

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego
nr 2, zadanie nr 15

Michał Pióro, Radosław Ślepowroński, Jan Szymczak

Warszawa, 2024

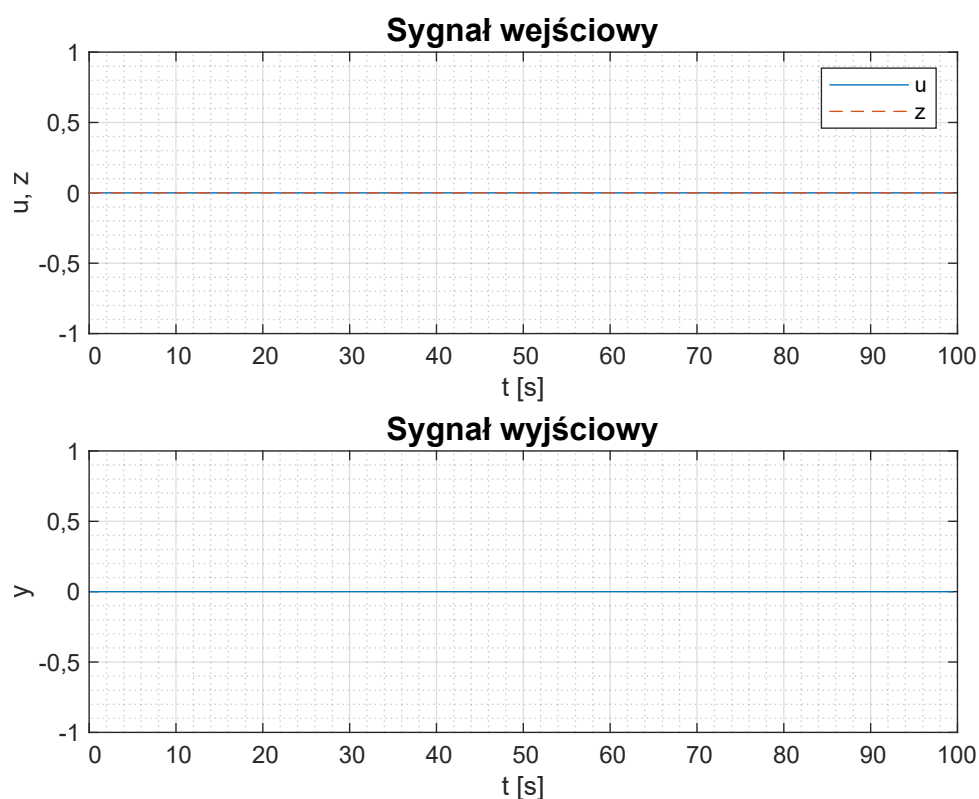
Spis treści

1. Projekt	2
1.1. Poprawność wartości U_{pp} , Z_{pp} , Y_{pp}	2
1.2. Odpowiedzi skokowe, sprawdzenie liniowości obiektu	2
1.2.1. Tor sterowania	2
1.2.2. Tor zakłócenia	3
1.2.3. Charakterystyka statyczna $y(u, z)$	4
1.3. Odpowiedzi skokowe do zastosowania w regulatorze DMC	6
1.3.1. Odpowiedź skokowa toru sterowanie-wyjście	6
1.3.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście	7
1.4. Prosty regulator DMC	9
1.4.1. Algorytm regulacji DMC	9
1.4.2. Strojenie regulatora DMC	10
1.5. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń	14
1.5.1. Algorytm regulacji DMC z pomiarem zakłóceń	14
1.5.2. Symulacje skoku jednostkowego zakłócenia	16
1.6. Badanie wpływu zakłócenia sinusoidalnego na działanie DMC	20
1.7. Badanie wpływu szumu pomiaru zakłócenia na działanie DMC	22
2. Laboratorium	26
2.1. Sterowanie i komunikacja ze stanowiskiem grzewczo-chłodzącym przy użyciu programu MATLAB oraz określenie punktu pracy	26
2.2. Odpowiedzi skokowe w torze zakłóceń	26
2.3. Aproksymacja odpowiedzi skokowych	28
2.3.1. Tor sterowania	28
2.3.2. Tor zakłócenia	30
2.4. Regulator DMC bez zakłóceń na obiekcie	32
2.4.1. Kod prostego regulatora DMC	32
2.4.2. Strojenie regulatora DMC	34
2.5. Regulator DMC z zakłóceniami na obiekcie	36
2.5.1. Kod regulatora DMC uwzględniającego pomiar zakłóceń	36
2.5.2. Dobór parametru D_z	36
2.5.3. Porównanie działania regulatorów DMC bez oraz z uwzględnianiem zakłóceń	38

1. Projekt

1.1. Poprawność wartości U_{pp} , Z_{pp} , Y_{pp}

Aby zbadać poprawność wartości w punkcie pracy, przeprowadzono symulację, w której na wejście obiektu podawane są stałe wartości $u = z = 0$. Tak prezentują się wyniki symulacji:



Rys. 1.1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

Jak widać, obiekt jest stabilny i podane wartości sygnałów faktycznie stanowią punkt pracy tego obiektu, ponieważ nie nastąpiły żadne zmiany sygnałów w prezentowanej symulacji.

1.2. Odpowiedzi skokowe, sprawdzenie liniowości obiektu

1.2.1. Tor sterowania

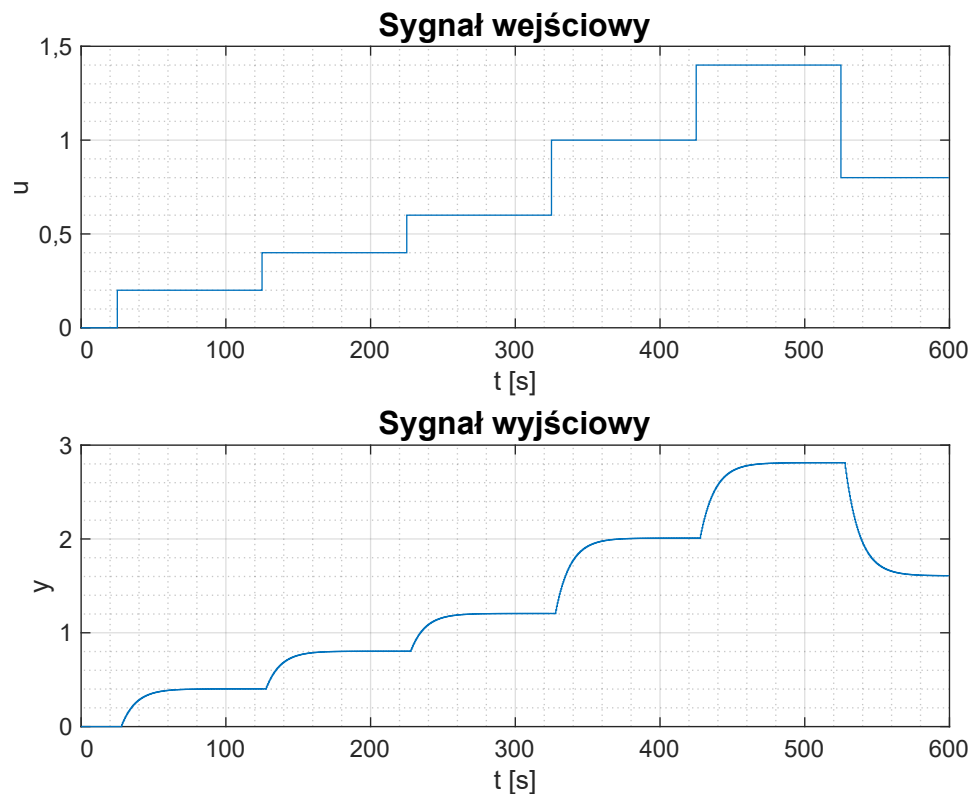
W celu zbadania toru sterowania przeprowadzono symulację przedstawioną na wykresie 1.2. Wykonano następujące zmiany sygnału sterującego: $0,0 \rightarrow 0,2$; $0,2 \rightarrow 0,4$; $0,4 \rightarrow 0,6$; $0,6 \rightarrow 1,0$; $1,0 \rightarrow 1,4$; $1,4 \rightarrow 0,8$.

Na podstawie otrzymanych w ten sposób odpowiedzi skokowych można stwierdzić, że obiekt jest w przybliżeniu liniowy w torze sterowania, ponieważ zmiany wyjścia po ustabilizowaniu się obiektu są proporcjonalne do zmian sterowania oraz czas stabilizacji jest zbliżony dla różnych skoków sterowania.

Kod programu odpowiadający za symulację:

```
y(1:7)=0;
kk=1200; % koniec symulacji
Tp=0.5; z(1:kk)=0;
time=0:Tp:Tp*(kk-1);

u(1:50)=0; u(51:250)=0.2; u(251:450)=0.4; u(451:650)=0.6;
u(651:850)=1; u(851:1050)=1.4; u(1051:1200)=0.8;
% główna pętla symulacyjna
for k=8:kk
    % symulacja obiektu
    y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
        z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));
end
```



Rys. 1.2. Odpowiedzi skokowe toru sterowania u

1.2.2. Tor zakłócenia

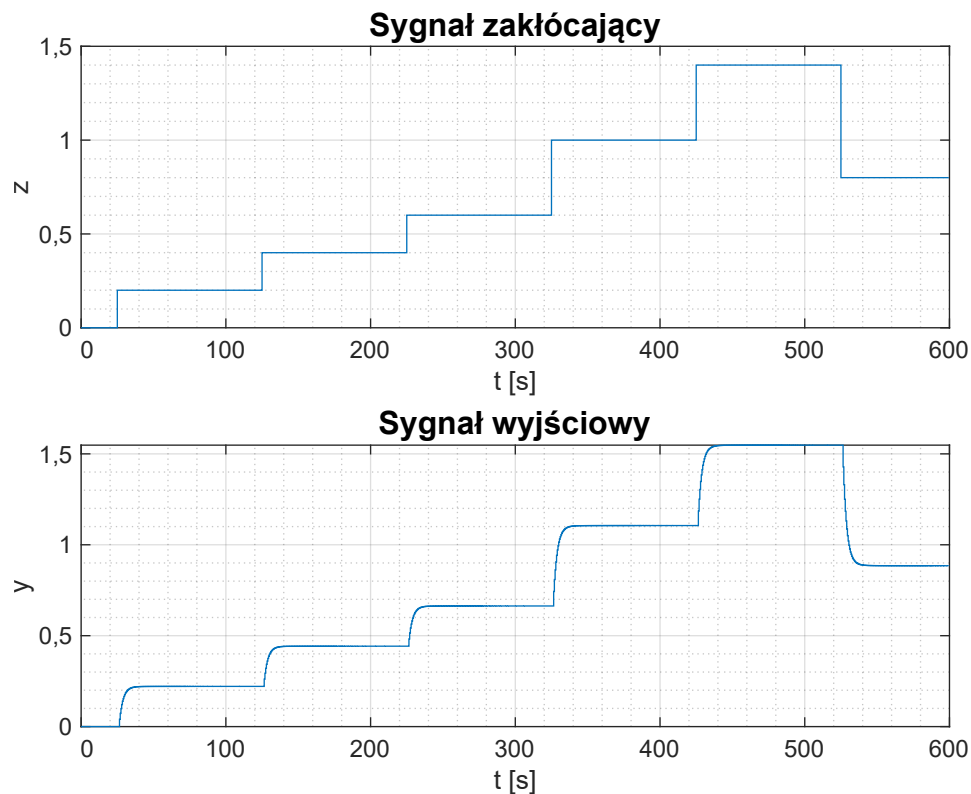
W celu zbadania toru zakłócenia przeprowadzono symulację przedstawioną na wykresie 1.3. Wykonano następujące zmiany sygnału sterującego: $0,0 \rightarrow 0,2$; $0,2 \rightarrow 0,4$; $0,4 \rightarrow 0,6$; $0,6 \rightarrow 1,0$; $1,0 \rightarrow 1,4$; $1,4 \rightarrow 0,8$.

Na podstawie otrzymanych w ten sposób odpowiedzi skokowych można stwierdzić, że obiekt jest w przybliżeniu liniowy w torze zakłócenia, ponieważ zmiany wyjścia po ustabilizowaniu się obiektu są proporcjonalne do zmian zakłócenia oraz czas stabilizacji jest zbliżony dla różnych skoków zakłócenia.

Kod programu odpowiadający za symulację:

```
y(1:7)=0;
kk=1200; % koniec symulacji
Tp=0.5; u(1:kk)=0;
time=0:Tp:Tp*(kk-1);

z(1:50)=0; z(51:250)=0.2; z(251:450)=0.4; z(451:650)=0.6;
z(651:850)=1; z(851:1050)=1.4; z(1051:1200)=0.8;
% główna pętla symulacyjna
for k=8:kk
    % symulacja obiektu
    y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
        z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));
end
```



Rys. 1.3. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenia z

Warto podkreślić fakt, że tor zakłócenia charakteryzuje się szybszą dynamiką niż tor sterowania, to znaczy, że po zmianie wartości sygnału obiekt pozostaje niestabilny przez krótszy odcinek czasu.

1.2.3. Charakterystyka statyczna $y(u, z)$

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej obliczono wyjścia obiektu dla wartości sygnału sterującego od 0,0 do 1,0 oraz sygnału zakłócającego od 0,0 do 1,0 z krokiem 0,05. Otrzymaną w ten sposób charakterystykę przedstawiono na wykresie 1.4.

Kod programu:

```
% koniec symulacji
kk = 500;

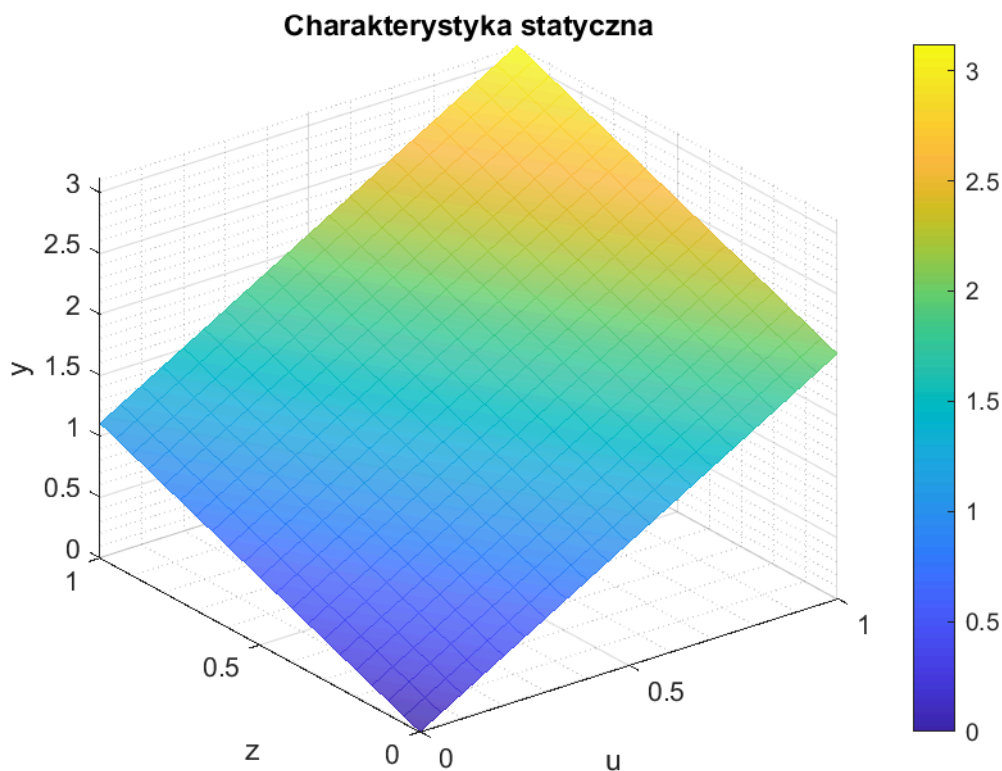
% Tworzenie macierzy do przechowywania wartości y
% dla każdej kombinacji (u, z)
us = 0:0.05:1;
zs = 0:0.05:1;
ys = zeros(length(us), length(zs));

for i = 1:length(us)
    for j = 1:length(zs)
        u(1:kk) = us(i);
        z(1:kk) = zs(j);

        % resetowanie historii wyjścia y
        y(1:7) = 0;

        % główna pętla symulacyjna
        for k = 8:kk
            y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
                z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));
        end

        % zapisanie y dla danej kombinacji (u, z)
        ys(i, j) = y(kk);
    end
end
```

Rys. 1.4. Charakterystyka statyczna $y(u, z)$

Przyglądając się otrzymanej charakterystyce statycznej 1.4 można stwierdzić, że jest liniowa, a co za tym idzie pozwala to na wyznaczenie jej wzmocnień statycznych dla każdego toru. Poszczególne wzmocnienia wynoszą:

$$K_{statu} = 2,0 \quad (1.1)$$

$$K_{statz} = 1,1 \quad (1.2)$$

1.3. Odpowiedzi skokowe do zastosowania w regulatorze DMC

Odpowiedź skokowa pozyskiwana jest przez zmianę sygnału sterującego w ustabilizowanym obiekcie z 0 na 1 i rejestrowanie sygnału wyjściowego do ponownego ustabilizowania obiektu. W przypadku analizowanego modelu obiektu jest to możliwe bez żadnych dodatkowych działań, ponieważ nie ma ograniczeń zmiany sterowania i zakłóceń oraz punkt pracy znajduje się w zerze dla każdej zmiennej. Dzięki temu wystarczyło zasymulować odpowiedzi jednostkowe dla sterowania i zakłócenia, obcinając te elementy wektorów wyjścia, które są sprzed chwili skoku sterowania lub zakłócenia.

