

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

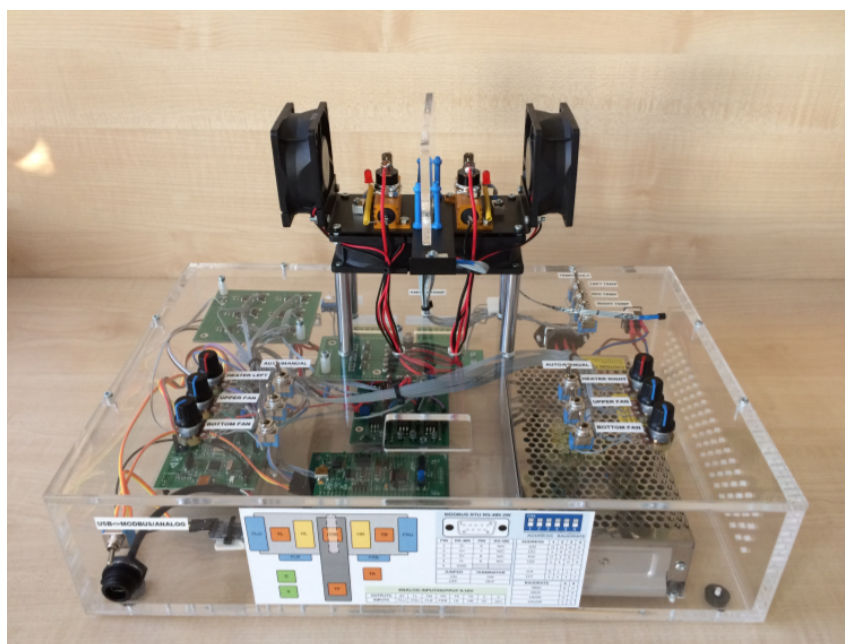
Spis treści

1. Laboratorium	2
1. Cel laboratorium	2
2. Przebieg laboratorium	2
3. Punkt pracy stanowiska	3
4. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście	4
5. Odpowiedzi skokowe dla algorytmu DMC	6
6. Algorytm DMC z pomiarem zakłóceń	11
7. Dobór parametrów dla algorytmu DMC	13
2. Projekt	16
1. Informacje wstępne	16
2. Sprawdzenie poprawności punktu pracy	16

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.



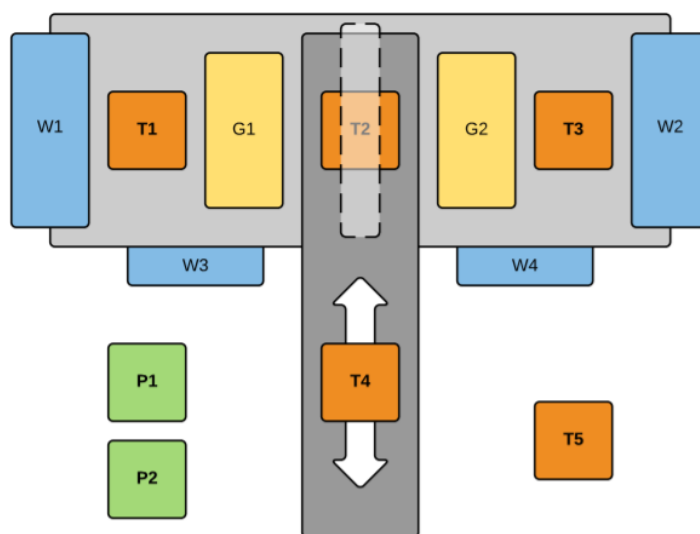
Rys. 1.1. Stanowisko grzejąco-chłodzące używane w trakcie laboratoriów.

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 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:

