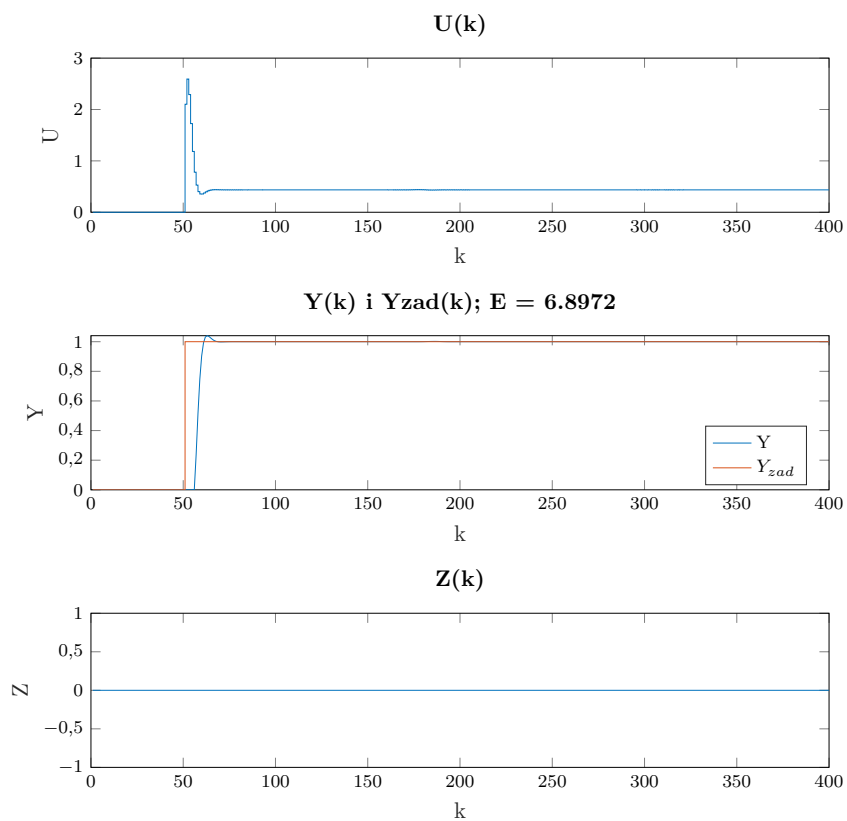
```

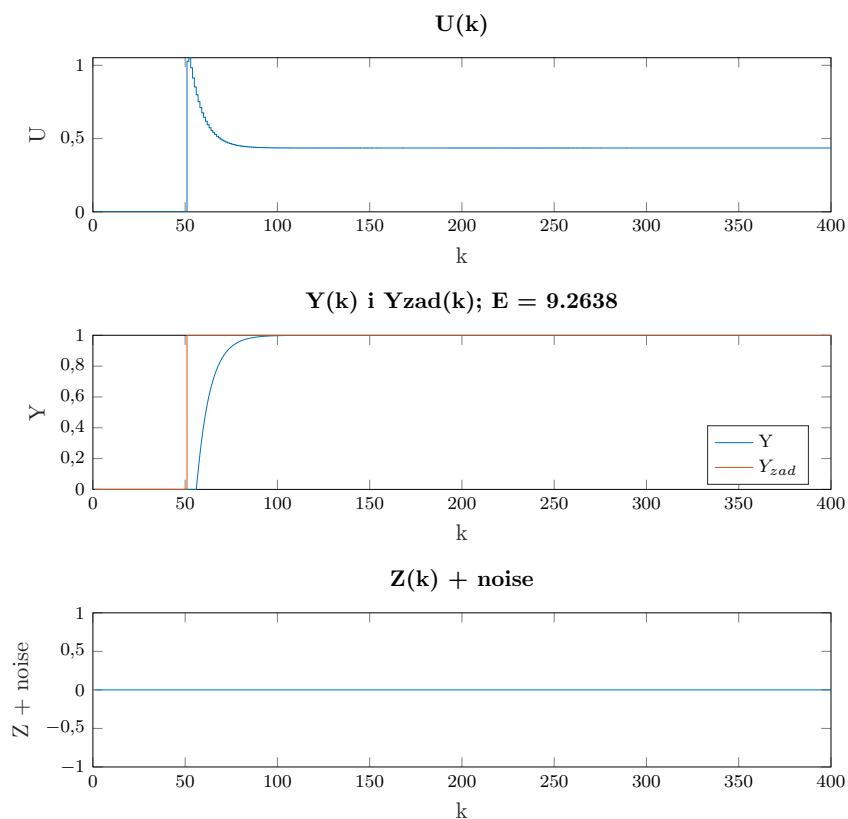
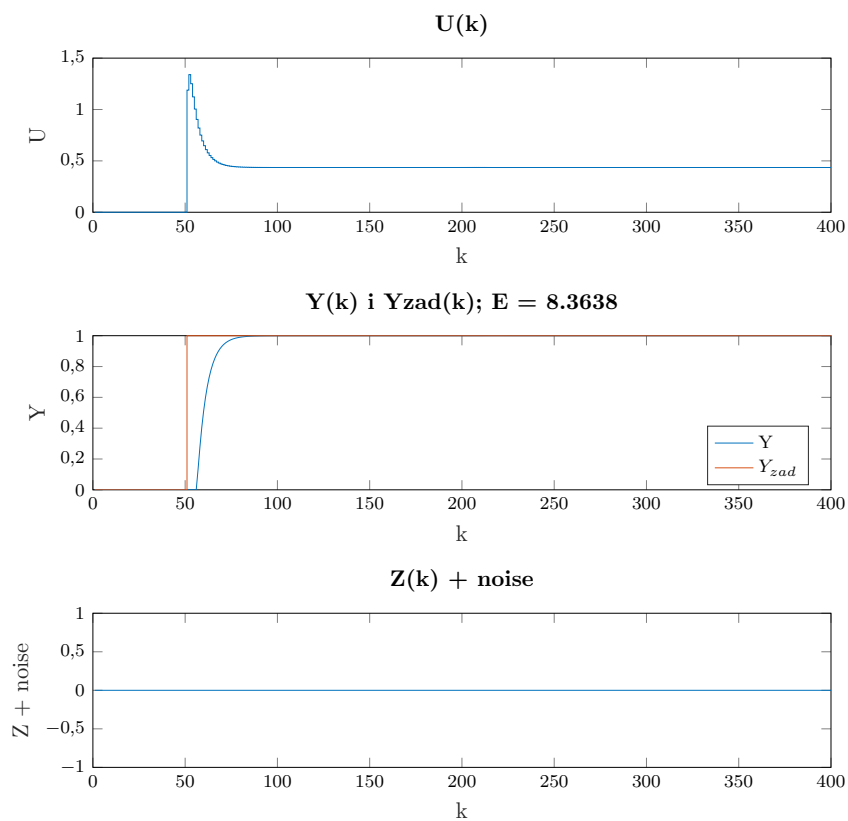
8. Dobór parametrów algorytmu DMC

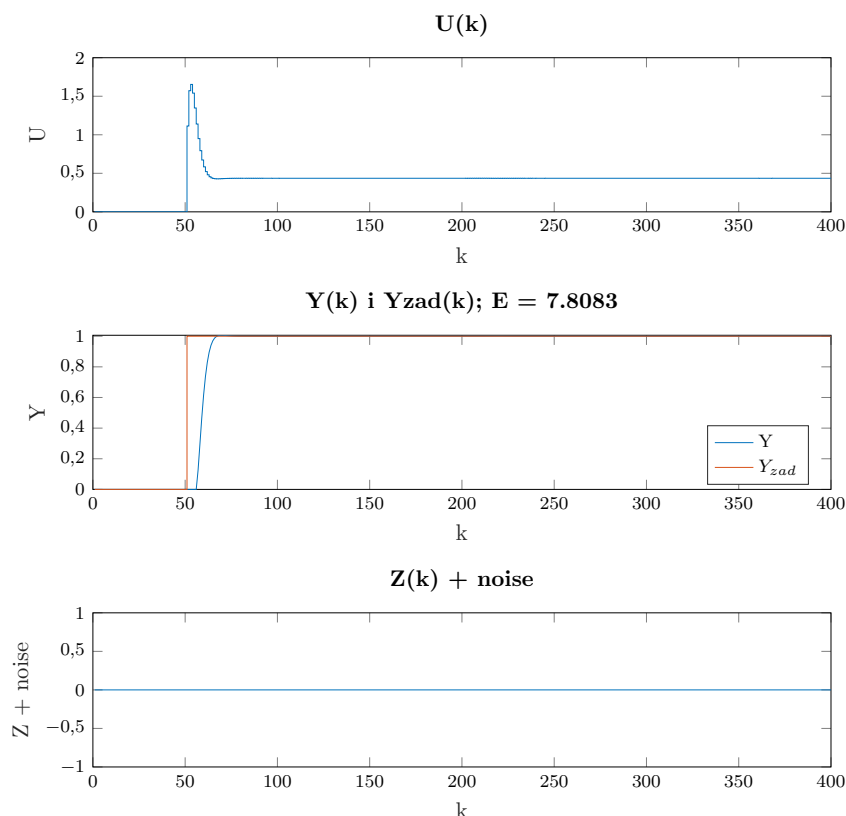
Dobór parametrów dla regulatora DMC odbywał się w następujący sposób. W pierwszej kolejności zostały wybrane duże wartości parametrów N i N_u , natomiast dla parametru λ przyjęto standardowo wartość 1. Następnie parametry były najczęściej zmniejszane, ale również modyfikowane według intuicji inżynierskiej. Patrząc na wyniki symulacji można było wybrać najlepszy nastaw. Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że dla parametrów: $N = 20$, $N_u = 20$, $\lambda = 0.1$ wyniki regulacji są najlepsze. Dla mniejszych wartości horyzontu predykcji i sterowania wyniki znacząco się pogarszają, natomiast dla większych nie jest zauważalna znacząca zmiana. Wybrane eksperymenty zostały pokazane na rys. 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13.



Rys. 2.8. Regulator DMC dla parametrów: $N=60$, $N_u = 40$, $\lambda = 1$.

Rys. 2.9. Regulator DMC dla parametrów: $N=40$, $N_u = 20$, $\lambda = 2$.Rys. 2.10. Regulator DMC dla parametrów: $N=20$, $N_u = 20$, $\lambda = 0.1$.

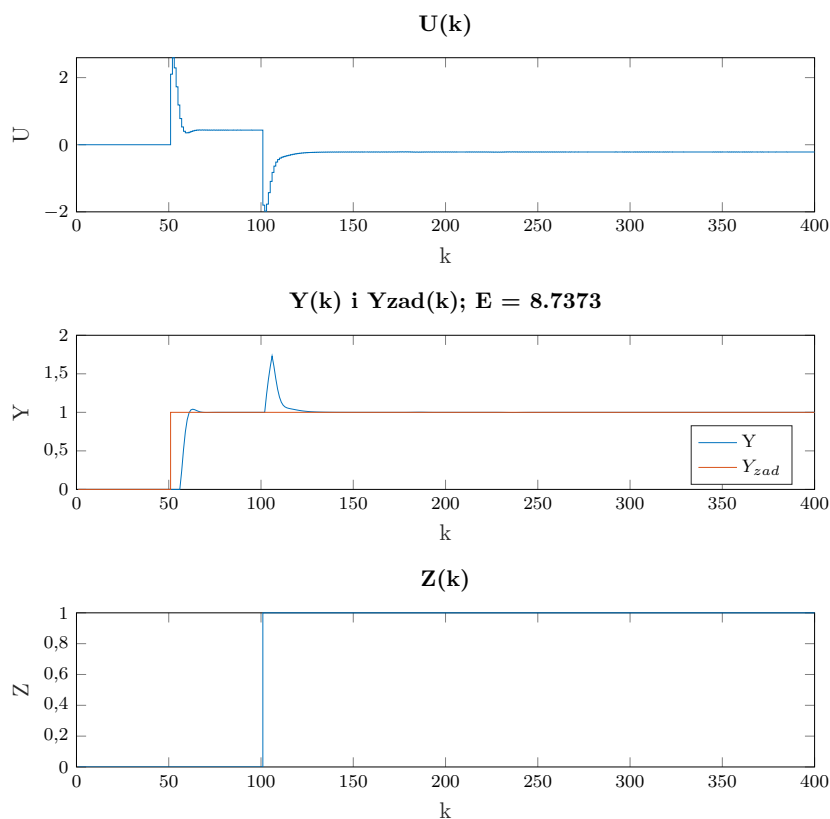
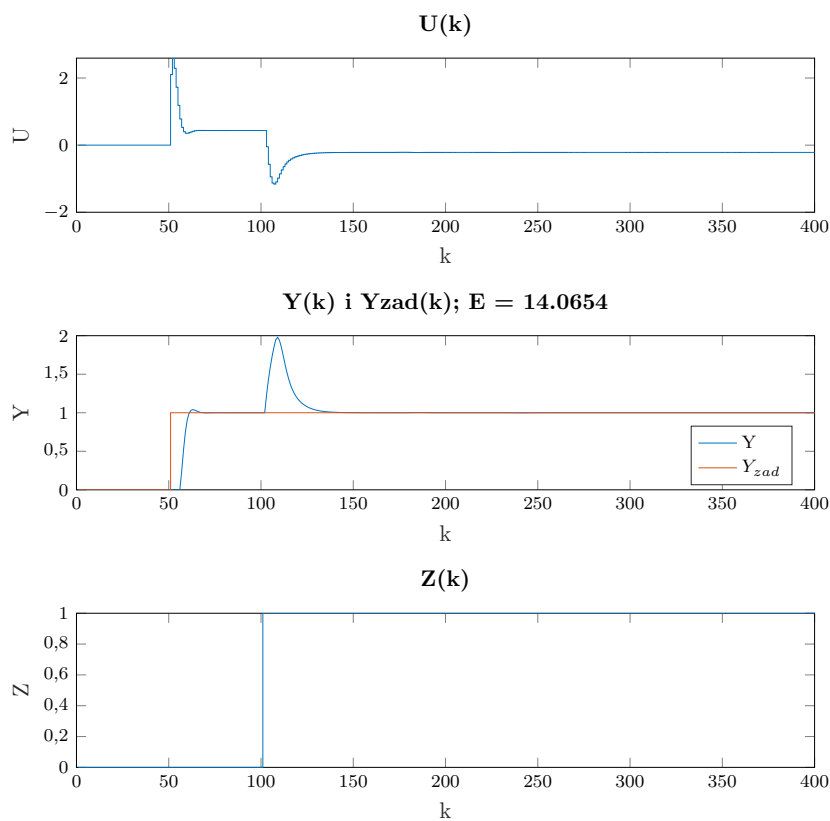
Rys. 2.11. Regulator DMC dla parametrów: $N=20$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$.Rys. 2.12. Regulator DMC dla parametrów: $N=15$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$.



Rys. 2.13. Regulator DMC dla parametrów: $N=11$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$.

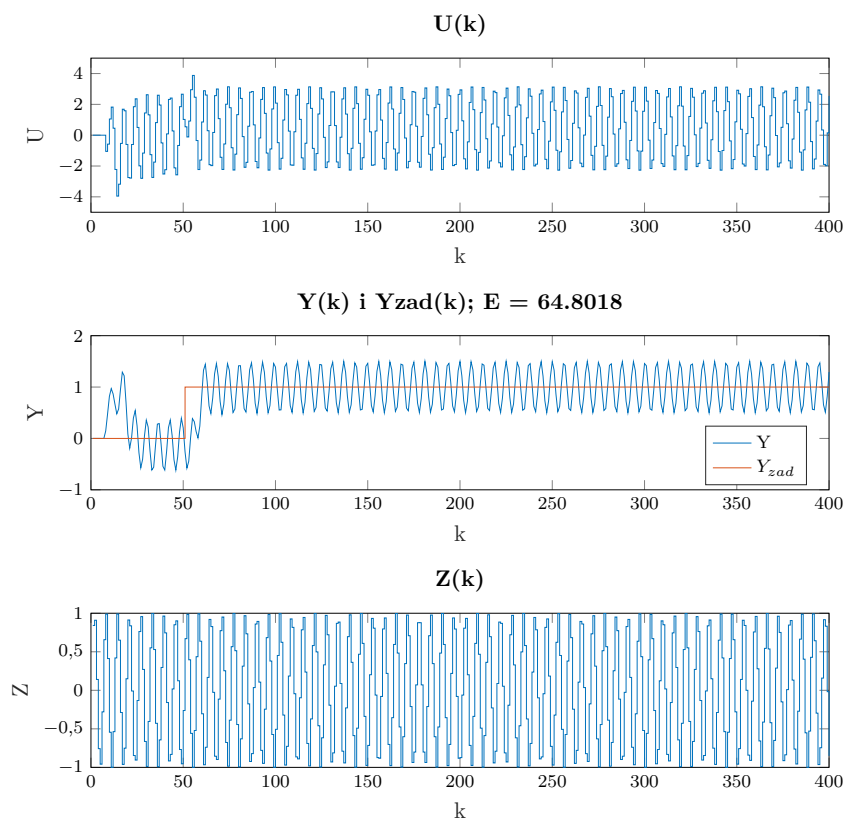
9. Porównanie regulacji DMC z pomiarem zakłócenia oraz bez pomiaru