1.3.1. Odpowiedź skokowa toru sterowanie-wyjście

Odpowiedź skokowa toru sterowanie-wyjście do wykorzystania w regulatorze DMC została wyznaczona przy pomocy funkcji (*p3_odpowiedz_skokowa_u*) przyjmującej jako argument *kk*, czyli ilość współczynników odpowiedzi skokowej, a zwracającej wektor współczynników odpowiedzi skokowej gotowych do wykorzystania w regulatorze DMC. Wykres 1.5 przedstawia kolejne współczynniki odpowiedzi skokowej toru sterowania.

Kod funkcji wykorzystanej do wyznaczenia odpowiedzi skokowej *u*:

```

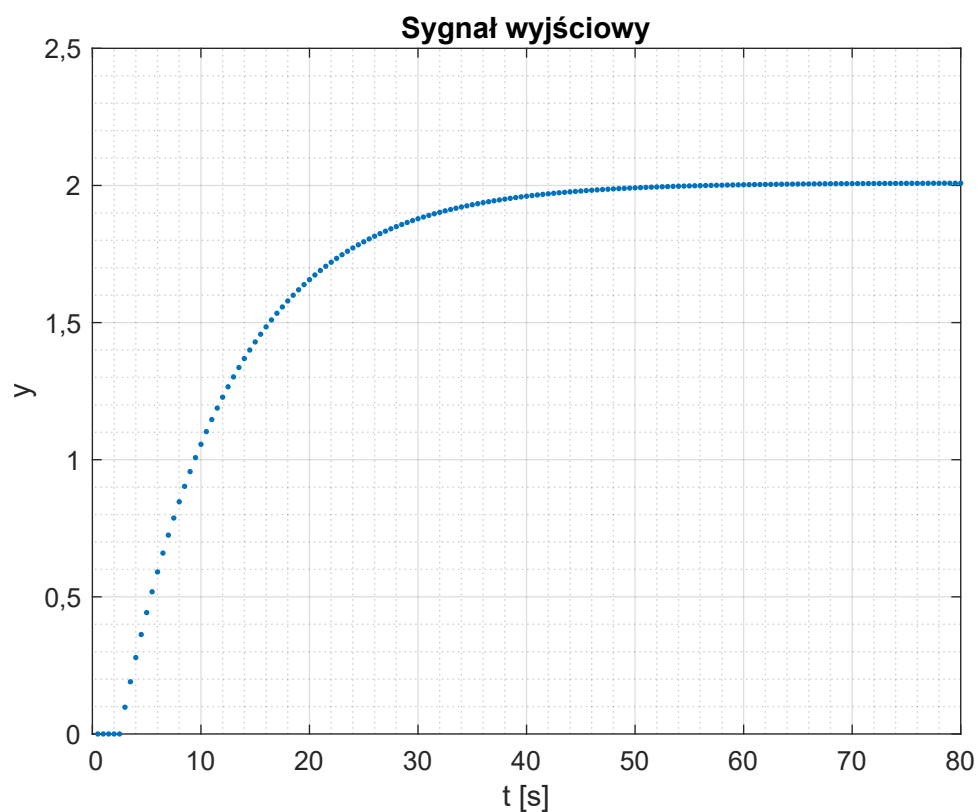
function [y,u] = p3_odpowiedz_skokowa_u(kk)
kk = kk+8;
Ypp=0; Upp=0; dU=1;

u(1:7)=0; u(8:kk)=Upp+dU; y(1:kk)=0; z(1:kk)=0;

% główna pętla symulacyjna
for k=8:kk
    % symulacja obiektu
    y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
        z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));
end

%normalizacja odpowiedzi skokowej
u=(u-Upp)/dU;
y=(y-Ypp)/dU;
u(1:8)=[]; y(1:8)=[];
end

```

Rys. 1.5. Odpowiedzi skokowa do DMC toru sterowania u

1.3.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyście

Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyście do wykorzystania w regulatorze DMC z pomiarem zakłócenia została wyznaczona przy pomocy funkcji (*p3_odpowiedz_skokowa_z*) działającej analogicznie do wyżej omawianej funkcji *p3_odpowiedz_skokowa_u*, tylko w torze zakłócenia. Wykres 1.6 przedstawia kolejne współczynniki odpowiedzi skokowej toru zakłócenia.

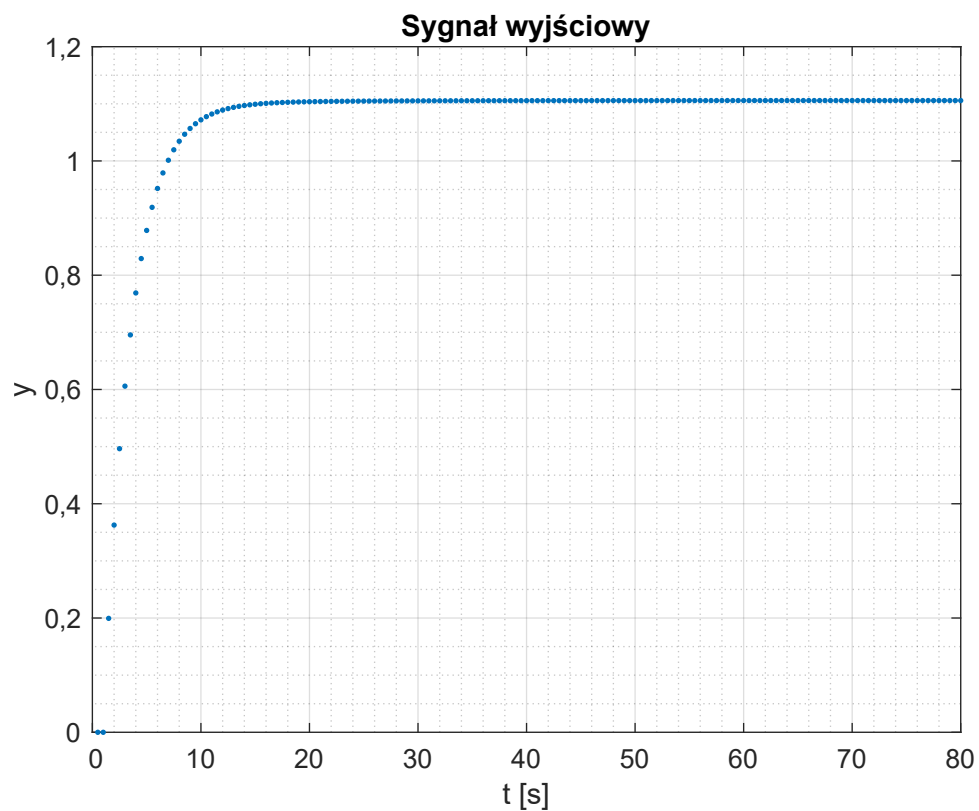
Kod funkcji odpowiedzi skokowej z:

```
function [y,z] = p3_odpowiedz_skokowa_z(kk)
kk = kk+8;
Ypp=0; Zpp=0; dZ=1;

z(1:7)=0; z(8:kk)=Zpp+dZ; y(1:kk)=0; u(1:kk)=0;

% główna pętla symulacyjna
for k=8:kk
    % symulacja obiektu
    y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
        z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));
end

%normalizacja odpowiedzi skokowej
z=(z-Zpp)/dZ;
y=(y-Ypp)/dZ;
z(1:8)=[]; y(1:8)=[];
end
```



Rys. 1.6. Odpowiedzi skokowa do DMC toru zakłócenia z

1.4. Prosty regulator DMC

1.4.1. Algorytm regulacji DMC

Przygotowany program został zrealizowany w formie funkcji, aby umożliwić wygodne wykorzystanie do przyszłych zadań, gdzie podawane będą różne nastawy regulatorów. Funkcja realizująca prosty regulator DMC przyjmuje parametry wejściowe przedstawione w tabeli 1.1, a zwraca dwa wektory, \mathbf{y} oraz \mathbf{u} , będące odpowiednio trajektorią sygnału wyjściowego oraz wejściowego obiektu po przeprowadzonej symulacji.

Parametr	Opis
kk	ilość kroków symulacji
yzad	zadana wartość wyjścia
N	horyzont predykcji
Nu	horyzont sterowania
D	horyzont dynamiki
lambda	współczynnik kary za zbyt duże przyrosty sterowania
z	wektor trajektorii zmian zakłóceń

Tab. 1.1. Parametry wejściowe algorytmu DMC

Cały program do symulacji algorytmu DMC w wersji analitycznej można podzielić na dwie części, obliczenia offline oraz online.

Przed główną pętlą symulacyjną należy podać wartości ograniczeń, zainicjować wektory sygnałów, uwzględnić przesunięcia wartości k wynikające z opóźnień i dynamiki obiektu oraz podać warunki początkowe. Dodatkowo w części offline należy obliczyć współczynniki odpowiedzi skokowej modelu obiektu i na ich podstawie skonstruować macierz dynamiczną \mathbf{M} oraz macierz \mathbf{M}_p , a następnie wyznaczyć macierz sterującą \mathbf{K} . Stosując wersję oszczędną należy także wyznaczyć \mathbf{k}_e będący sumą elementów pierwszego wiersza macierzy \mathbf{K} oraz wyznaczyć \mathbf{k}_u poprzez wymnożenie pierwszego wiersza \mathbf{K} z macierzą \mathbf{M}_p .

W części online znajdującej się w głównej pętli symulacyjnej najpierw należy odczytać wyjście z symulacji obiektu, obliczyć uchyb oraz przyrost sygnału sterującego. Następnie należy zaktualizować sygnał sterujący oraz wektor przeszłych przyrostów sterowania.

```
function [y, u] = p4_funkcja_dmc(kk, yzad, N, Nu, D, lambda, z)
k_shift=7;
kk=kk+k_shift;
% Odpowiedź skokowa zdyskretyzowanego systemu
ys = p3_odpowiedz_skokowa_u(D);

% Konstrukcja macierzy M
M = zeros(N,Nu);
for column=1:Nu
    M(column:N,column) = ys(1:N-column+1);
end

% Konstrukcja macierzy Mp
Mp = zeros(N,D-1);
for j = 1:D-1
    for i = 1:N
        c = min([i+j,D]);
        Mp(i,j) = ys(c) - ys(j);
    end
end
end
```

```

% Obliczenie macierzy sterującej K
K = (M.'*M + lambda*eye(Nu,Nu))\M.';
K1 = K(1,:);
ke = sum(K1);
ku = K1*Mp;

% Inicjalizacja
u(1:kk)=0; y(1:kk)=0; e(1:kk)=0;
yzad = yzad*ones(kk,1);

% Warunki początkowe
u(1:7)=0; y(1:7)=0; z(1:7)=0;
delta_u_p(1:D-1)=0; % Przeszłe przyrosty u

% Główna pętla symulacyjna
for k=k_shift+1:kk
    % Symulacja obiektu
    y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
        z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));

    % Uchyb regulacji
    e(k)=yzad(k)-y(k);

    % Zmiana zakłócenia
    delta_z_p(1) = z(k) - z(k-1);

    % Obliczenie przyrostu sygnału sterującego DMC
    delta_u = ke * e(k) - ku * delta_u_p';

    % Aktualizacja sygnału sterującego
    u(k)=u(k-1)+delta_u;

    % Aktualizacja przeszłych przyrostów sterowania
    for n=D-1:-1:2
        delta_u_p(n) = delta_u_p(n-1);
    end

    delta_u_p(1) = delta_u;
end
y(1:k_shift)=[]; u(1:k_shift)=[];
end

```

1.4.2. Strojenie regulatora DMC

Regulator DMC dostrojono na 2 sposoby, aby otrzymać jak najlepiej działający regulator. Po pierwsze analizując wykres 1.2 odpowiedzi skokowych toru sterowanie-wyjście dobrano horyzont dynamiki $D = 192$. Do strojenia zastosowano metodę eksperymentalną, podczas której symulacyjne sprawdzano działanie regulatora o różnych dobieranych parametrach. Początkowe parametry regulatora przedstawiono w tabeli 1.2, które dobrano stosując podejście przy którym wszystkie horyzonty są sobie równe, to znaczy $D = N_u = N$ oraz $\lambda = 1$. Zaczęto od zmniejsz-

szania parametrów N oraz N_u , tak aby poprawić jakość regulacji. Następnie dostrojono wartość parametru λ tak aby przyspieszyć regulator, jednocześnie nie powodując zbyt gwałtownych zmian sygnału sterującego u . Regulator podczas dostrajania oceniano jakościowo, co oznacza, że brano pod uwagę przeregulowanie regulatora, oscylacje wokół wartości zadanej oraz zmienność sygnału sterującego. Dodatkowo oceniano regulatory ilościowo korzystając ze wskaźnika jakości przedstawionego we wzorze 1.3. Otrzymane metodą eksperymentalną parametry dostrojonego regulatora DMC przedstawiono w tabeli 1.3, a porównanie działania regulatorów na wykresach 1.7, 1.8, 1.9, 1.10. Jak można zauważyć na wykresach dla obu skoków wartości zadanej y_{zad} regulator dostrojony działa szybciej od początkowego, bez oscylacji i ze znacznie mniejszym przeregulowaniem. Porównując wskaźniki jakości przedstawione w tabeli 1.4, w tym wypadku również regulator dostrojony wypada podobnie.

$$E = \sum_{k=1}^{k_{konc}} (y_{zad}(k) - y(k))^2 \quad (1.3)$$

Tab. 1.2. Parametry początkowe DMC

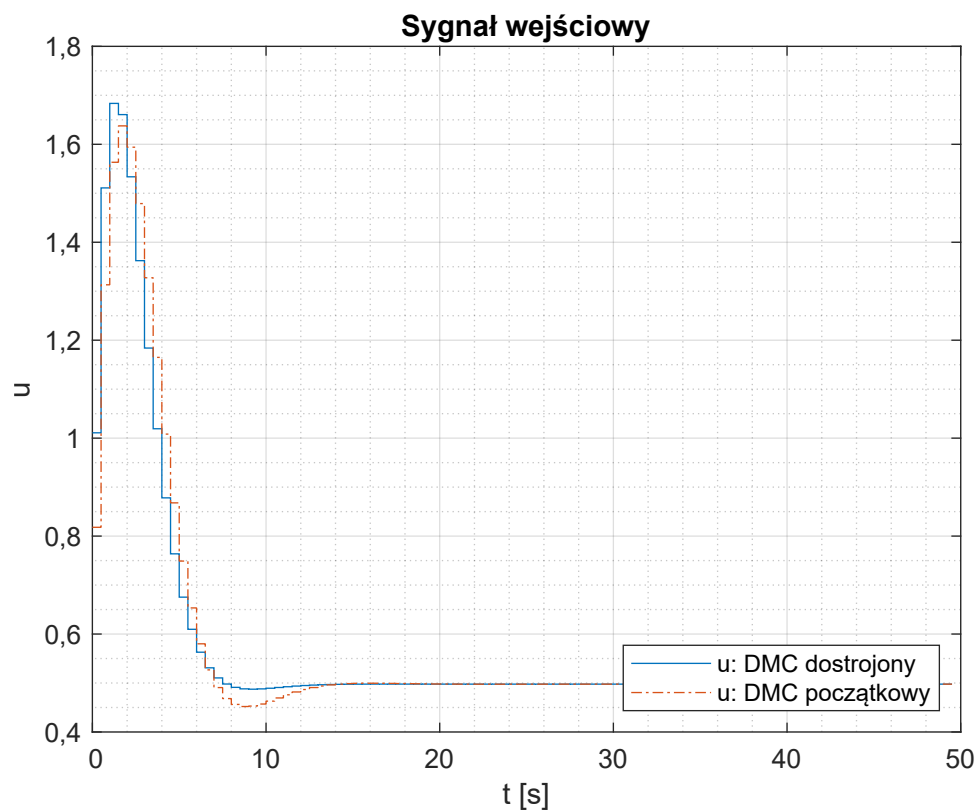
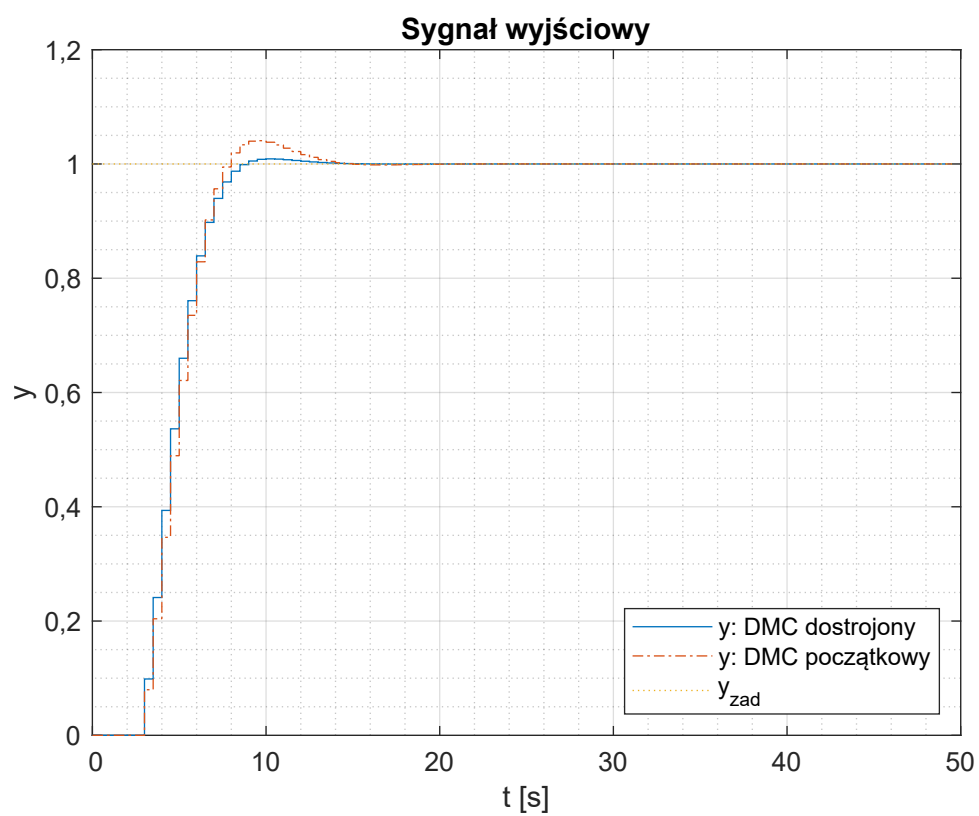
Parametr	Wartość
N	192
N_u	192
D	192
λ	1