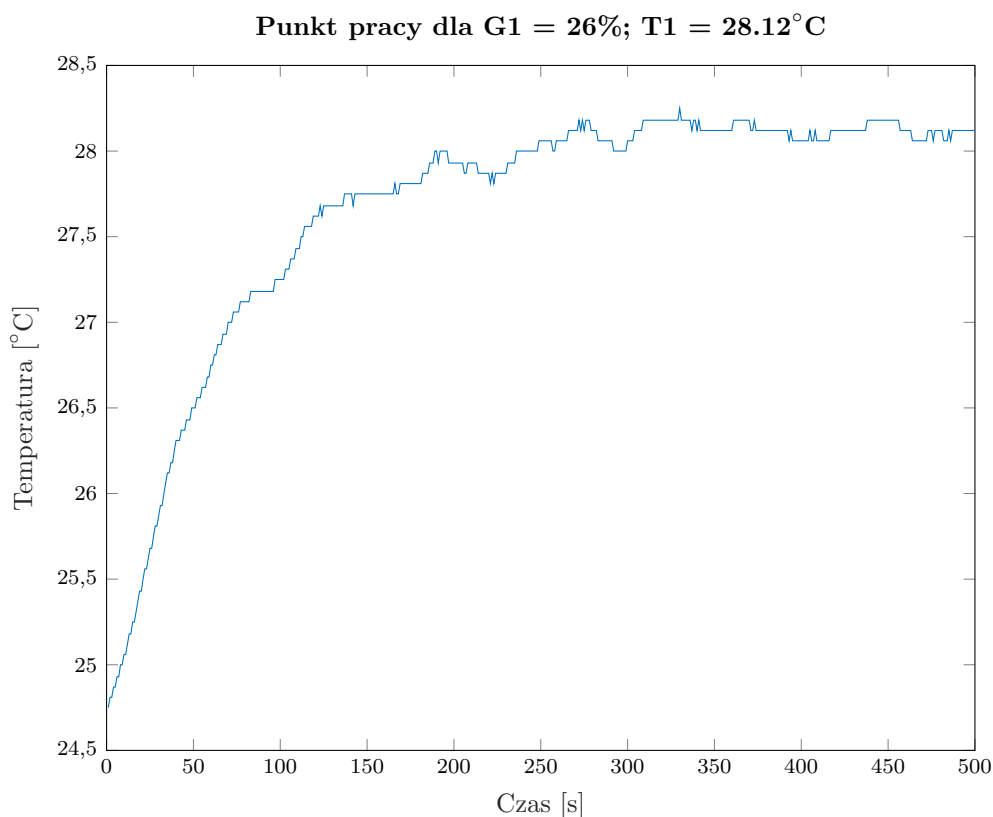
1. Odczytać wartość pomiaru temperatury dla termometru T1 dla mocy 26% grzałki G1 w stanie ustalonym (wyznaczyć punkt pracy).
2. Wyznaczyć odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście dla trzech różnych zmian sygnału zakłócającego Z rozpoczynając z punktu pracy.
3. Przygotować odpowiedzi skokowe wykorzystywane 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 $28,12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

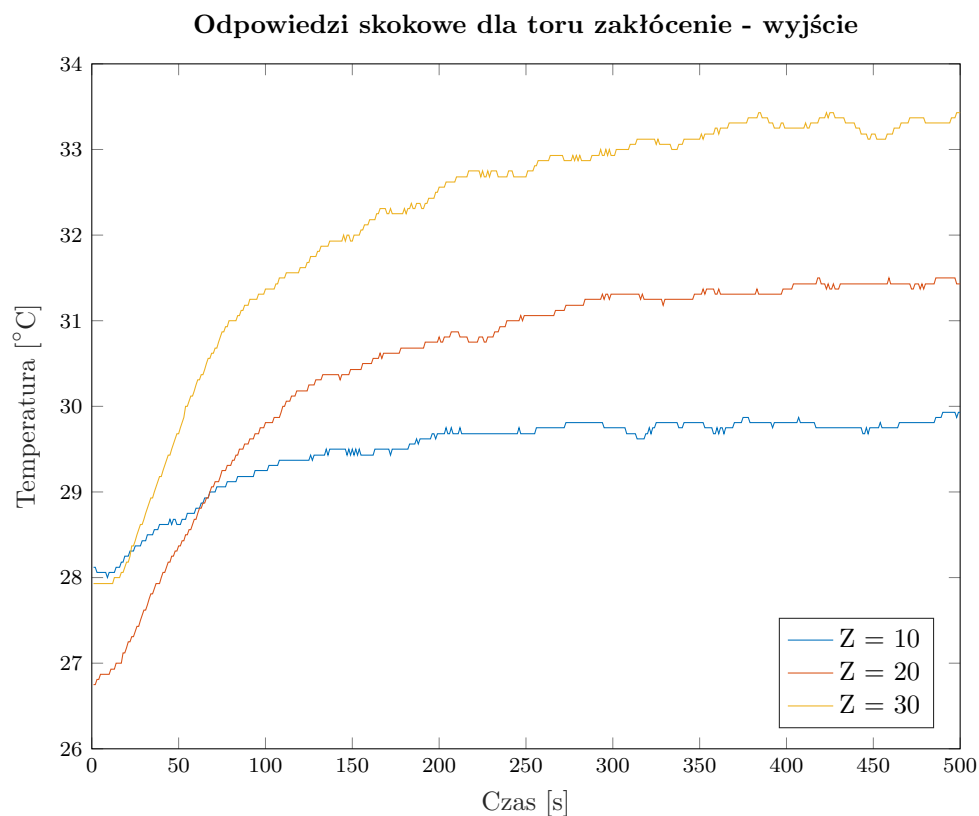


Rys. 1.3. Ustalanie się temperatury dla punktu pracy.