Aby sprawdzić poprawność kompensacji zakłóceń został przeprowadzony eksperyment ze skokiem wartości zadanej, po której nastąpił skok wartości zakłócenia (po uprzednim ustaleniu się wartości zadanej). Eksperyment został przeprowadzony dla zwykłego DMC oraz dla DMC wraz z kompensacją zakłóceń. Z wykresów (2.14, 2.15) można łatwo wyczytać, że DMC z kompensacją zakłóceń radzi sobie lepiej dla takiego sygnału zakłóceń. Jest to głównie spowodowane szybkością z jaką DMC reaguje na zmianę wartości zakłócenia. Algorytm z kompensacją reaguje w tej samej iteracji, w której nastąpiła zmiana zakłócenia, przez co proces szybciej powraca do wartości zadanej. Z kolei algorytm DMC w najprostrzej wersji analitycznej musi poczekać, aż zakłócenie to przepropaguje się na wartość wyjściową sygnału, ponieważ dopiero wtedy jest w stanie "zauważyć" zmianę zakłócenia i na nią zareagować.

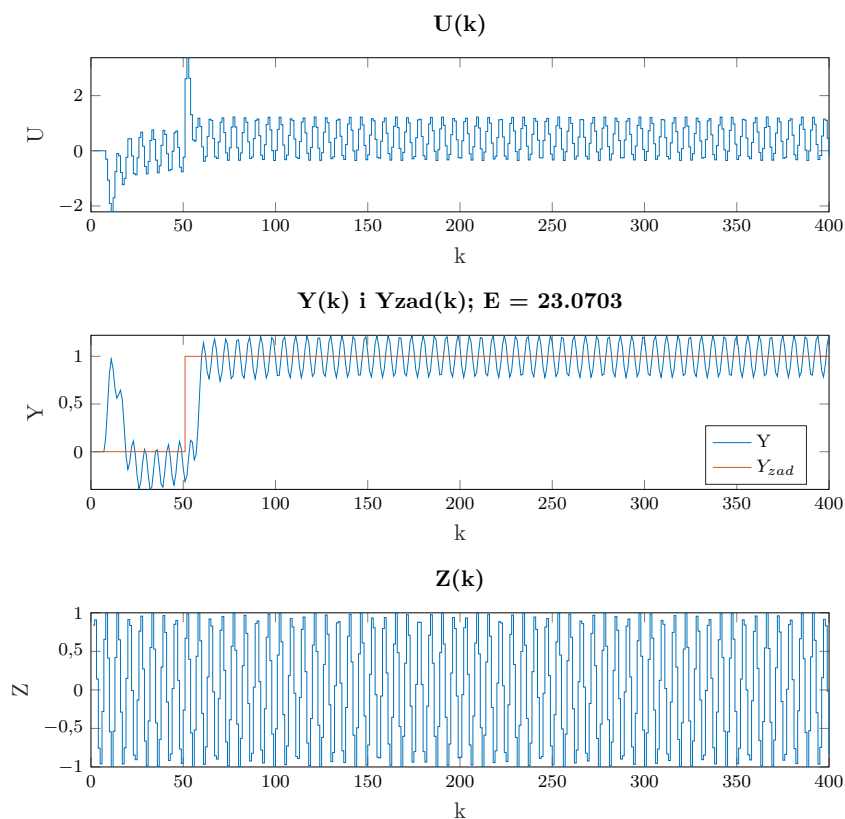
Rys. 2.14. Regulacja DMC z pomiarem zakłócenia: $N=20$, $N_u = 20$, $\lambda = 0.1$.Rys. 2.15. Regulacja DMC bez pomiaru zakłócenia: $N=20$, $N_u = 20$, $\lambda = 0.1$.