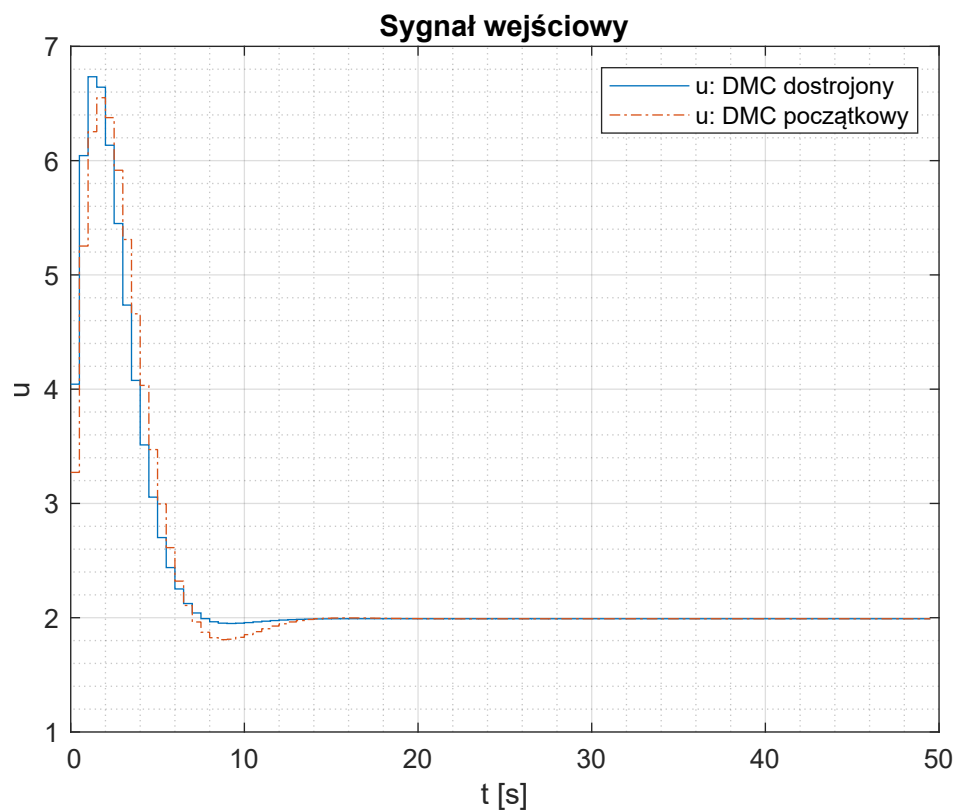
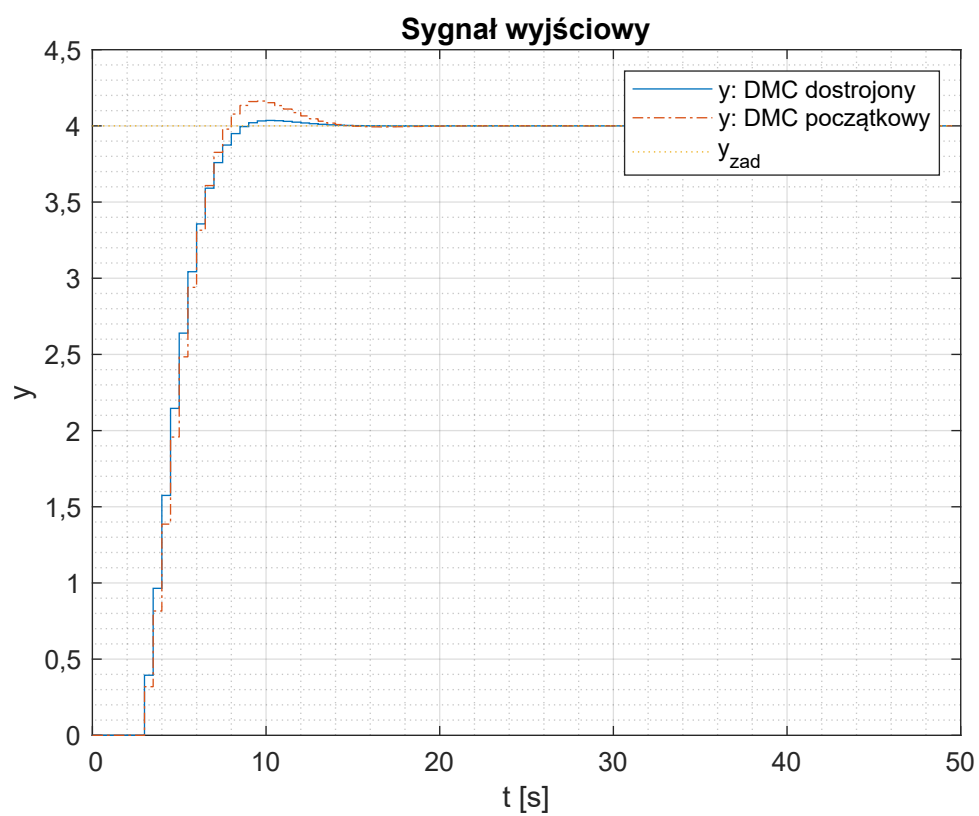
Tab. 1.3. Parametry dostrojonego DMC

Parametr	Wartość
N	20
N_u	3
D	192
λ	0,5

Tab. 1.4. Wskaźnik jakości regulatorów DMC

Regulator	Błąd $y_{zad} = 1$	Błąd $y_{zad} = 4$
Początkowy	8,4319	134,9098
Dostrojony	8,1853	130,9645

Rys. 1.7. Porównanie u prostych regulatorów DMC podczas strojenia dla $y_{zad} = 1,0$ Rys. 1.8. Porównanie y dla prostych regulatorów DMC podczas strojenia dla $y_{zad} = 1,0$

Rys. 1.9. Porównanie u prostych regulatorów DMC podczas strojenia dla $y_{zad} = 4,0$ Rys. 1.10. Porównanie y dla prostych regulatorów DMC podczas strojenia dla $y_{zad} = 4,0$

1.5. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń

1.5.1. Algorytm regulacji DMC z pomiarem zakłóceń

Przygotowany program został zrealizowany w formie funkcji, podobnie jak dla regulatora DMC bez pomiaru zakłóceń, który został opisany w poprzednim punkcie, z małymi różnicami dotyczącymi faktu pomiaru zakłóceń. Wśród argumentów funkcji znalazło się dodatkowo Dz , czyli horyzont dynamiki zakłócenia. Po tej zmianie argumenty przyjmowane przez funkcję przedstawiono w tabeli 1.5. Wyjście funkcji pozostało takie samo jak w przypadku regulatora DMC bez pomiaru zakłóceń.

Parametr	Opis
kk	ilość kroków symulacji
yzad	zadana wartość wyjścia
N	horyzont predykcji
Nu	horyzont sterowania
D	horyzont dynamiki sterowania
lambda	współczynnik kary za zbyt duże przyrosty sterowania
Dz	horyzont dynamiki zakłócenia
z	wektor trajektorii zmian zakłóceń

Tab. 1.5. Parametry wejściowe algorytmu DMC

Cały program do symulacji algorytmu DMC z pomiarem zakłóceń w wersji analitycznej również można podzielić na dwie części, obliczenia offline oraz online. Są one podobne w dużej mierze do DMC bez pomiaru zakłóceń, więc przedstawione poniżej zostaną jedynie różnice.

W części offline pojawia się obliczanie macierzy M_z^P . W związku z tym, że korzystamy z wersji oszczędnej to należy dodatkowo dodać wyliczanie k_z przy wykorzystaniu macierzy M_z^P oraz pierwszego wiersza macierzy K .

W części online znajdującej się w głównej pętli symulacyjnej należy dodać wyliczanie zmiany wartości zakłócenia i przechowywanie jego poprzednich wartości, podobnie jak robione jest to dla sygnału sterującego.

```
function [y, u] = p5_funkcja_dmc(kk, yzad, N, Nu, D, lambda, Dz, z)
k_shift=7;
kk=kk+k_shift;
% Odpowiedź skokowa zdyskretyzowanego systemu
ys = p3_odpowiedz_skokowa_u(D);
yz = p3_odpowiedz_skokowa_z(Dz);

% Konstrukcja macierzy M
M = zeros(N,Nu);
for column=1:Nu
    M(column:N,column) = ys(1:N-column+1);
end

% Konstrukcja macierzy Mp
Mp = zeros(N,D-1);
for j = 1:D-1
    for i = 1:N
        c = min([i+j,D]);
        Mp(i,j) = ys(c) - ys(j);
    end
end
end
```

```

% Konstrukcja macierzy Mpz
Mpz = zeros(N,Dz-1);
Mpz(:,1)=yz(1:N);
for j = 2:Dz
    for i = 1:N
        c = min([i+j-1,Dz]);
        Mpz(i,j) = yz(c) - yz(j-1);
    end
end

% Obliczenie macierzy sterującej K
K = (M.'*M + lambda*eye(Nu,Nu))\M.';
K1 = K(1,:);
ke = sum(K1);
ku = K1*Mp;
kz = K(1, :) * Mpz;

% Warunki początkowe
u(1:7)=0; y(1:7)=0; z(1:7)=0;
delta_u_p(1:D-1)=0; % Przeszłe przyrosty u
delta_z_p(1:Dz)=0; % Przeszłe przyrosty z
yzad = yzad*ones(kk,1);

% Główna pętla symulacyjna
for k=k_shift+1:kk
    % Symulacja obiektu
    y(k) = symulacja_obiektu15y_p2(u(k-6), u(k-7), ...
        z(k-3), z(k-4), y(k-1), y(k-2));

    % Uchyb regulacji
    e(k)=yzad(k)-y(k);

    % Aktualizacja przeszłych przyrostów zakłócenia
    for m=Dz-1:-1:2
        delta_z_p(m) = delta_z_p(m-1);
    end
    % Zmiana zakłócenia
    delta_z_p(1) = z(k) - z(k-1);

    % Obliczenie przyrostu sygnału sterującego DMC
    delta_u = ke * e(k) - ku * delta_u_p' - kz * delta_z_p';

    % Aktualizacja sygnału sterującego
    u(k)=u(k-1)+delta_u;

    % Aktualizacja przeszłych przyrostów sterowania
    for n=D-1:-1:2
        delta_u_p(n) = delta_u_p(n-1);
    end
end

```



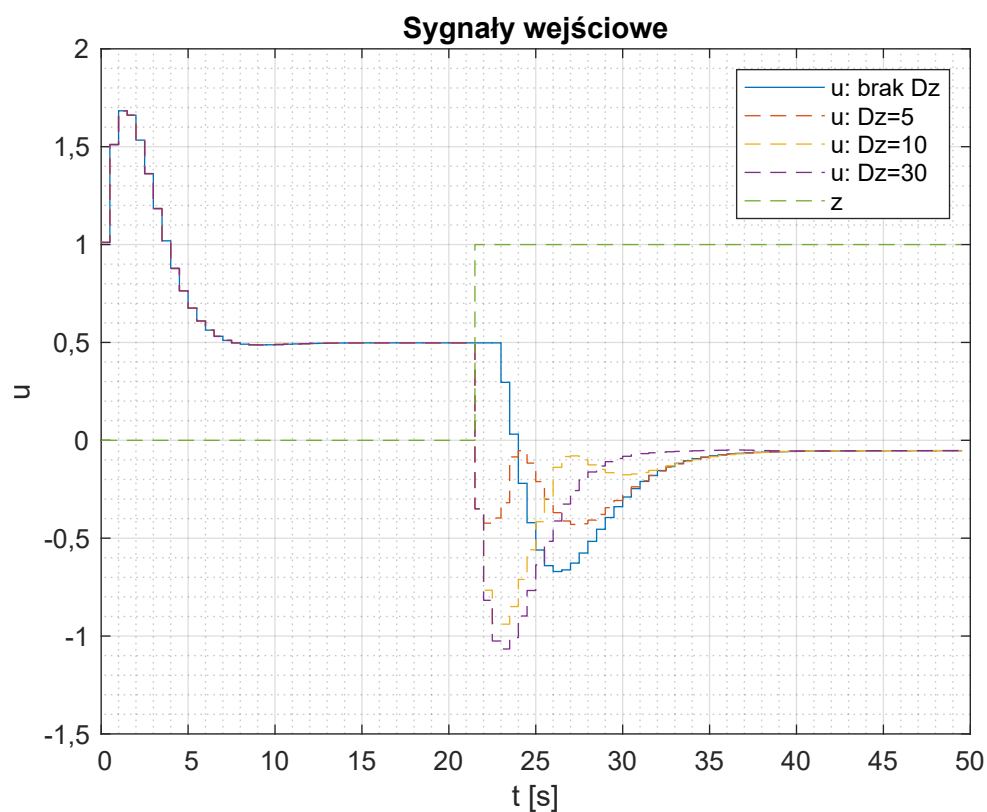
```
    delta_u_p(1) = delta_u;  
end  
y(1:k_shift)=[]; u(1:k_shift)=[];  
end
```

1.5.2. Symulacje skoku jednostkowego zakłócenia

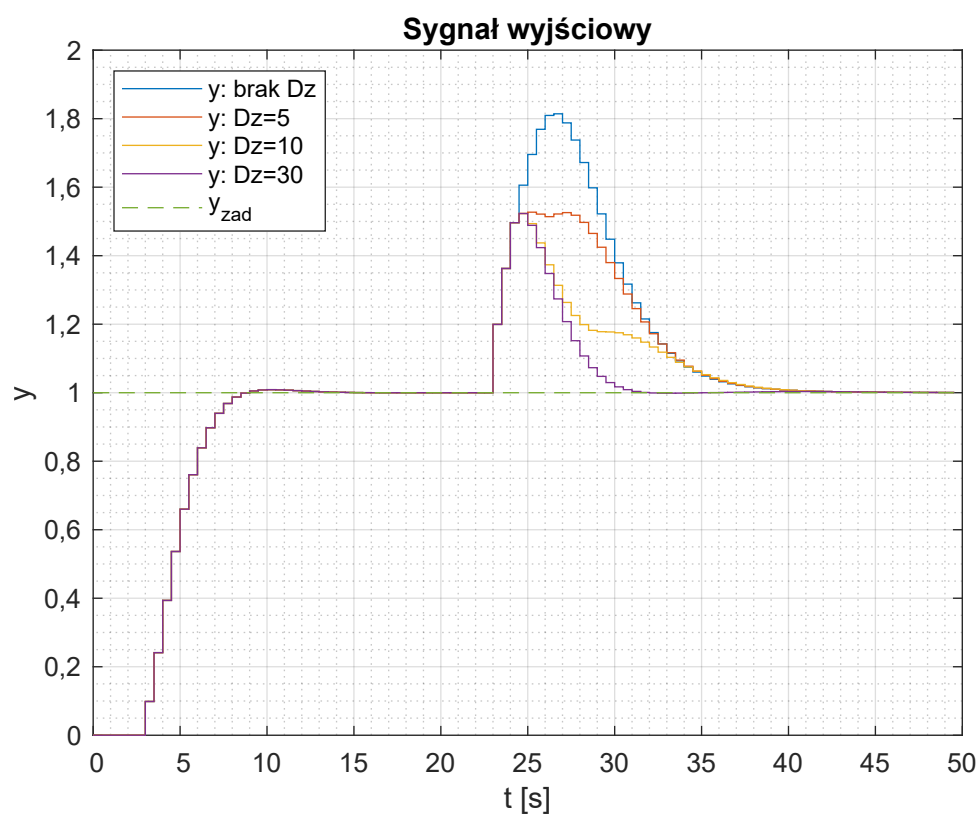
W celu dobrania odpowiedniej wartości nowego parametru D_z w regulatorze DMC z pomiarem zakłócenia przeprowadzono szereg symulacji dla różnych wartości tego parametru. Pozostałe parametry regulatorów DMC przyjęto takie same jak dla regulatora dostrojonego metodą eksperymentalną i są one przedstawione w tabeli 1.3. Otrzymane przebiegi z symulacji porównywano również z regulatorem DMC bez pomiaru zakłóceń, aby móc w szerszej perspektywie ocenić wpływ pomiaru zakłóceń na regulator DMC. Dobór parametru D_z rozpoczęto od przeanalizowania wykresów odpowiedzi jednostkowej toru zakłócenie-wyjście przedstawionym na wykresie 1.6. Z tej analizy wynikało, że dynamika analizowanego toru wynosi ok 30 okresów próbkowania. W związku z tym jako pierwsza wartość sprawdzaną przyjęto $D_z = 30$. Następnie sprawdzono jak na jakość regulacji wpłynie zmniejszenie wartości D_z do 10 oraz 5. Wyniki badań dla $D_z = \{5, 10, 30\}$ przedstawiono na wykresach 1.11 i 1.12.