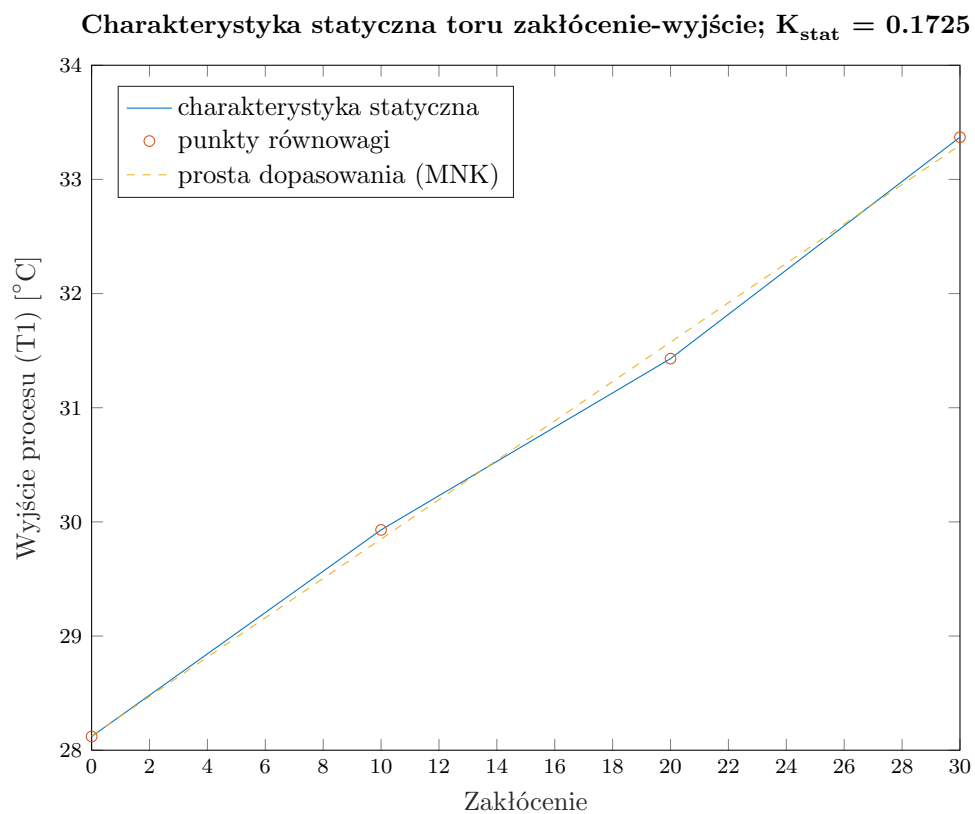
4. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście

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. 1.4. 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. 1.5 możemy 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. 1.4. Odpowiedzi skokowe dla toru zakłócenie - wyjście.



Rys. 1.5. Charakterystyka statyczna 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. 1.4, 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. 1.6. 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:

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

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 zwracała sumaryczny błąd kwadratowy pomiędzy aproksymacją otrzymaną dla zadanych parametrów a eksperymentalnie wyznaczoną odpowiedzią skokową dla toru zakłócenie-wyjście po przekształceniu dla algorytmu regulacji DMC. Implementacja funkcji `AproksSkokZak_DMC(X)`:

```
% aproksymacja odpowiedzi skokowej toru zaklocenie-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:

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

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 kilkukrotne 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);

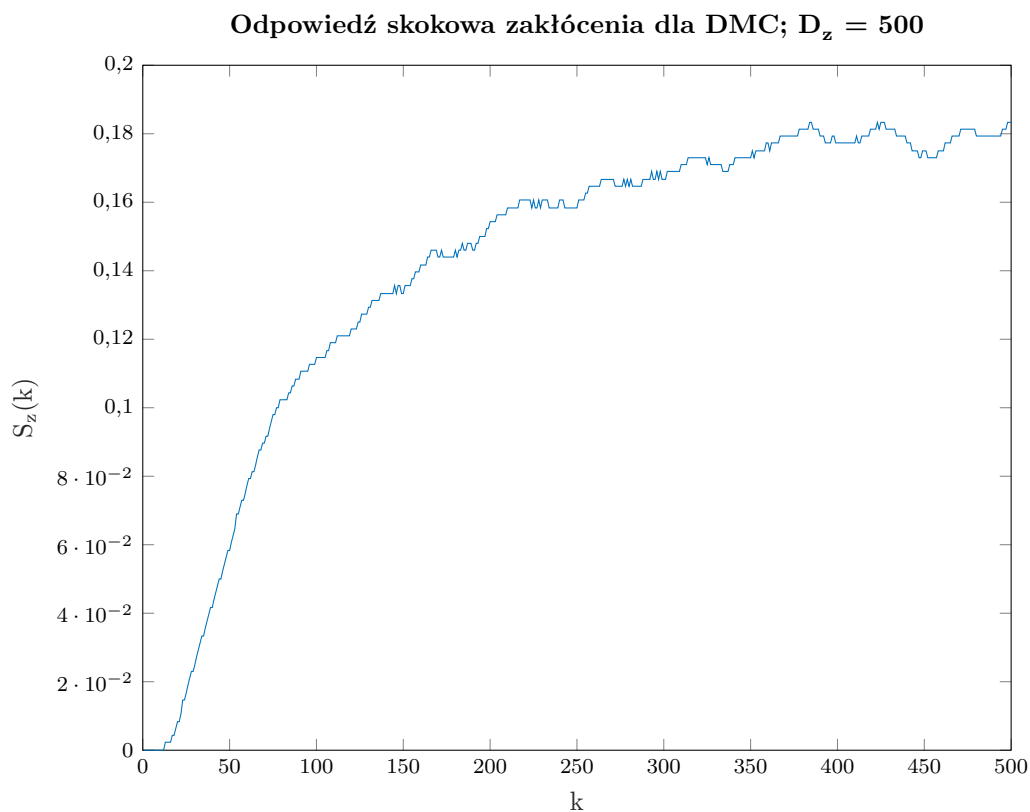
fprintf('\nT1 = %f; T2 = %f; K = %f;\n', x_apro_zak)
% T1=88.311400; T2=0.010351; K=0.177293;