10. Działanie algorytmu DMC przy zakłóceniach sinusoidalnych

Można zauważyć, że stosowanie kompensacji zakłóceń w przypadku zakłóceń okresowych o dużej częstotliwości pogarsza regulację w znacznym stopniu. Jest to spowodowane tym, że regulator z kompensacją nie potrafi reagować wystarczająco szybko, przez co regulator nadawał wyższe sterowanie, pomimo że sygnał zakłócenia przestał już opadać i zaczynał się podnosić. Dla zakłóceń tego rodzaju, na obiektach z większą inercją toru wejście-wyjście niż zakłócenie-wyjście, stosowanie regulatorów bez kompensacji zakłóceń okazuje się lepszym rozwiązaniem. Układ jest wtedy bardziej bezwładny, dzięki czemu nie następuje wzmocnienie zakłócenia wywołane wyliczeniem sterowania z przed chwili.



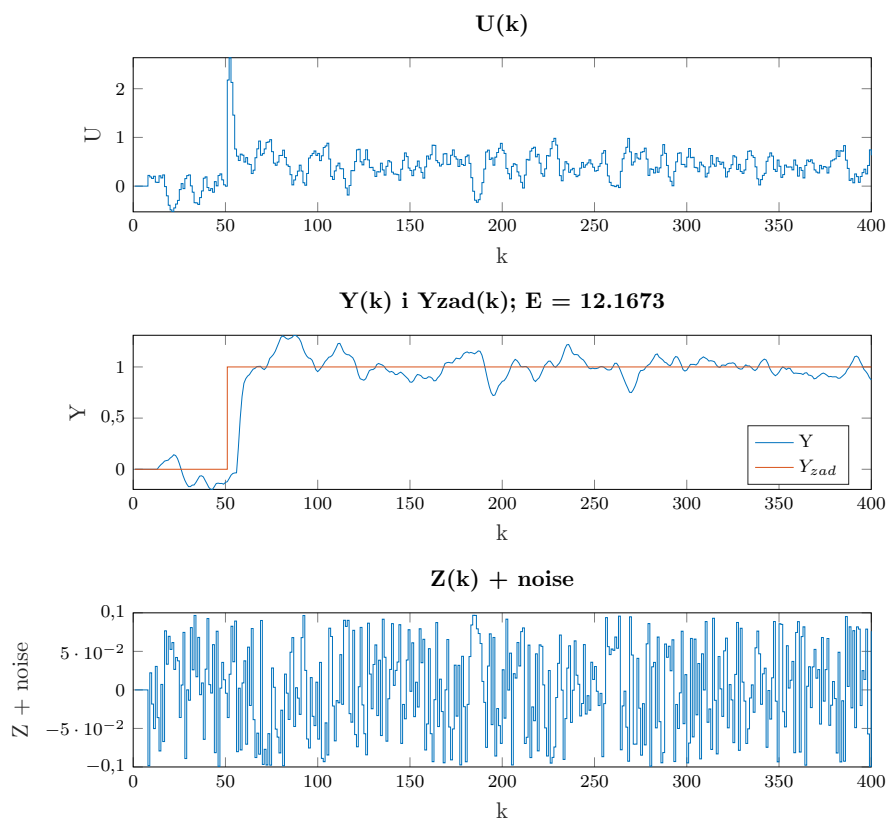
Rys. 2.16. Regulacja DMC z pomiarem zakłóceń przy zakłóceniach sinusoidalnych



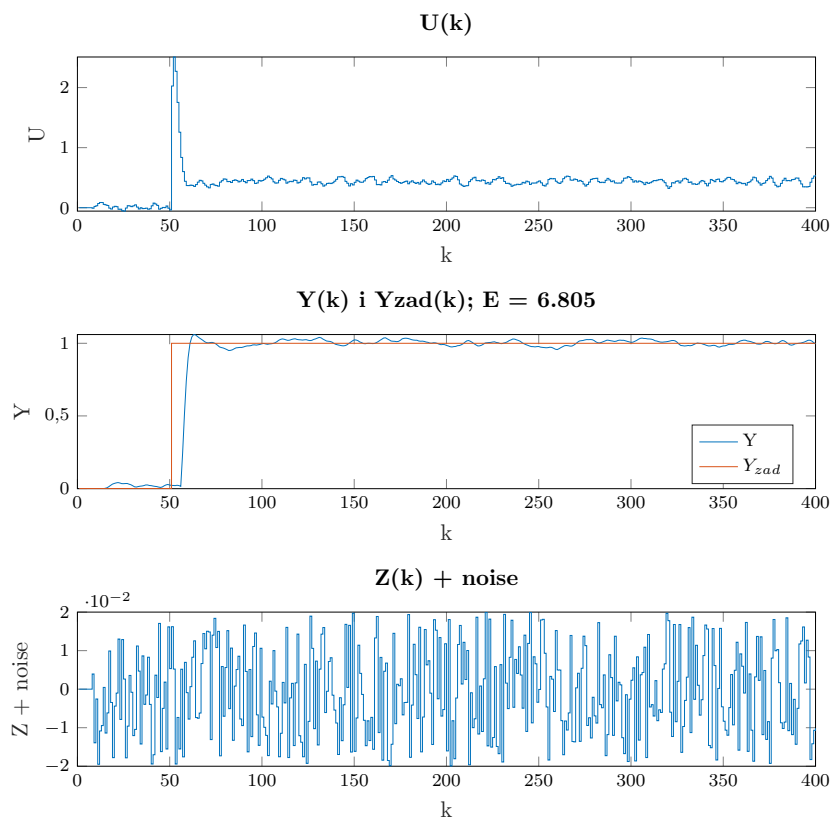
Rys. 2.17. Regulacja DMC bez pomiaru zakłóceń przy zakłóceniach sinusoidalnych

11. Badanie odporności algorytmu DMC na szum pomiarowy sygnału zakłócenia

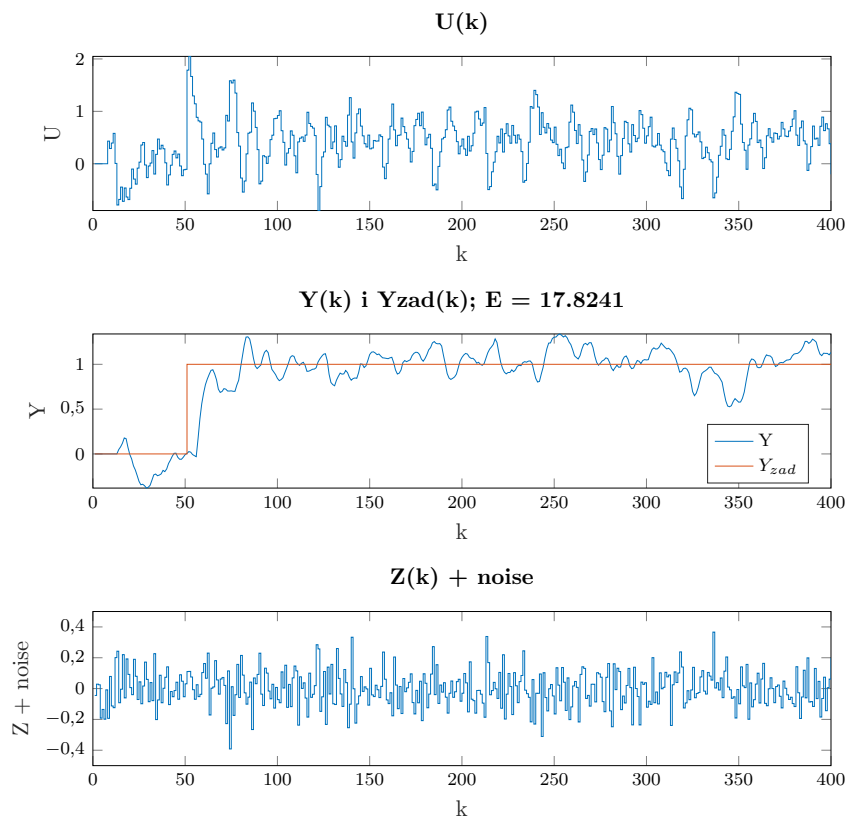
Eksperymenty przeprowadzone dla różnych wartości błędu pomiaru zakłóceń pokazują jasno, że regulator jest odporny na szumy pomiarowe, o ile wartości szumu są w granicach rozsądku. Wartości szumów nie przekraczały 10% wartości Y_{zad} , dzięki czemu wyjście procesu nie odbiegało