Regulatory z D_z zadziały natychmiastowo wraz z pojawieniem się zakłócenia z , zamiast czekać na informacje o zakłóceniu z pomiaru y jak to jest w przypadku niebieskiego sygnału regulatora. Dla $D_z = 5$ regulator nie miał wystarczająco dużo informacji o tym jak zmiana zakłócenia wpływa na obiekt, a dodatkowo sama zmiana po 5 okresach zniknęła już z wektora przeszłych przyrostów z , dlatego sygnał sterujący przedwcześnie odbił w niezamierzonym kierunku, a na sygnale wyjściowym są widoczne dwa łuczki w kształcie litery m. Działanie regulatora z takim parametrem jest już zauważalnie lepsze, jednak zmiana D_z na 10 przyniosła jeszcze lepsze rezultaty. Pik sygnału sterującego był zdecydowanie większy niż poprzednio i nie odbił tak wcześnie, jednak na sygnale wyjściowym widać moment w którym zmiana sygnału z zniknęła z wektora przeszłych przyrostów. Najlepszym z badanych teraz regulatorów okazał się ten z $D_z = 30$, ponieważ nie charakteryzuje się widocznym odbiciem w sygnale sterującym ani wyjściowym, a ten ostatni szybko i zadowalająco zbiega do wartości zadanej.

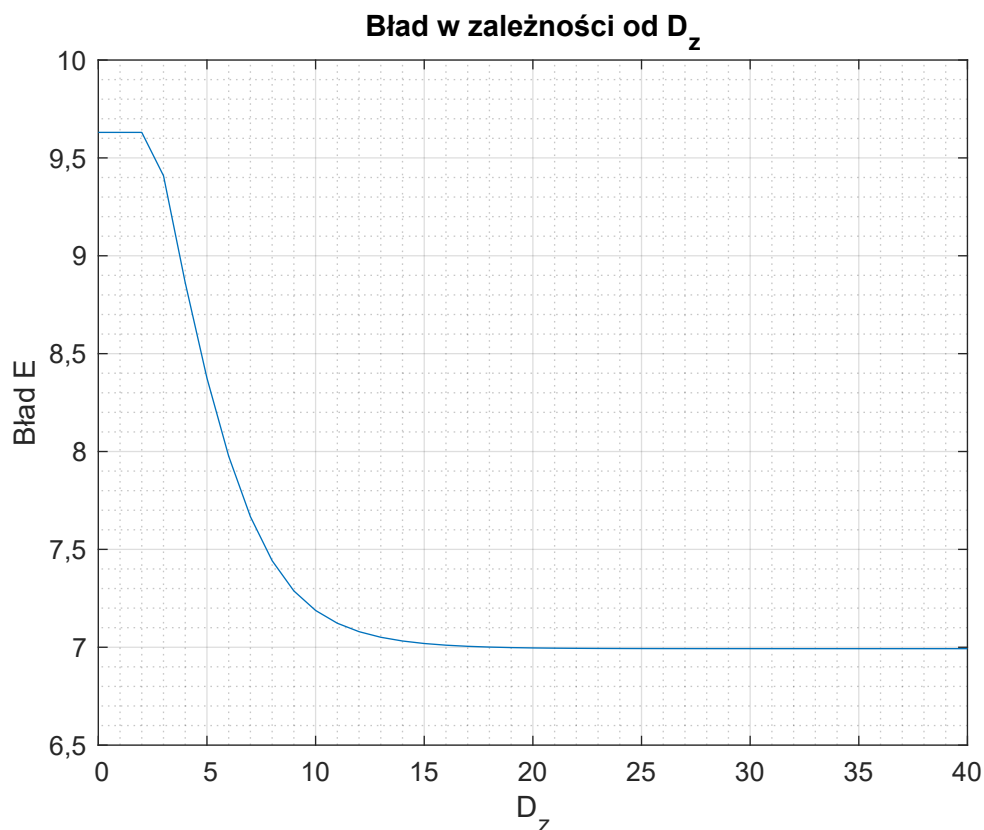
Dzięki szybszej zmianie sterowania maksymalny uchyb wszystkich regulatorów z D_z zmalał o jedną trzecią w porównaniu z prostym regulatorem.



Rys. 1.11. Porównanie u prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń z różnymi D_z gdzie $z = 1,0$



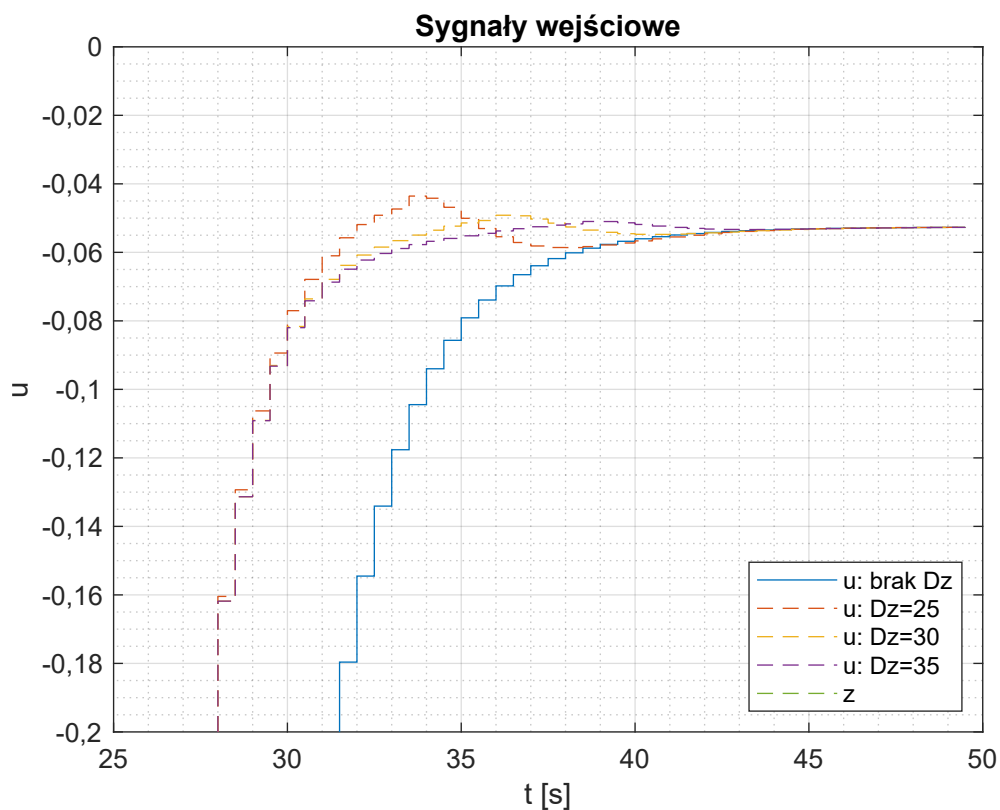
Rys. 1.12. Porównanie y dla prostego DMC i DMC z pomiarem zakłóceń z różnymi D_z gdzie $z = 1,0$



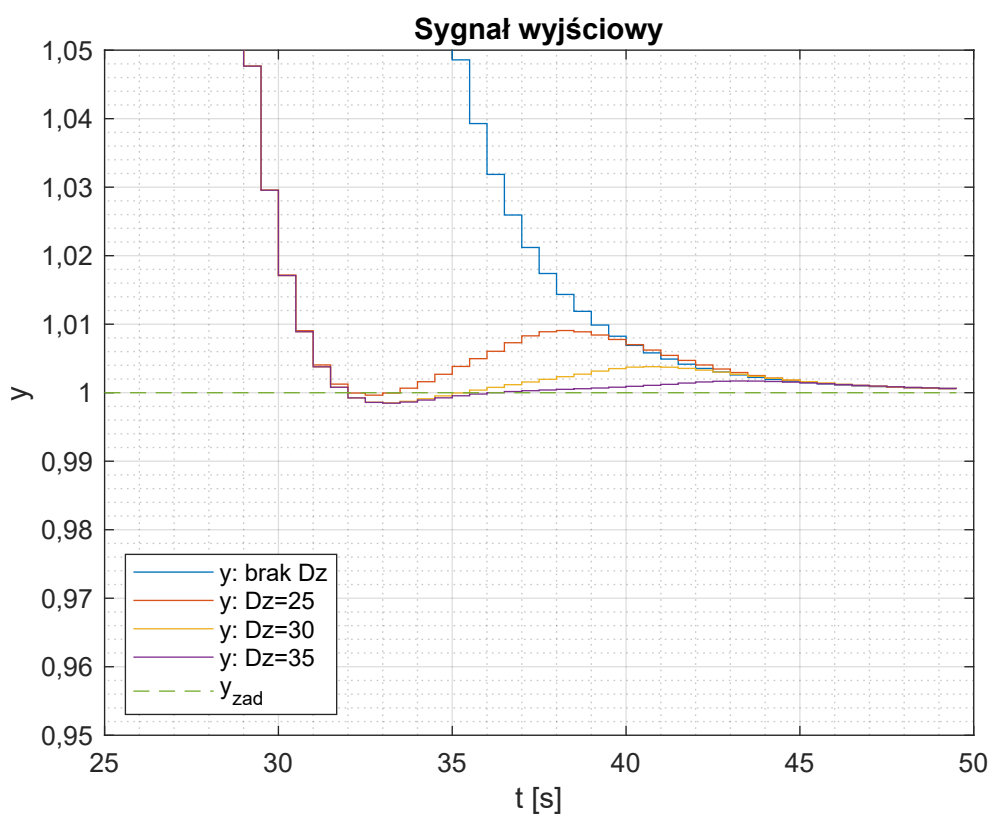
Rys. 1.13. Błąd w zależności od długości horyzontu dynamiki w torze zakłócenia

Sprawdzono również jak wygląda wykres błędów dla różnych D_z , szczególnie większych niż oszacowany horyzont dynamiki z odpowiedzi skokowej. Rys. 1.13 pokazuje, że algorytmy DMC z parametrem D_z powyżej 20 charakteryzują się bardzo podobną (choć nie identyczną) skutecznością w minimalizacji błędów w wyniku pojawienia się zakłóceń. Sprawdzono dodatkowo działanie regulatorów dla parametrów $D_z = \{25, 30, 35\}$, aby potwierdzić prawdziwość wykresu. Z racji, że są to już duże horyzonty, różnice w ich działaniu będą widoczne dopiero w końcówce reagowania na zmianę sygnału z , dlatego na rysunkach 1.14 i 1.15 przybliżono wykresy do interesujących obszarów.

Przy takim powiększeniu, wszystkie horyzonty mogą wydawać się zbyt krótkie, ponieważ wciąż widać pewne odbicia. Jednak rząd wielkości tych subtelnych różnic jest bardzo mały i właśnie z tego powodu na wykresie błędów kwadratowych nie były one widoczne. Uznano, że przyjęcie $D_z = 35$ do dalszych badań będzie satysfakcjonujące.



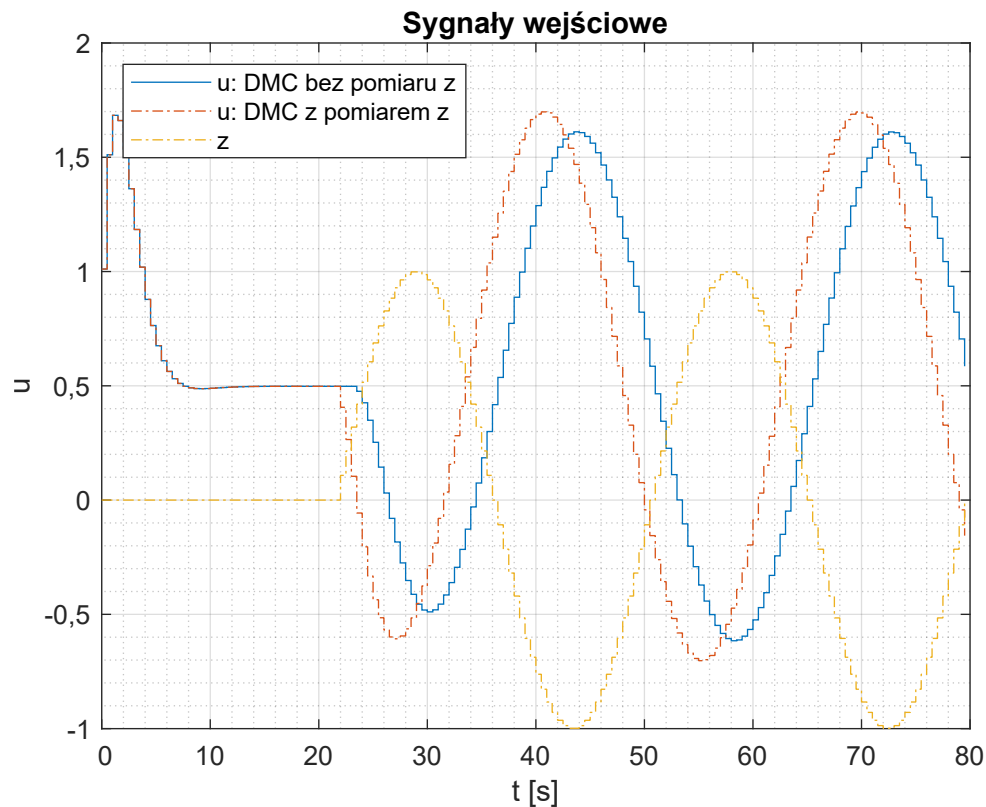
Rys. 1.14. Porównanie u prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń z różnymi D_z gdzie $z = 1,0$



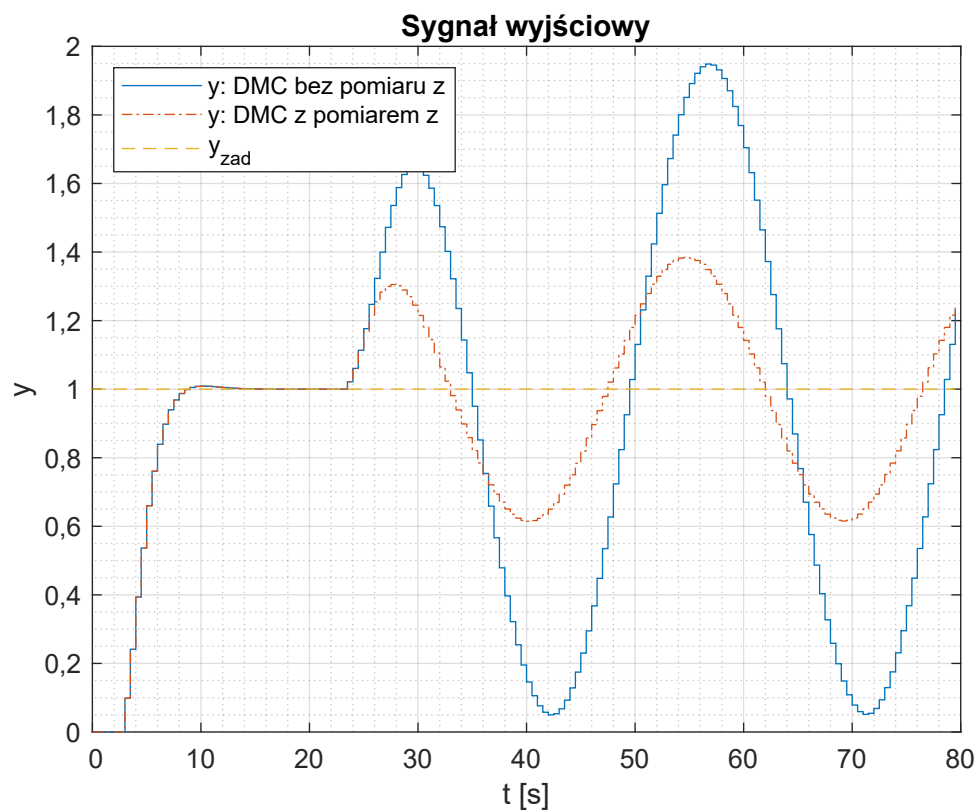
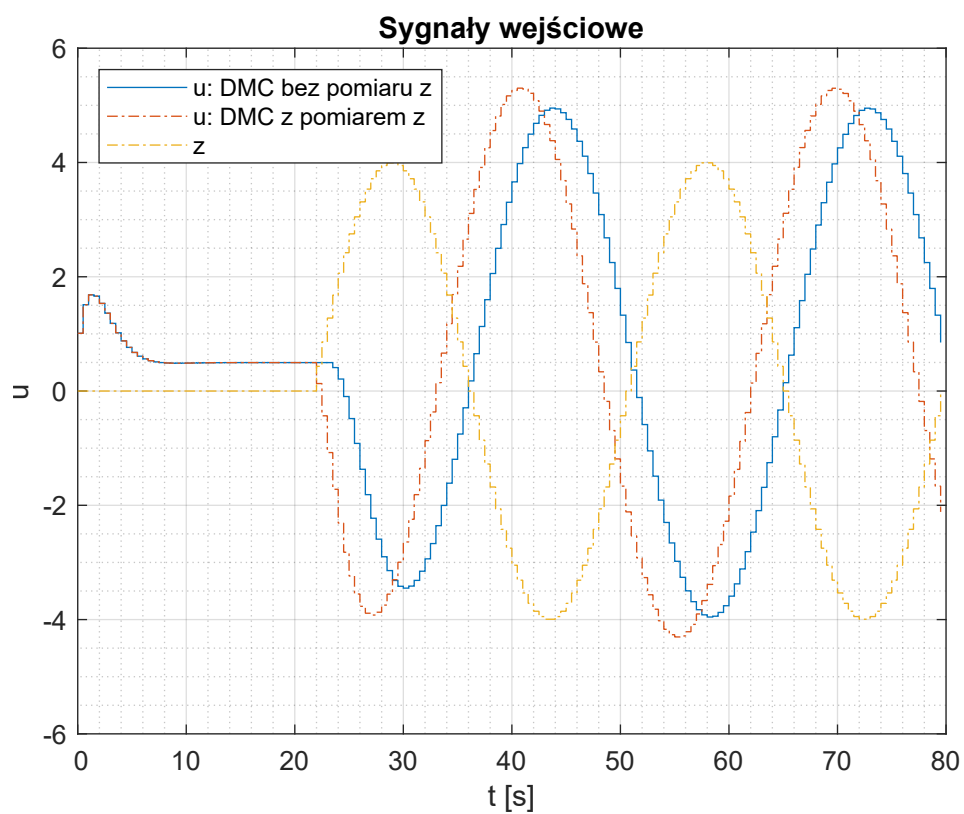
Rys. 1.15. Porównanie y dla prostego DMC i DMC z pomiarem zakłóceń z różnymi D_z gdzie $z = 1,0$