```

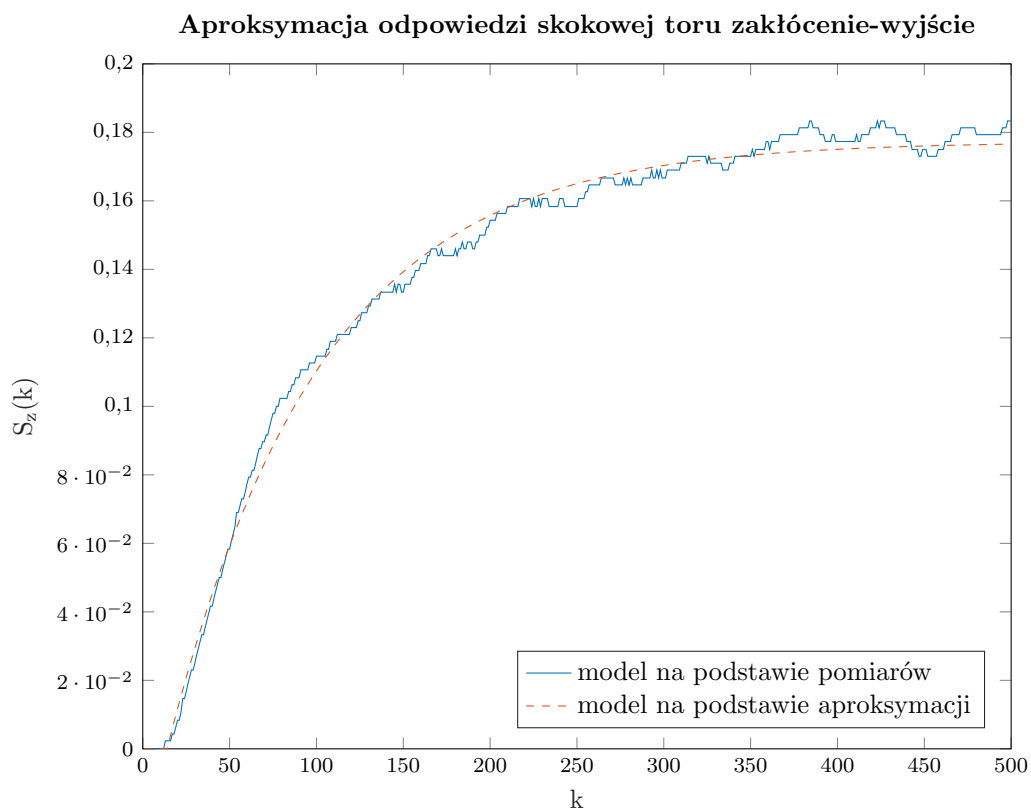

Ponieważ do minimalizacji funkcji użyto algorytmu generycznego to wyniki podczas kolejnych odtworzeń mogą się różnić. Jednak po wykonaniu testów, dla których błąd aproksymacji był bardzo zbliżony przyjęto wartości parametrów:

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

Otrzymaną aproksymowaną odpowiedź skokową dla toru zakłócenie-wyjście dla algorytmu regulacji DMC przedstawiono na rys. 1.7.