w znaczącym stopniu od wartości zadanej. Patrząc na eksperymenty nasuwa się jeszcze dodatkowy wniosek związany z szybkością zmian szumu. Na rys. 2.20 widać, że regulator nie jest w stanie nadążyć sterowaniem za sygnałem szumu, przez co można zauważyć, że wartość błędu jest wyższa, niż dla innych eksperymentów.



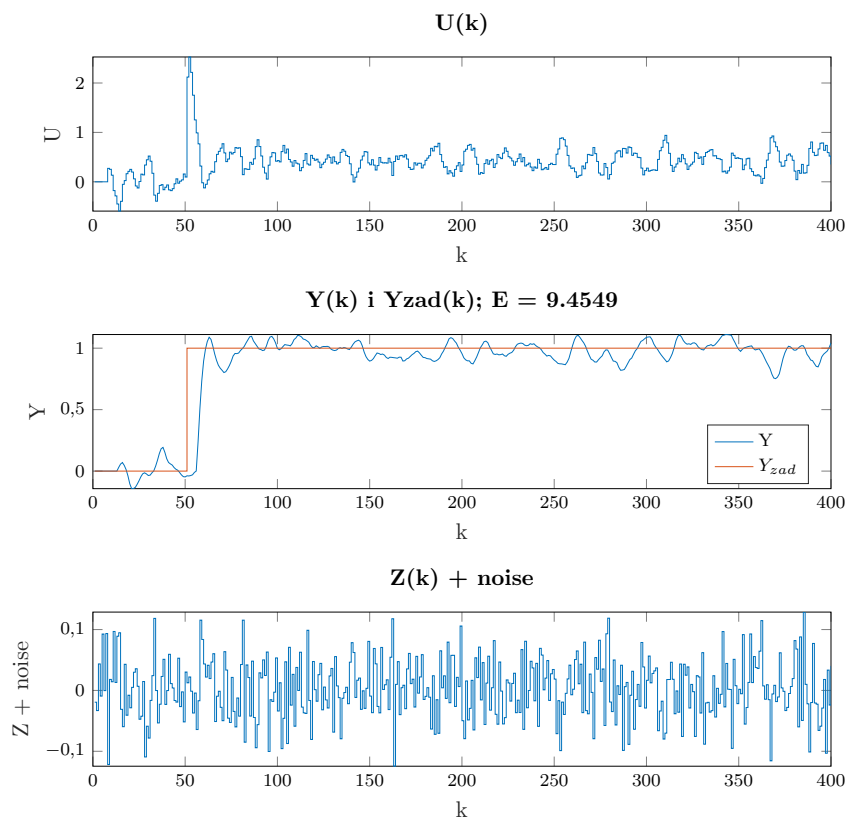
Rys. 2.18. Regulacja DMC z pomiarem zakłóceń z występującym szumem pomiarowym(1)



Rys. 2.19. Regulacja DMC z pomiarem zakłóceń z występującym szumem pomiarowym(2)



Rys. 2.20. Regulacja DMC z pomiarem zakłóceń z występującym szumem pomiarowym(3)



Rys. 2.21. Regulacja DMC z pomiarem zakłóceń z występującym szumem pomiarowym(4)