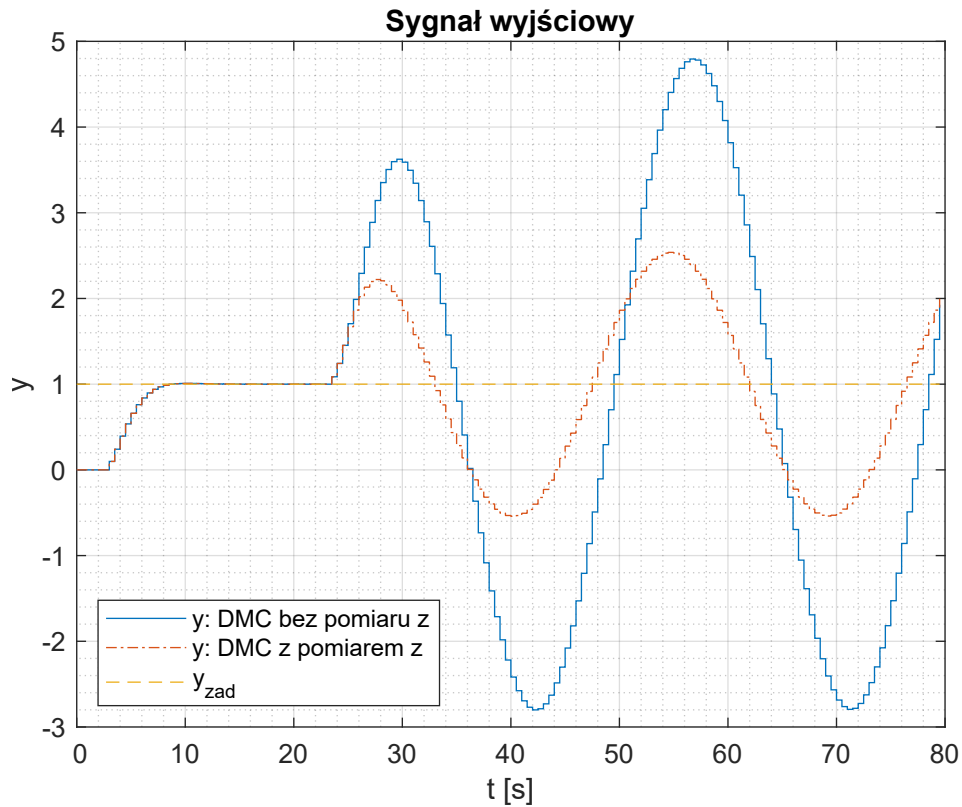
1.6. Badanie wpływu zakłócenia sinusoidalnego na działanie DMC

Do przebadania wpływu zakłócenia sinusoidalnie zmiennego wykorzystano 2 regulatory DMC. Jeden bez pomiaru zakłóceń z parametrami przedstawionymi w tabeli 1.3, a drugi z pomiarem z tymi samymi parametrami podstawowymi oraz $D_z = 35$. Symulacje przeprowadzono dla dwóch sygnałów sinusoidalnych o różnych wartościach maksymalnych i przedstawiono je na wykresach 1.20, 1.21, 1.22, 1.23. Poniższe przebiegi pokazują, że regulator DMC nie jest najlepszym rozwiązaniem przy sygnałach sinusoidalnie zmiennych, ponieważ bazuje na modelu odpowiedzi skokowej. Jednakże DMC z pomiarem zakłóceń okazuje się znacznie lepszy od DMC bez pomiaru zakłóceń, gdyż maksymalna wartość uchybu jest około 3,5 razy mniejsza. Spowodowane jest to tym, że pomiar zakłócenia pozwala na wcześniejsze zareagowanie na zakłócenie, co w przypadku ciągle zmieniającej się wartości zakłócenia jest niesamowicie ważne, gdyż reagowanie z opóźnieniem na zmiany może spowodować spotęgowanie wpływu zakłócenia na wyjścia obiektu.



Rys. 1.16. Porównanie u prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń dla zakłócenia $z = \sin(t)$

Rys. 1.17. Porównanie y dla prostego DMC i DMC z pomiarem zakłóceń dla zakłócenia $z = \sin(t)$ Rys. 1.18. Porównanie u prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń dla zakłócenia $z = 4\sin(t)$



Rys. 1.19. Porównanie y dla prostego DMC i DMC z pomiarem zakłóceń dla zakłócenia $z = 4\sin(t)$

1.7. Badanie wpływu szumu pomiaru zakłócenia na działanie DMC

W celu zbadania wpływu szumu pomiaru zakłócenia do funkcji odpowiadającej za symulację regulatora DMC z pomiarem zakłóceń dodano losową wartość zaszumienia pomiaru zakłócenia o określonej wartości jako dodatkowy argument funkcji, która w przypadku rzeczywistego procesu wynika z dokładności czujników mierzących daną wartość. W związku z tym zmiane uległy argumenty funkcji symulującej regulator DMC z pomiarem zakłóceń, które przedstawiono w tabeli 1.6.

Parametr	Opis
kk	ilość kroków symulacji
yzad	zadana wartość wyjścia
N	horyzont predykcji
Nu	horyzont sterowania
D	horyzont dynamiki sterowania
lambda	współczynnik kary za zbyt duże przyrosty sterowania
Dz	horyzont dynamiki zakłócenia
z	wektor trajektorii zmian zakłóceń
szum_val	maksymalna wartość szumu pomiaru zakłóceń

Tab. 1.6. Parametry wejściowe algorytmu DMC

W części offline dodano symulowanie szumu w pomiarze zakłóceń, tuż przed główną pętlą symulującą działanie DMC z pomiarem zakłóceń.

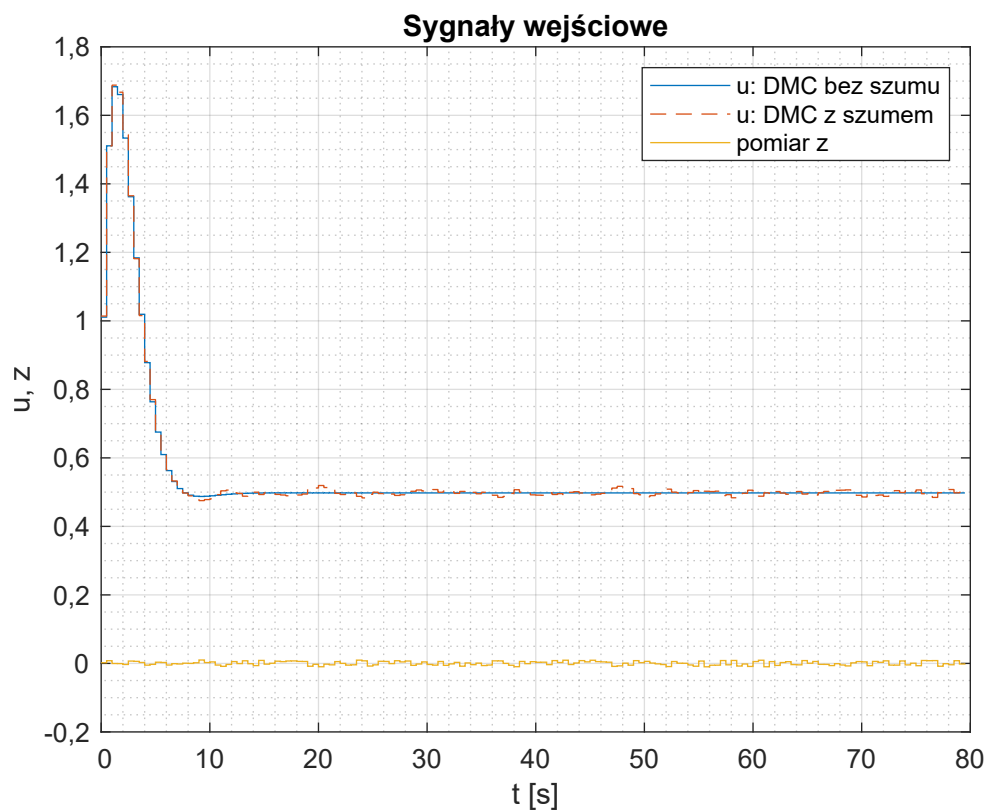
```
% Dodanie szumu do pomiaru z
z_pom=z;
for i=1:kk
```

```
z_pom(i)=z_pom(i) + szum_val*(2*rand-1);  
end
```

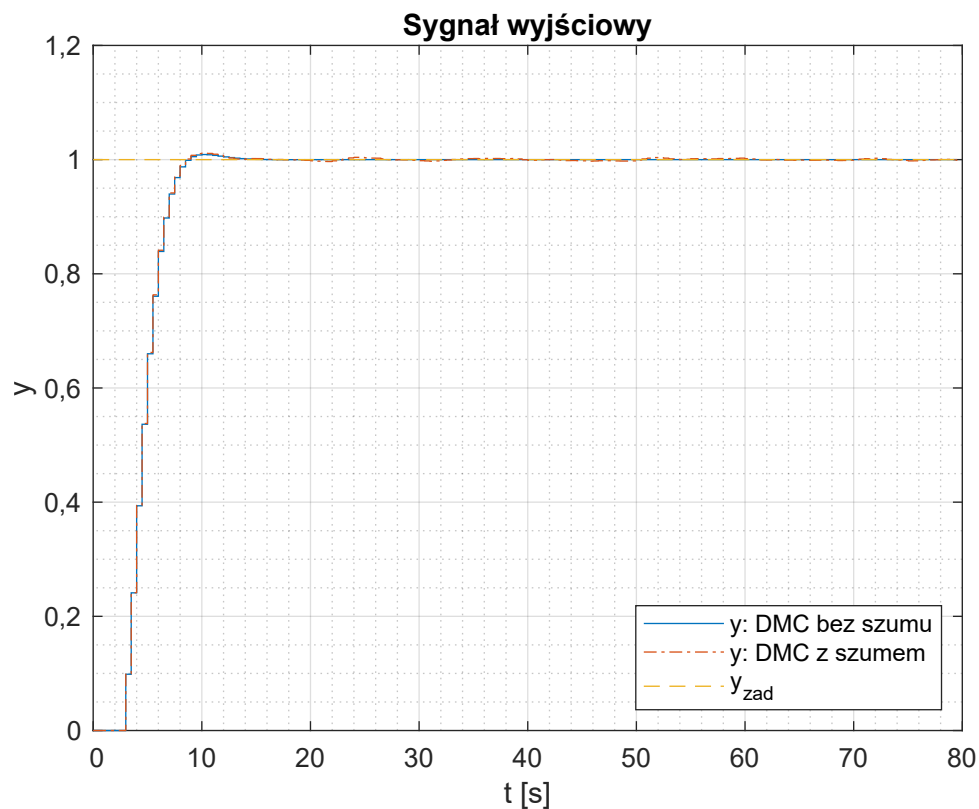
W części online zmieniono wyliczanie zmiany zakłócenia na biorące wartości z pomiaru, a nie wartość realnie występująca. Jedną z najważniejszych rzeczy które pozostały bez zmian jest to, że przy obliczaniu wyjścia obiektu wykorzystywana jest wartość zakłócenia docierająca do obiektu, a nie pomiar.

```
% Zmiana zakłócenia  
delta_z_p(1) = z_pom(k) - z_pom(k-1);
```

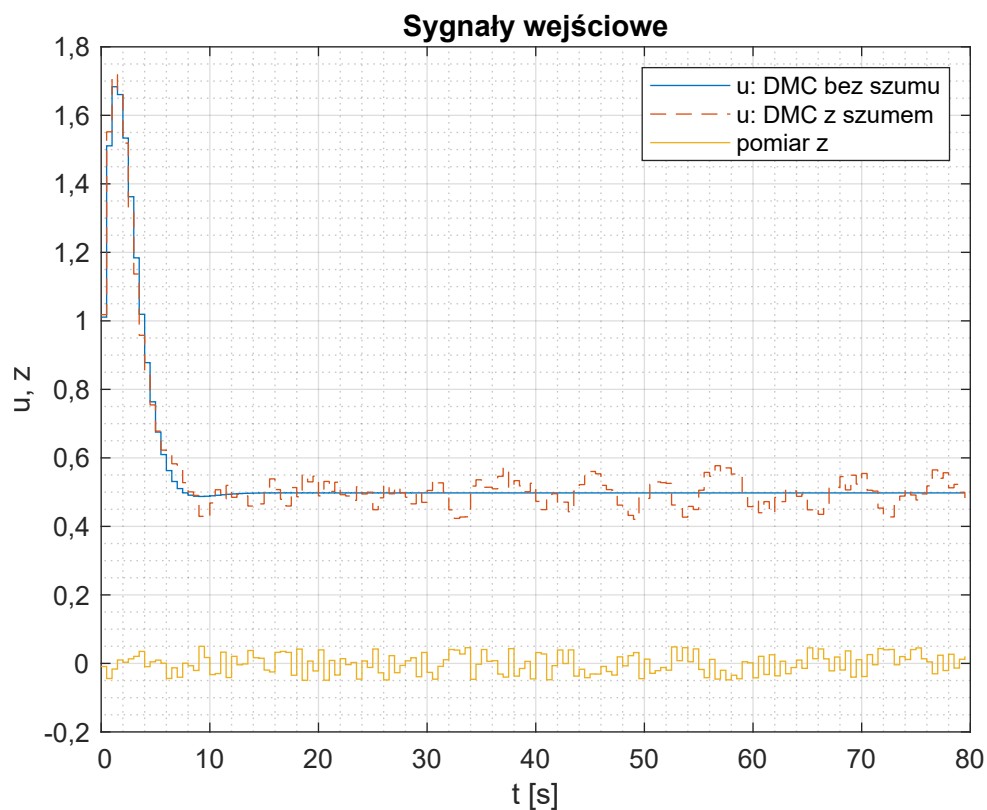
Symulacje przeprowadzono na regulatorze DMC z pomiarem zakłóceń o parametrach dobranych w poprzednich podpunktach dla szumu o dwóch wartościach: małej równej 0,01 oraz średniej 0,05 oraz dla porównania dla tego samego regulatora bez szumu. Zaprezentowano je na wykresach 1.20, 1.21, 1.22, 1.23. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że szumy pomiaru zakłóceń mają wpływ na działanie regulatora DMC z pomiarem zakłóceń oraz że znaczenie tego wpływu zależy od wartości maksymalnych szumu. Dla małego szumu odchylenie wartości wyjścia od zadanej wartości jest nieznaczne i w większości rzeczywistych procesów pojawiająca się niedokładność regulacji będzie akceptowalna przy korzyściach płynących z pomiaru zakłócenia przedstawionych w rozdziałach powyżej. Za to w przypadku średniego szumu odchylenia wyjścia od wartości zadanej są zdecydowanie większe i mogą być już nieakceptowalne w pewnej części zastosowań fizycznych pomimo korzyści płynących z pomiaru zakłóceń. Szumy pomiaru wynikają głównie z dokładności pomiaru oraz zewnętrznych zakłóceń podczas pomiaru zakłócenia. Prowadzi to do wniosku, że w przypadku rozważania zastosowania regulatora DMC z pomiarem zakłóceń trzeba wziąć pod uwagę te czynniki i przeanalizować ich wpływ na działanie regulatora. Jeżeli okaże się on znaczący to pozostaje decyzja czy ważniejsze jest lepsze pozbywanie się wpływu zakłóceń na wartość wyjścia czy jednak dokładność regulacji i brak/mniejsze odchylenia od wartości zadanej wyjścia obiektu.