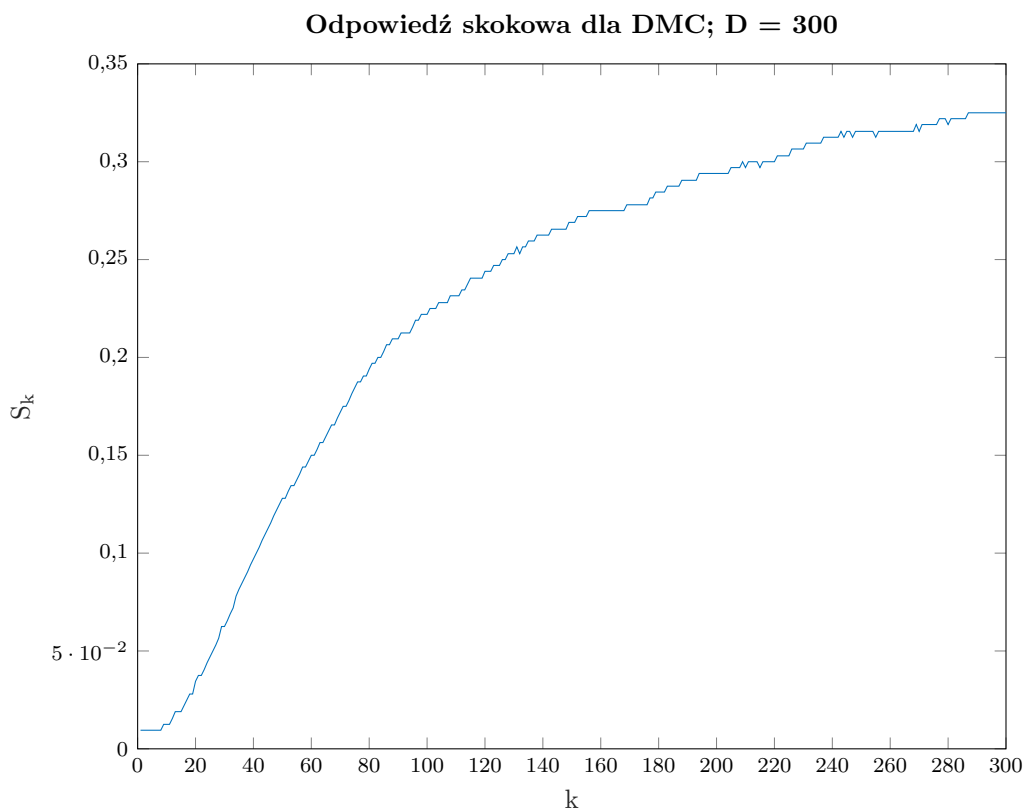


Rys. 1.6. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście dla algorytmu DMC.

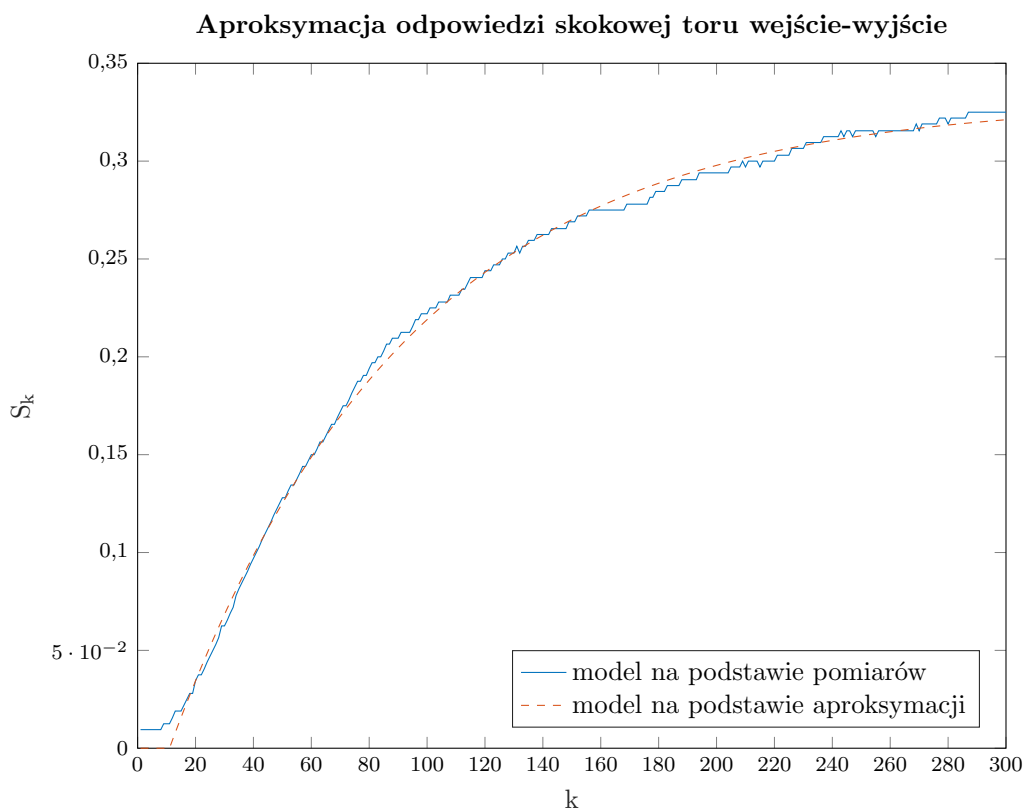


Rys. 1.7. Aproksymacja odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście dla algorytmu DMC.

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. 1.8. 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. TODO(nie wiem bardziej omawiać implementacje, czy komentarze są wystarczające, bo w poleceniu jest aby omówić program?)

```
%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

```

```

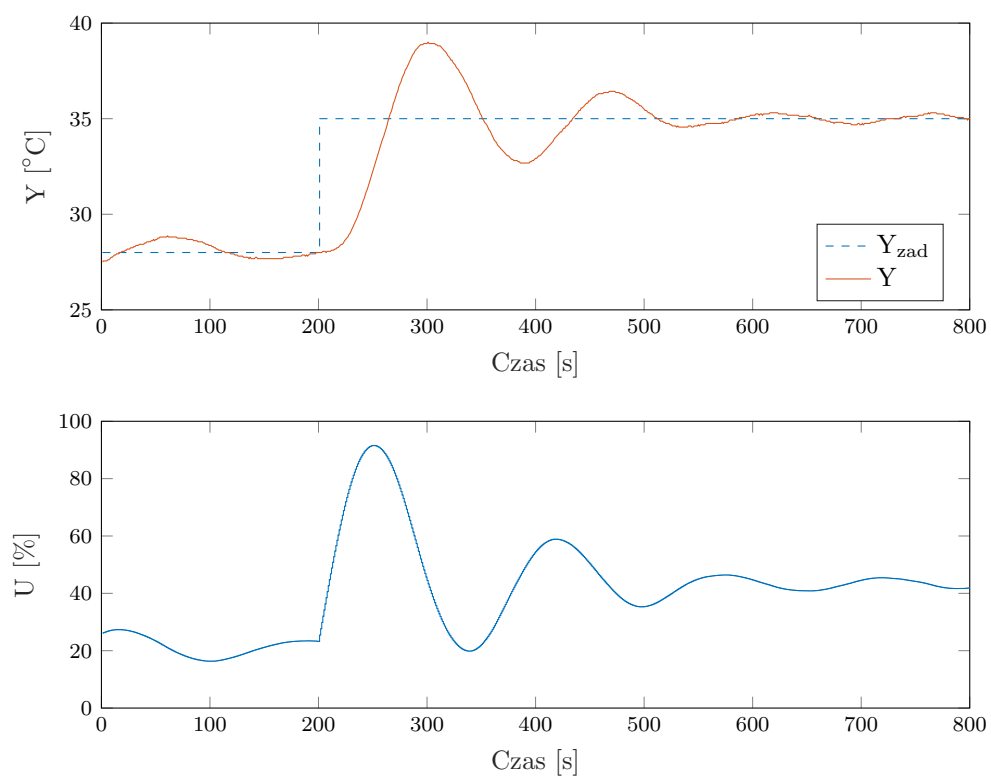
    U = Gmax;
end

if U < Gmin
    U = Gmin;
end

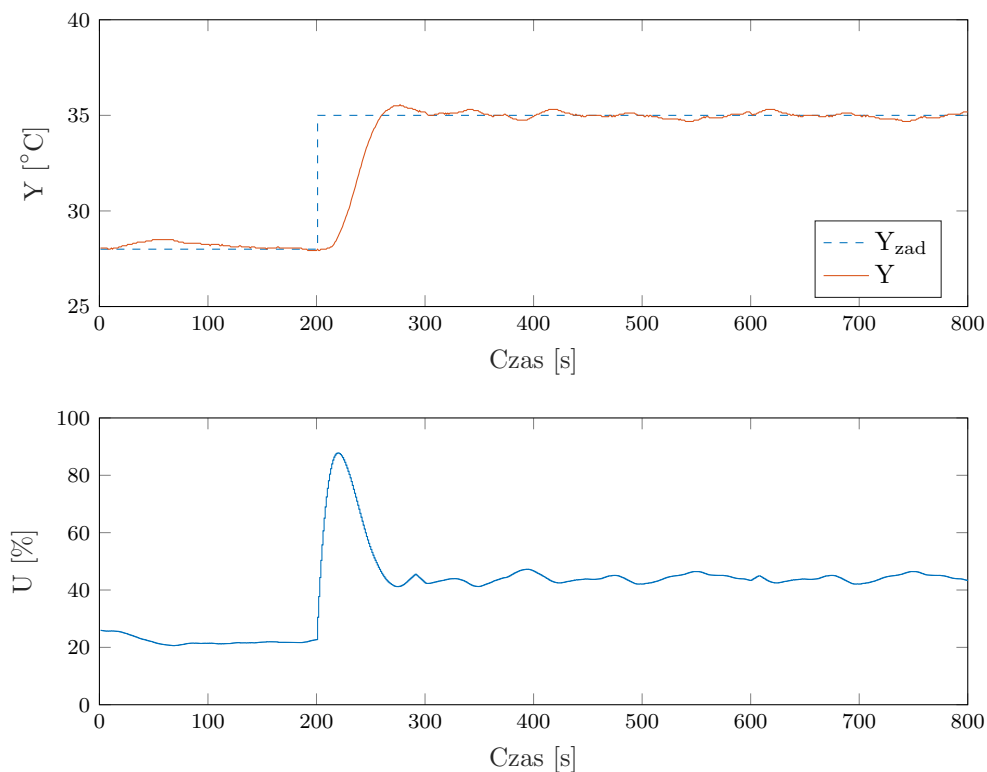
Upop = U;
end