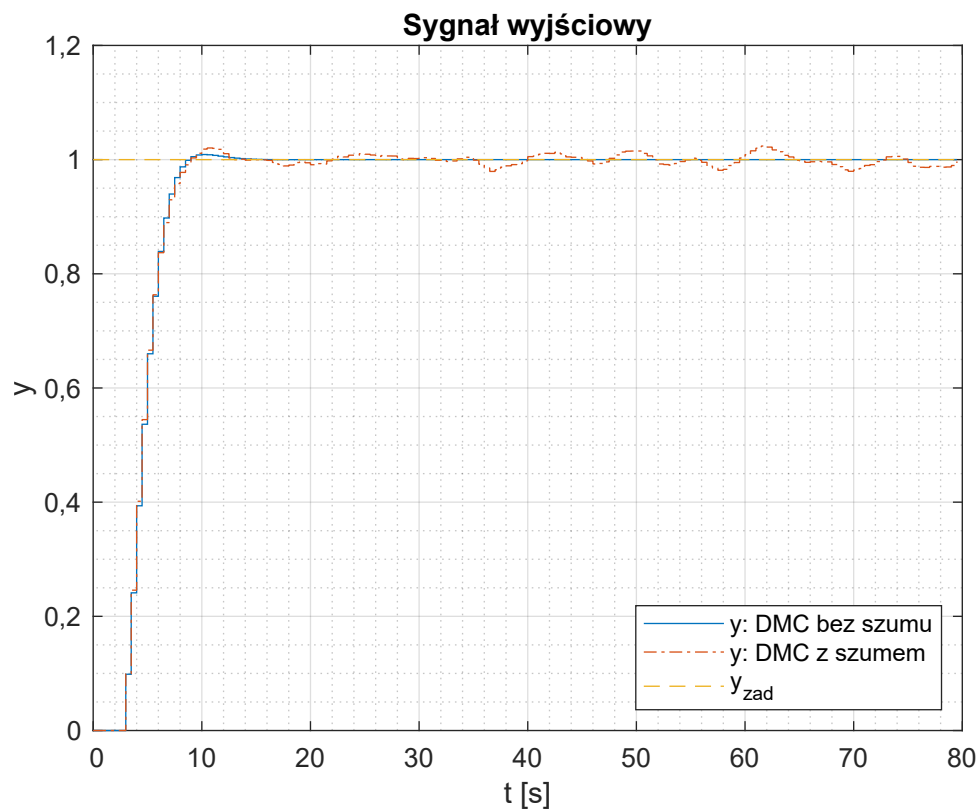
Rys. 1.20. Porównanie u prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń dla małych szumów pomiaru zakłócenia



Rys. 1.21. Porównanie y prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń dla małych szumów pomiaru zakłócenia



Rys. 1.22. Porównanie u prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń dla średnich szumów pomiaru zakłócenia



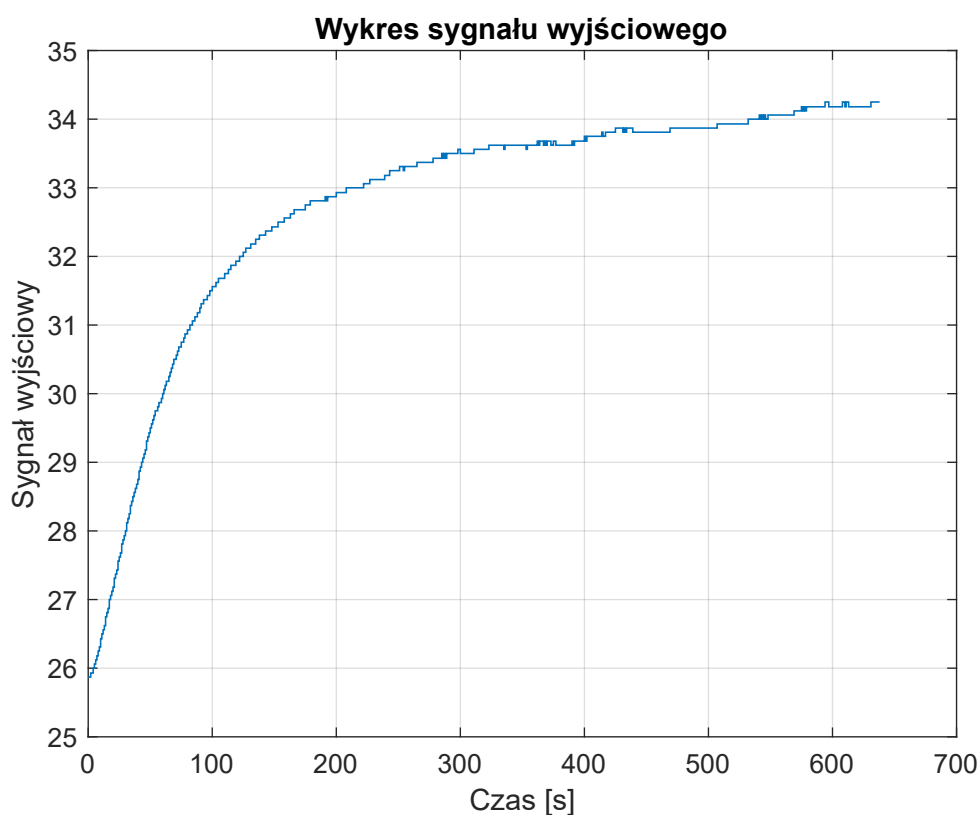
Rys. 1.23. Porównanie y prostego DMC z DMC z pomiarem zakłóceń dla średnich szumów pomiaru zakłócenia

2. Laboratorium

2.1. Sterowanie i komunikacja ze stanowiskiem grzewczo-chłodzącym przy użyciu programu MATLAB oraz określenie punktu pracy

Dla zespołu o numerze 15 moc grzałki w punkcie pracy ma wartość 25.

W celu określenia pomiaru temperatury w punkcie pracy ustawiono wartości sygnałów G_1 na 25, W_1 na 50 oraz Z na 0 i odczekano do ustabilizowania się pomiaru.

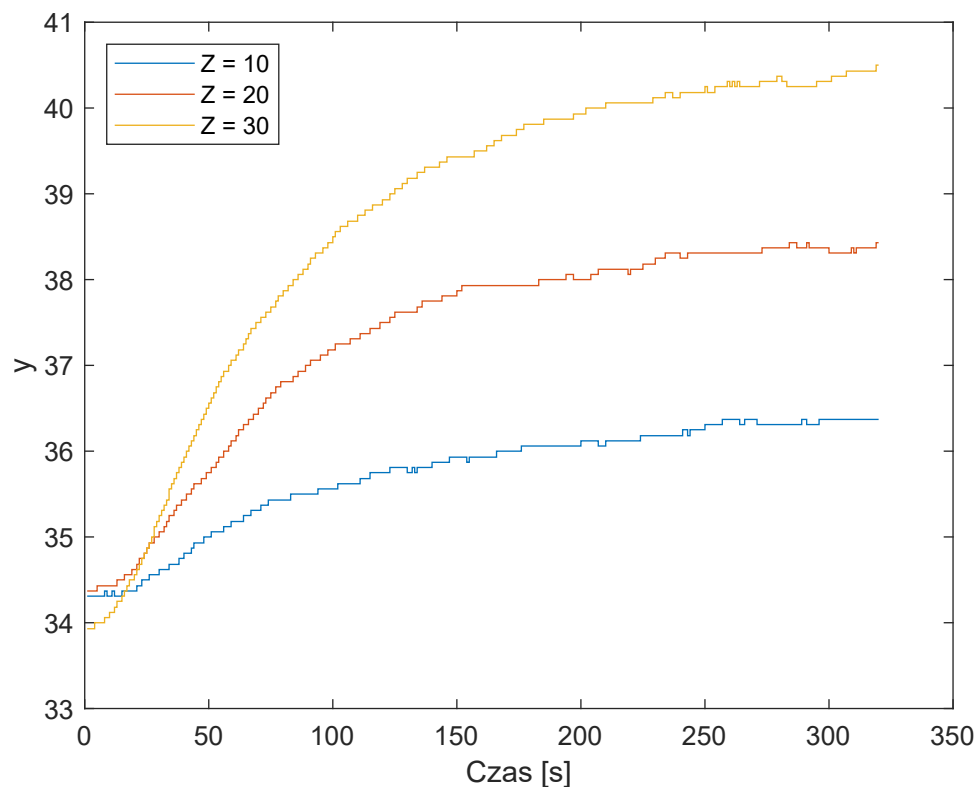


Rys. 2.1. Wykres pomiaru temperatury w punkcie pracy $G_1 = 25$

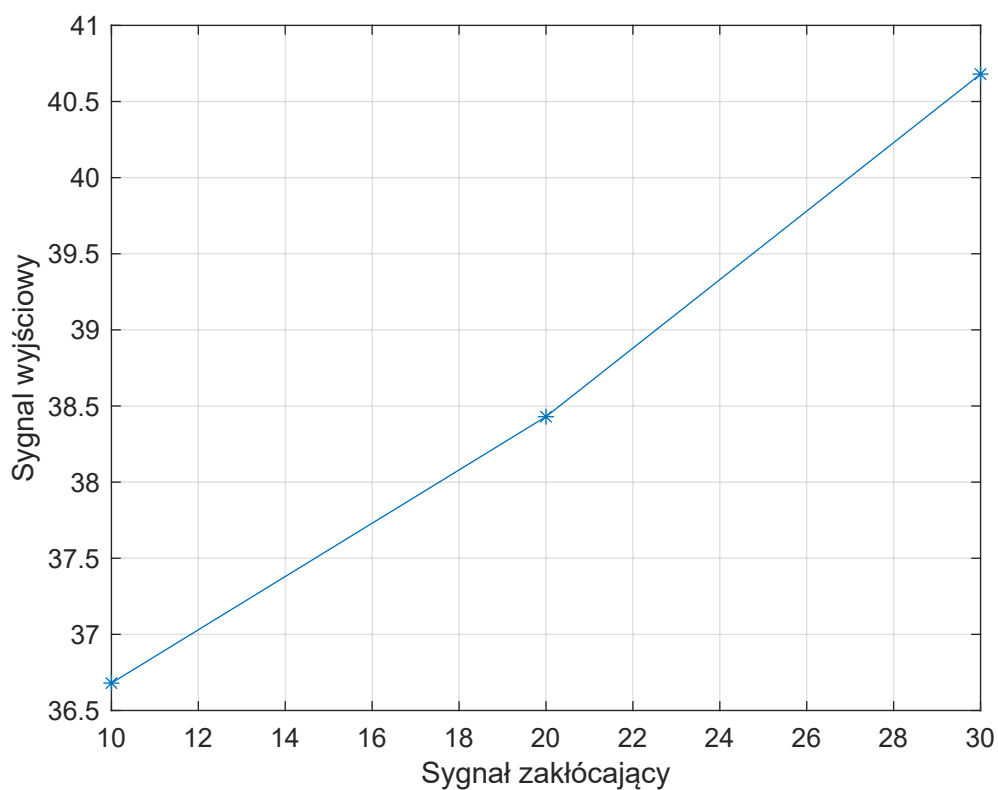
Temperatura po około dziesięciu minutach ustabilizowała się na wartości w przybliżeniu $34,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. W kolejnych częściach laboratorium właśnie ta wartość będzie traktowana jako warunek początkowy.

2.2. Odpowiedzi skokowe w torze zakłóceń

Odpowiedzi skokowe wyznaczono rozpoczynając z punktu pracy, gdzie przy $G_1 = 25$ temperatura była w okolicach $34,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wyznaczono 3 odpowiedzi skokowe dla różnych wartości Z aby mieć szerszy pogląd na statykę obiektu przy skokach zakłócenia do wartości 10, 20 oraz 30. Otrzymane odpowiedzi pokazano na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Przebiegi odpowiedzi skokowych dla różnych wartości zakłócenia



Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna w torze zakłócenia

Właściwości statyczne obiektu można określić jako w przybliżeniu liniowe, ponieważ wartości sygnału wyjściowego po stabilizacji zmieniają się (w przybliżeniu) proporcjonalnie do skoku war-

tości zakłócenia. Innymi słowy, patrząc na wykres można zauważyć, że odstęp między kolejnymi odpowiedziami skokowymi są jednakowe, biorąc pod uwagę, że odstęp między skokami zakłóceń także były jednakowe (kolejno 10, 20 i 30) - można tu mówić o liniowości. Wzmocnienie statyczne dla poszczególnych torów wynosi kolejno: 0,237; 0,203; 0,225, co po uśrednieniu daje ostatecznie $K_{statz} = 0.222$.

2.3. Aproksymacja odpowiedzi skokowych

2.3.1. Tor sterowania

Odpowiedzi skokowe w torze sterowania zostały już przygotowane przy okazji pracy nad poprzednim blokiem laboratoryjnym, więc w tym projekcie wykorzystano je ponownie, z uwagi na pracę z tym samym, niezmiennym obiektem. Jednakże dla spójności (tę samą metodykę wykorzystano w przypadku przygotowania odpowiedzi skokowej w torze zakłócenia) poniżej znajduje się opis działań, jakie wykonano, aby ją otrzymać. Do wykorzystania w algorytmie DMC odpowiedzi skokowej należy ją znormalizować oraz pozbyć się z niej zakłóceń i wpływu niepewności pomiaru na wyliczane w algorytmie macierze (temperatura odczytywana jest z rozdzielczością 0,06). W celu optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny, ponieważ parametr T_d musi być liczbą całkowitą. Wszystkie parametry zainicjowano jako wartości 0, aby rozpocząć od najbardziej "bazowych" parametrów, a z uwagi, że korzystano z algorytmu genetycznego, nie ma możliwości, aby tak zainicjalizowana optymalizacja "utknęła" w zerze. Nadane ograniczenia dolne wynikają z faktu, że chcemy uzyskać podwójną inercję, zatem T_1 i T_2 muszą wynosić co najmniej 1. Z kolei parametry K oraz T_d powinny być dodatnie, aby taka aproksymacja była zgodna z rzeczywistym obiektem, czyli zapewniono w ten sposób, że na początku działania po inicjalizacji parametrów w zerze, algorytm nie zacznie szukać rozwiązania dla ujemnych parametrów, co byłoby całkowicie niezgodne z rzeczywistym obiektem. Z kolei ograniczenia górne są po prostu przykładowymi, dużymi wartościami, które możemy z dużą dozą zaufania założyć, że nie są przekraczane przez idealny model badanego obiektu, z tą uwagą, że parametr T_d akurat znacznie ograniczono od góry, ponieważ widać wyraźnie, że obiekt laboratoryjny ma opóźnienie, ale nie jest one znaczne, a ten parametr ma znaczący wpływ na późniejsze działanie regulatora.

```
kk = 460;
ymierz = odczyt_danych_z_txt("pomiary/skok_3_35.txt");
ymierz = (ymierz-32.68)/10; % skok z 25 do 35

parametry_pocz = [0, 0, 0, 0];
ogr_dol = [1, 1, 0, 0];
ogr_gor = [120, 120, 50, 12];

IntCon = 4; % Td musi być liczbą całkowitą
options = optimoptions('ga', 'Display', 'iter');

parametry_optymalne = ga(@(parametry) ...
    p3_funkcja_kosztu(parametry, kk, ymierz), 4, ...
    [], [], [], [], ogr_dol, ogr_gor, [], IntCon, options);

T1 = parametry_optymalne(1);
T2 = parametry_optymalne(2);
K = parametry_optymalne(3);
Td = parametry_optymalne(4);
```