```

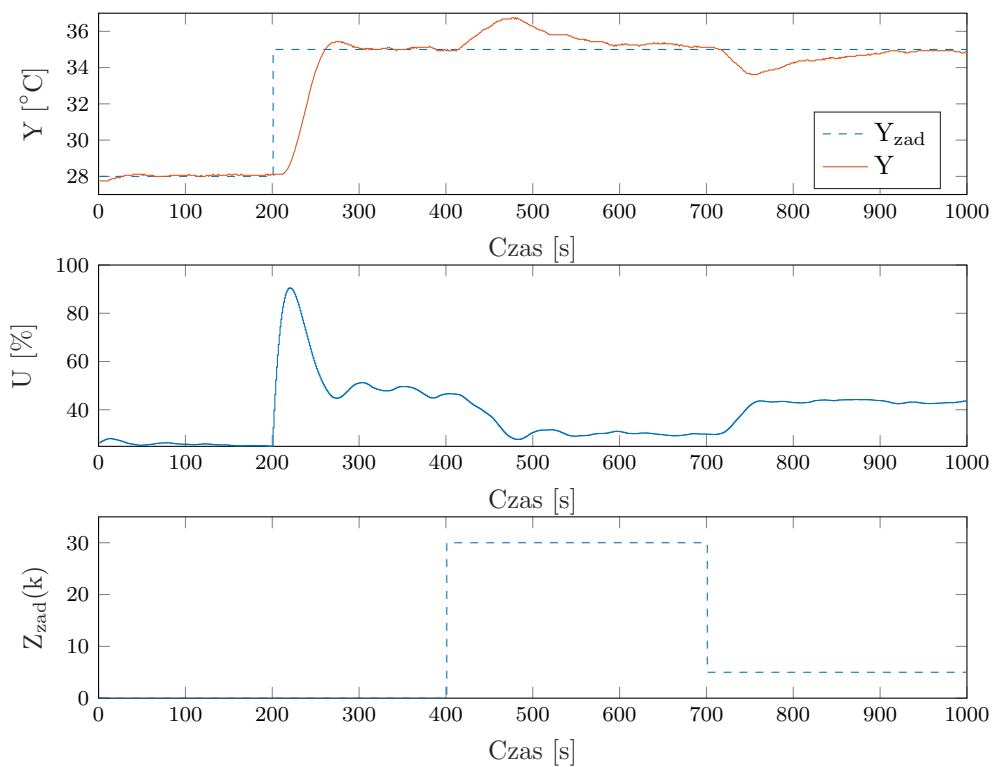
7. Dobór parametrów dla algorytmu DMC



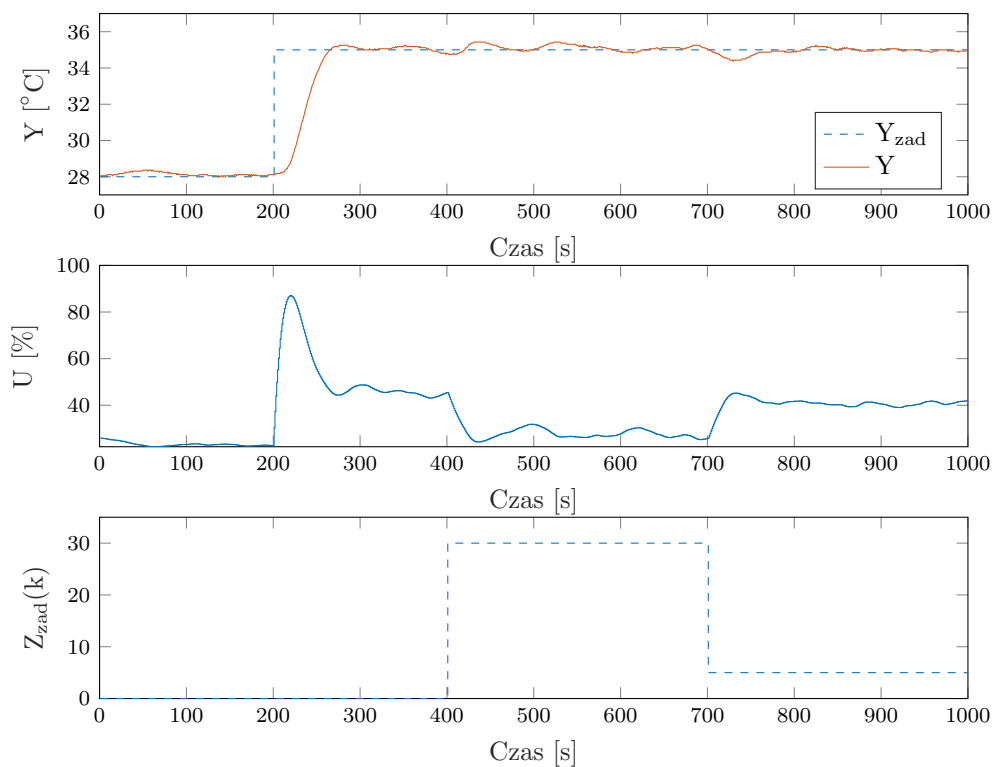
Rys. 1.10. Dobór parametrów dla algorytmu DMC: $D=300$, $N=10$, $N_u = 1$, $\lambda = 1$.
Wskaźnik jakości regulacji $E=2808$.



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



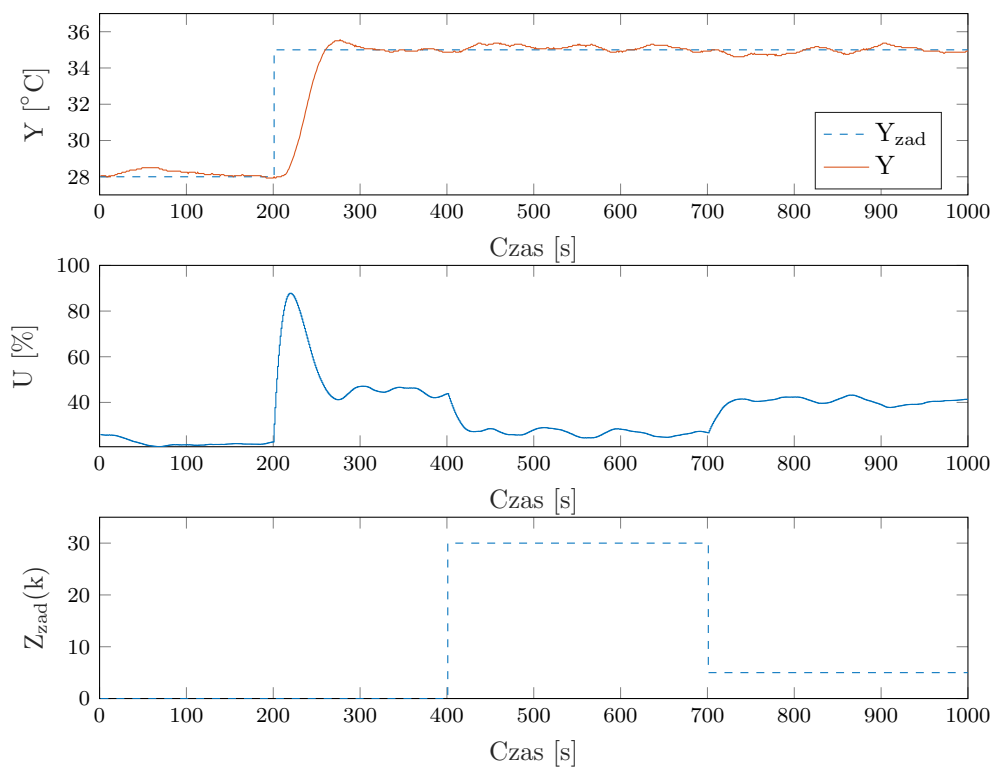
Rys. 1.12. Regulacja z wykorzystaniem algorytmu DMC bez pomiaru zakłóceń.
Użyte parametry DMC: $D_z = 500$, $D = 300$, $N = 50$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.
Wskaźnik jakości regulacji $E=1750$.



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-wyjscie 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

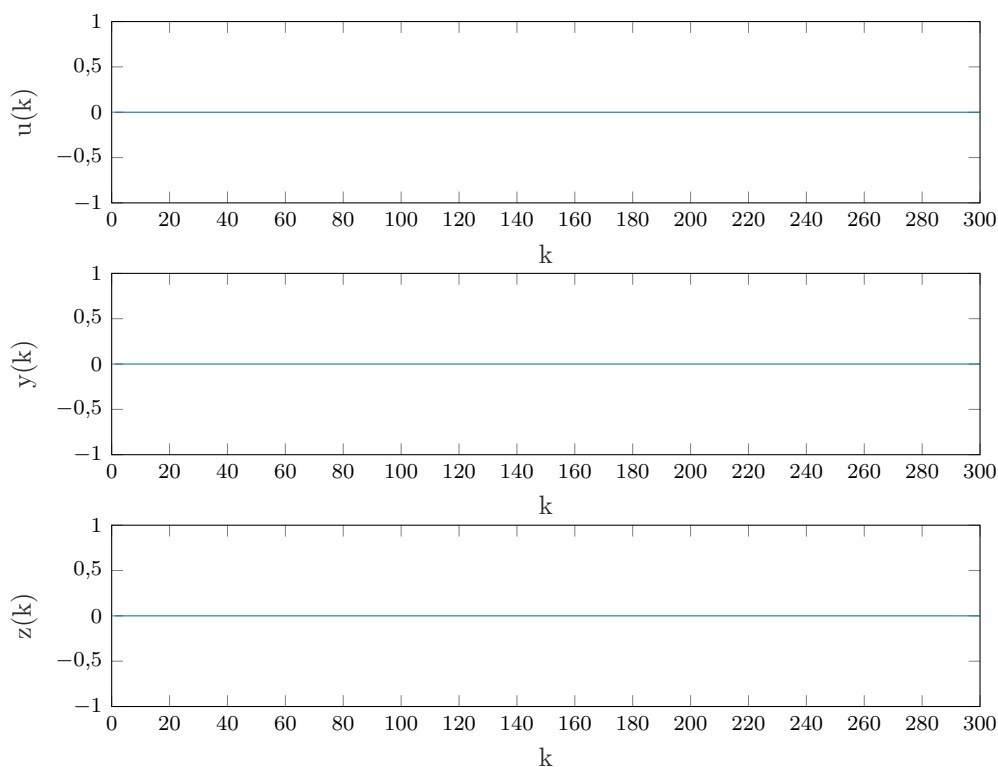
Zadanie projektowe wykorzystywało symulowany obiekt regulacji. Wyjście obiektu można wyznaczyć przy pomocy polecenia:

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

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