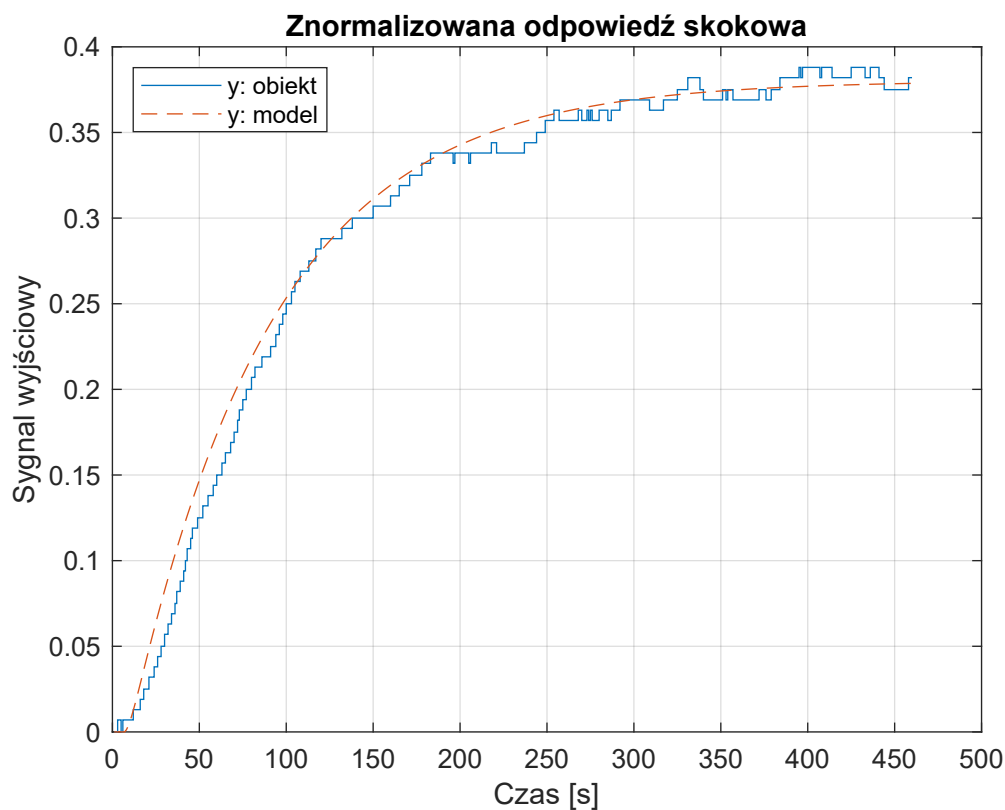
Funkcja użyta w powyższym kodzie do testowania modelu i wyliczania jego błędu względem pomiarów:

```
function E = p3_funkcja_kosztu(parametry, kk, ymierz)
T1 = parametry(1);
T2 = parametry(2);
K = parametry(3);
Td = parametry(4);

% przekształcenie parametrów transmitancji
%   na parametry równania różnicowego
alfa1 = exp(-1/T1);
alfa2 = exp(-1/T2);
a1 = - alfa1 - alfa2;
a2 = alfa1*alfa2;
b1 = (K/(T1-T2))*(T1*(1-alfa1)-T2*(1-alfa2));
b2 = (K/(T1-T2))*(alfa1*T2*(1-alfa2)-alfa2*T1*(1-alfa1));

% symulacja modelu otrzymanego w danej iteracji
kk = kk+Td+3;
u(1:Td+2)=0; u(Td+3:kk)=1;
y = zeros(kk,1);
for k=3+Td:kk
    y(k)=b1*u(k-Td-1)+b2*u(k-Td-2)-a1*y(k-1)-a2*y(k-2);
end
y(1:Td+3)=[];

% obliczenie kosztu - błędu między pomiarami a modelem
E = (ymierz - y)' * (ymierz - y);
end
```

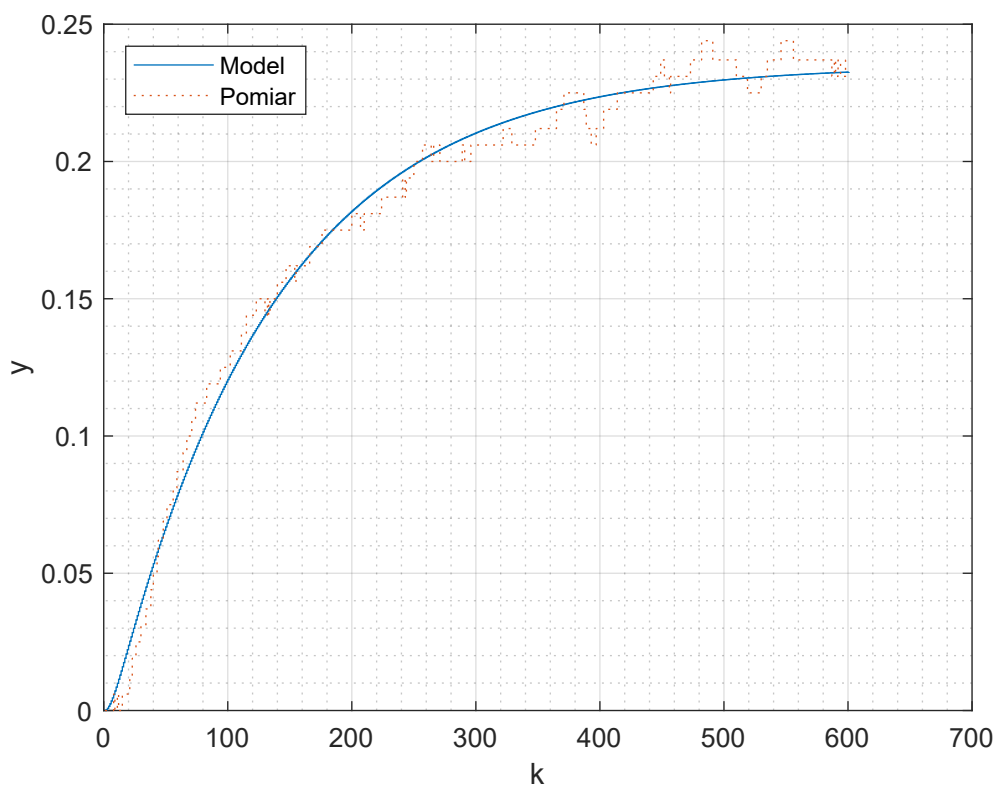
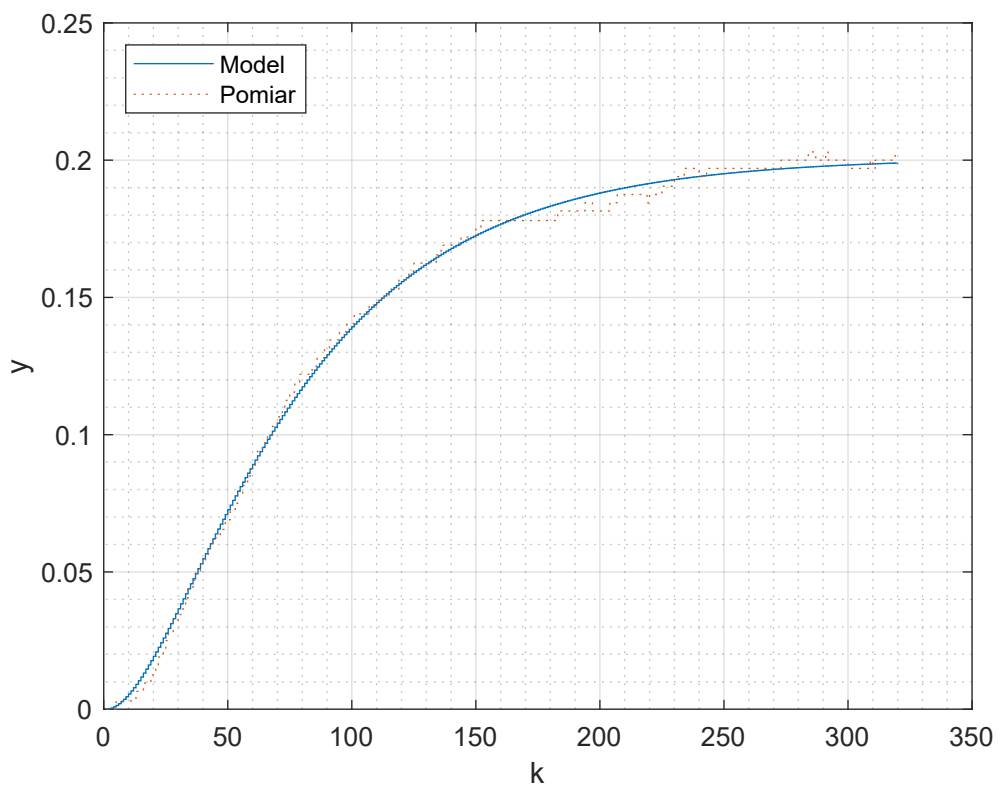
Rys. 2.4. Przebiegi znormalizowanej odczytanej i aproksymowanej odpowiedzi skokowej dla $u=35$

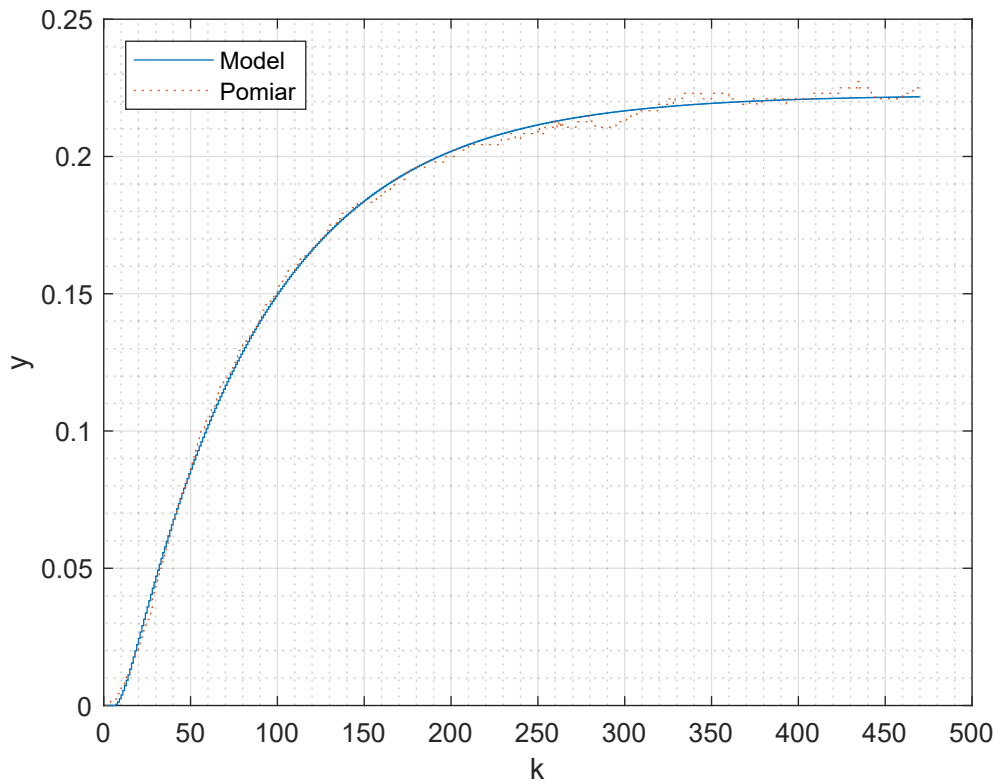
Tab. 2.1. Parametry aproksymacji odpowiedzi skokowej

Parametr	Wartość
T_1	82,0474
T_2	3,3333
K	0,3802
T_d	6

2.3.2. Tor zakłócenia

W torze zakłócenia normalizacja oraz optymalizacja została przeprowadzona w identyczny sposób, opis tych działań więc nie będzie ponownie przytaczany. Jediną różnicą są górne ograniczenia dla parametrów T_1 oraz T_2 , zostały zwiększone do 200, gdyż podczas przygotowywania aproksymacji zauważono, że zdarzają się sytuacje, w których osiągnięta jest górna granica dla któregoś z tych parametrów. Poniżej znajdują się znormalizowane oraz aproksymowane odpowiedzi skokowe kolejno dla $Z = 10, 20, 30$ oraz tabela z wartościami poszczególnych parametrów.

Rys. 2.5. Przebiegi znormalizowanej odczytanej i aproksymowanej odpowiedzi skokowej dla $z=10$ Rys. 2.6. Przebiegi znormalizowanej odczytanej i aproksymowanej odpowiedzi skokowej dla $z=20$

Rys. 2.7. Przebiegi znormalizowanej odczytanej i aproksymowanej odpowiedzi skokowej dla $z=30$ Tab. 2.2. Parametry aproksymacji odpowiedzi skokowej z

Parametr	$Z=10$	$Z=20$	$Z=30$
T_1	130,3169	11,6269	77,5160
T_2	1,0208	67,3624	11,3039
K	0,2352	0,2019	0,2219
T_d	5	7	5

Tab. 2.3. Błędy aproksymacji odpowiedzi skokowej z

Parametr	$Z=10$	$Z=20$	$Z=30$
Błąd E	0,0285	0,0021	0,0031

Najlepszą aproksymacją oceniając pod kątem wielkości błędu modelu względem pomiarów (tab. 2.3) okazała się odpowiedź skokowa zakłócenia na $z = 20$ i właśnie ten model będzie wykorzystywany w regulatorze DMC.

2.4. Regulator DMC bez zakłóceń na obiekcie

2.4.1. Kod prostego regulatora DMC

```

kk=3000; % koniec symulacji
umin = 0; umax=100;

yzad(1:kk) = 37;
N = 200;
Nu = 5;

```

```
D = 500;
lambda = 0.2;

% Odpowiedź skokowa zdyskretyzowanego systemu
ys = odp_jedn(750);

% Konstrukcja macierzy M
M = zeros(N,Nu);
for column=1:Nu
    M(column:N,column) = ys(1:N-column+1);
end

% Konstrukcja macierzy Mp
Mp = zeros(N,D-1);
for j = 1:D-1
    for i = 1:N
        c = min([i+j,D]);
        Mp(i,j) = ys(c) - ys(j);
    end
end

% Obliczenie macierzy sterującej K
K = (M.'*M + lambda*eye(Nu,Nu))\M.';
K1 = K(1,:);
ke = sum(K1);
ku = K1*Mp;

% Warunki początkowe
u(1:kk)=0; y(1:kk)=0; e(1:kk)=0;
u(1)=25; y(1)=32.87;% y(1)=34.4; % y(1)=32.68;
delta_u_p(1:D-1)=0; % Przeszłe przyrosty u
z(1:kk)=0;
% Główna pętla symulacyjna
for k=2:kk
    % Symulacja obiektu
    y(k) = readMeasurements (1);

    % Uchyb regulacji
    e(k)=yzad(k)-y(k);

    % Obliczenie przyrostu sygnału sterującego DMC
    delta_u = ke * e(k) - ku * delta_u_p';

    % Ograniczenia
    if u(k-1)+delta_u < umin
        delta_u = umin-u(k-1);
    elseif u(k-1)+delta_u > umax
        delta_u = umax-u(k-1);
    end

    % Aktualizacja sygnału sterującego
```

```

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

% Aktualizacja przeszłych przyrostów sterowania
for n=D-1:-1:2
    delta_u_p(n) = delta_u_p(n-1);
end
delta_u_p(1) = delta_u;

sendControls (1,50) ; % W1
sendControlsToG1AndDisturbance(int64(u(k)),int64(z(k)));

waitForNewIteration () ; % wait for new iteration
end

```

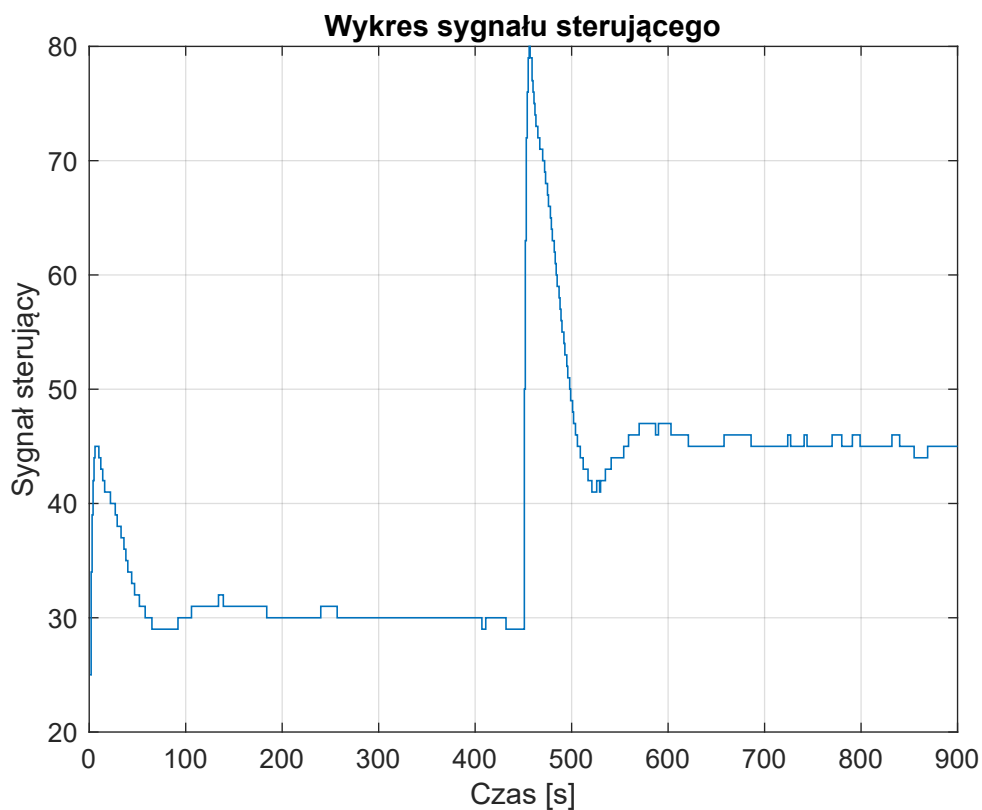
2.4.2. Strojenie regulatora DMC

Ponieważ regulator DMC opisany w tym rozdziale jest identycznym regulatorem przebadanym w bloku 1 laboratorium, a w tym rozdziale zakłócenia obiektu są zerowe, zdecydowano się na użycie z tego bloku nastaw regulatora DMC przedstawionych w tabeli 2.4.

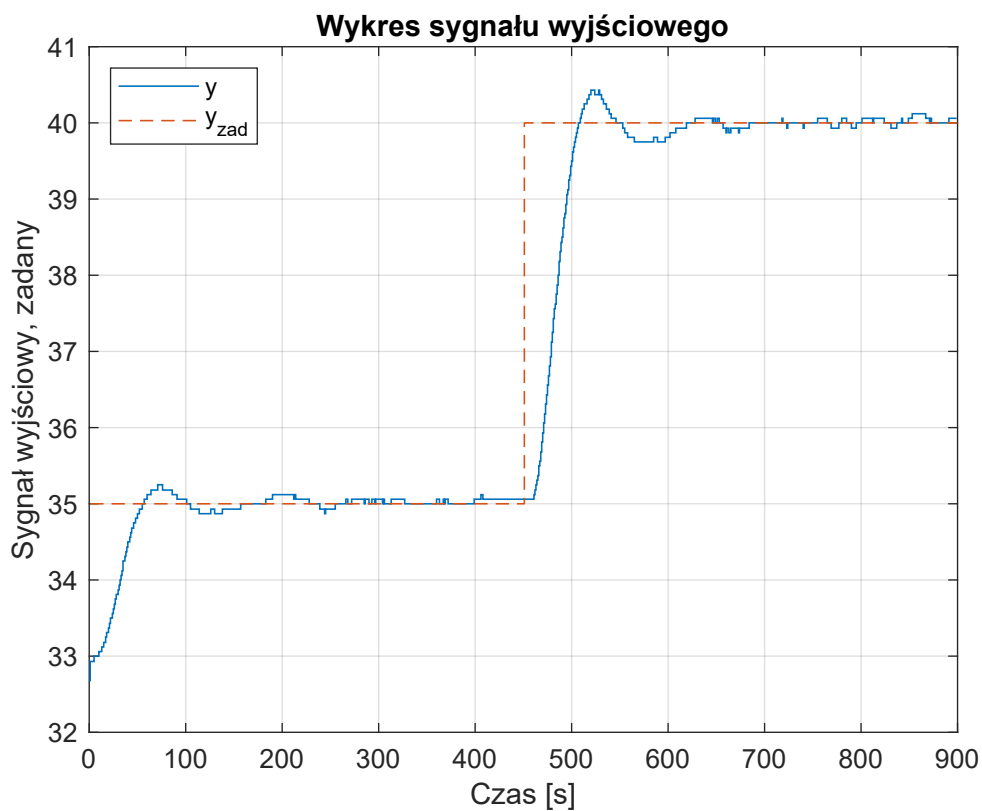
Tab. 2.4. Parametry DMC dobrane metodą optymalizacji

Parametr	Wartość
N	200
N_u	5
D	500
λ	0,2

Aby upewnić się, że regulator działa jak należy przetestowano jego działanie, a wyniki są widoczne na rys. 2.8 i 2.9.



Rys. 2.8. Sygnał sterujący regulatora DMC w odpowiedzi na dwie różne wartości zadane



Rys. 2.9. Sygnał wyjściowy regulatora DMC w odpowiedzi na dwie różne wartości zadane

2.5. Regulator DMC z zakłóceniami na obiekcie

2.5.1. Kod regulatora DMC uwzględniającego pomiar zakłóceń

Kod nowego regulatora został poszerzony względem kodu prostego regulatora o dodatkowy parametr D_z - horyzont dynamiki w torze zakłócenia. W obliczeniach offline zostaje załadowany model odpowiedzi skokowej y_z wyznaczony wcześniej. W analogiczny sposób do macierzy M_p zostaje wyznaczona macierz M_z^p na podstawie modelu y_z . Wektor k_z będzie używany przy obliczaniu przyrostu sygnału sterującego. Na koniec zostaje zainicjowany wektor zapisujący poprzednie przyrosty sygnału zakłócającego.

```
Dz = 500;

yz = odp_jedn_zak(700);

Mpz = zeros(N,Dz-1);
Mpz(:,1)=yz(1:N);
for j = 2:Dz
    for i = 1:N
        c = min([i+j-1,Dz]);
        Mpz(i,j) = yz(c) - yz(j-1);
    end
end

kz = K1 * Mpz;

delta_z_p(1:Dz)=0;
```

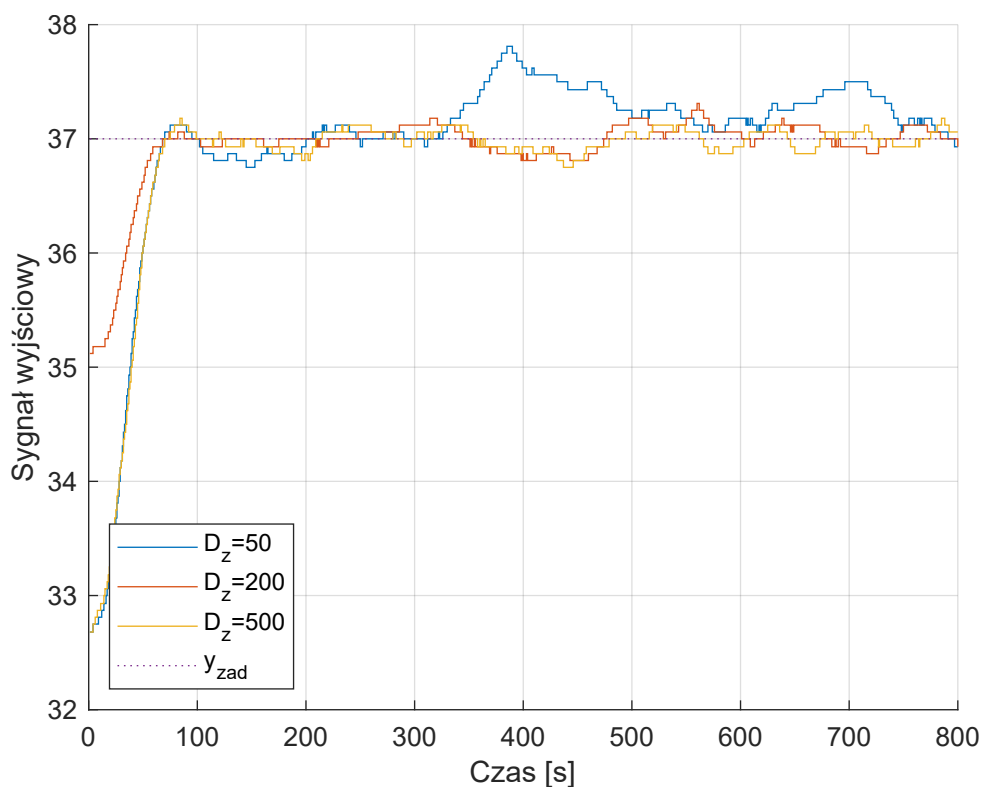
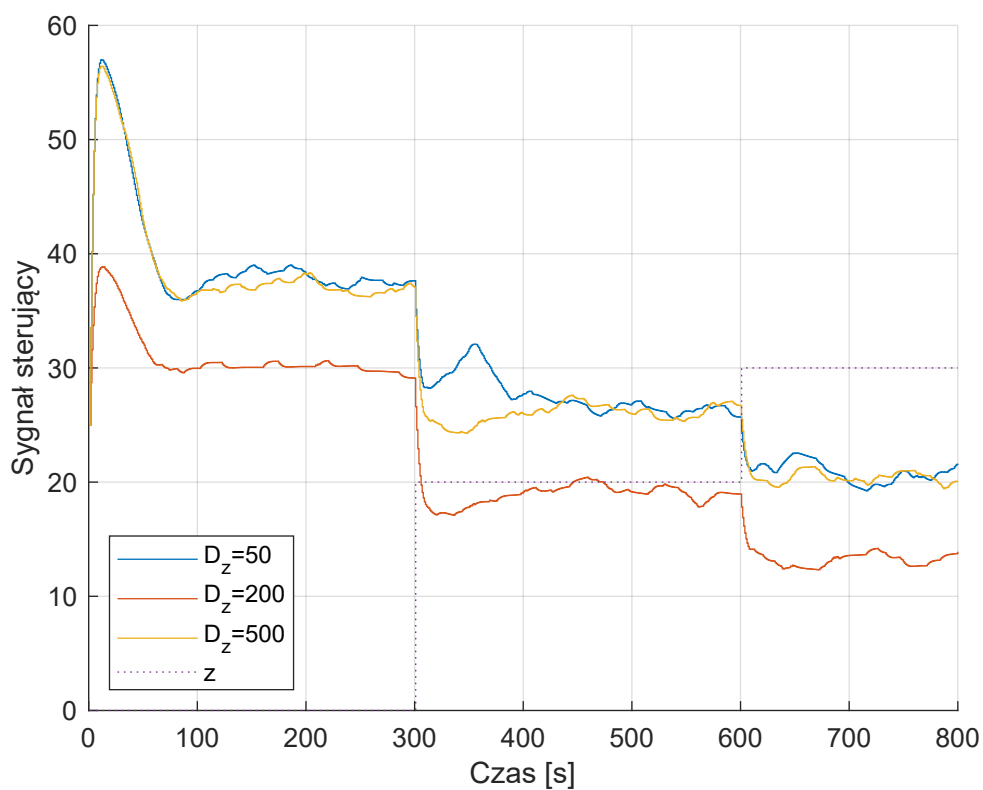
Natomiast zmianą w obliczeniach online nowego regulatora jest dodanie aktualizacji wektora odpowiadającego za przechowywanie poprzednich przyrostów sygnału zakłócającego, istotne jest aby był on aktualizowany przed jego zastosowaniem w obliczaniu przyrostu sygnału sterującego. Wspomniane obliczanie również rozszerzono o uwzględnianie zakłóceń.

```
% Aktualizacja przeszłych przyrostów zakłócenia
for m=Dz-1:-1:2
    delta_z_p(m) = delta_z_p(m-1);
end
% Zmiana zakłócenia
delta_z_p(1) = z(k) - z(k-1);

% Obliczenie przyrostu sygnału sterującego DMC
delta_u = ke * e(k) - ku * delta_u_p' - kz * delta_z_p';
```

2.5.2. Dobór parametru D_z

Aby sprawdzić jaki wpływ na regulację ma parametr D_z przeprowadziliśmy trzy symulacje, dla tych samych skoków zakłóceń: $z = 20$ w chwili $t = 300$ oraz $z = 30$ w chwili $t = 600$ kolejno dla wartości parametru: 50, 200 i 500. Poniżej znajdują się wyniki symulacji:

Rys. 2.10. Sygnał wyjściowy regulatorów DMC z różnymi wartościami parametrów D_z Rys. 2.11. Sygnał sterujący regulatorów DMC z różnymi wartościami parametrów D_z

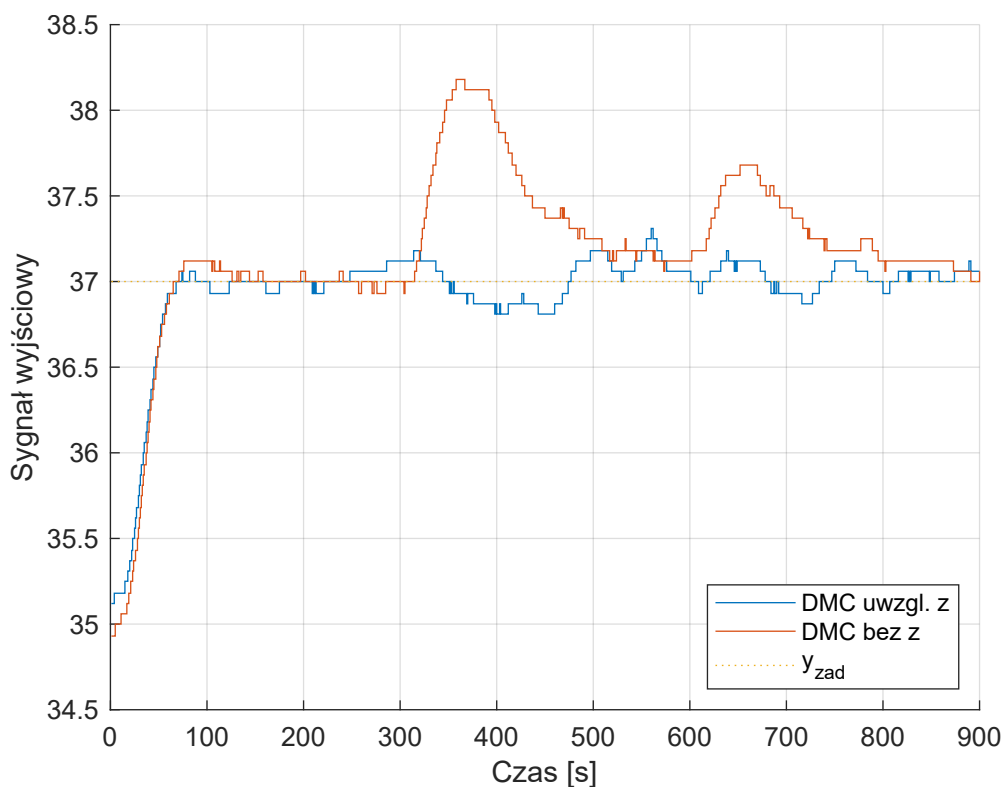
Na samym początku warto podkreślić, że symulacja z parametrem $D_z = 200$ została przeprowadzona w trakcie trwania pierwszych laboratoriów z bloku, a pozostałe w trakcie drugiego

dnia. Z tego powodu po pierwsze punkt pracy jest znacznie przesunięty - w pierwszym przypadku wynosi nieco ponad 35 stopni, w pozostałych prawie 33. To także skutkuje w widocznym "przesunięciu" w dół wykresu sygnału sterującego w przypadku regulatora z parametrem $D_z = 200$. Nie ma to jednak przełożenia, w opinii autorów, na ostateczne wnioski jakie można wysnuć po przeprowadzonych symulacjach:

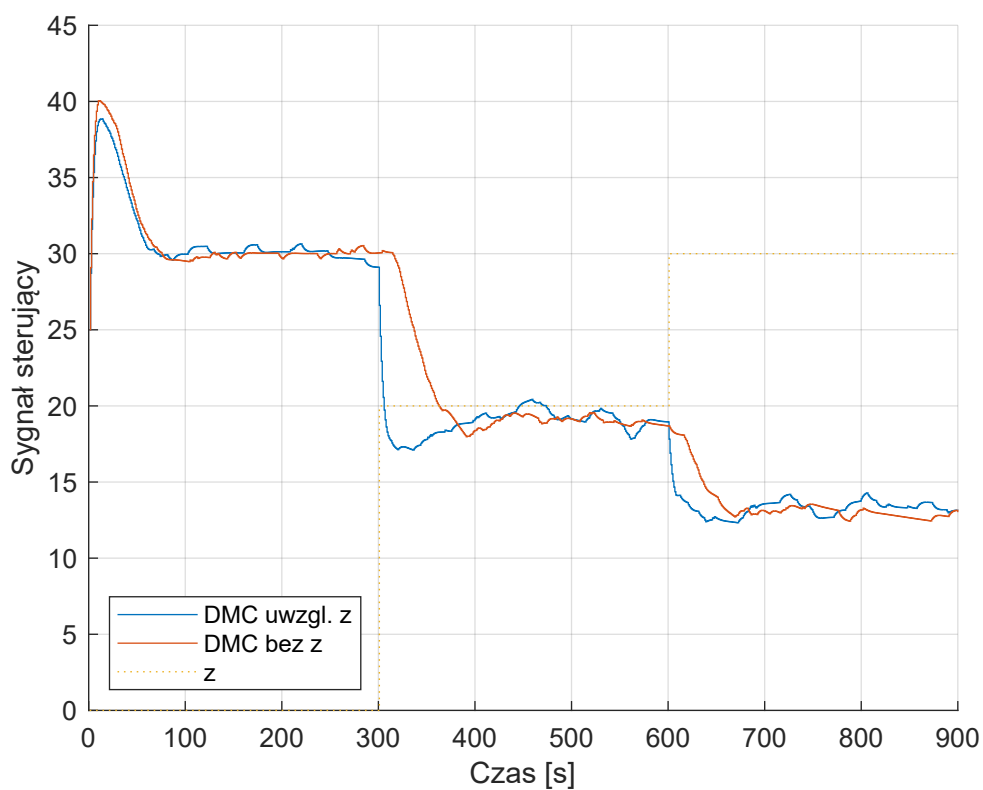
- **Zbyt krótki parametr D_z wpływa negatywnie na regulację.** W chwili skoków zakłócenia widać także spory skok (spory w porównaniu do pozostałych regulatorów, bo faktycznie jest to skok poniżej jednego stopnia Celsjusza) sygnału wyjściowego dla regulatora z parametrem $D_z = 50$. Powód tego można znaleźć w wykresie przebiegu sygnału wejściowego. Regulator w zasadzie zareagował tak samo szybko jak pozostałe regulatory na skok zakłócenia, jednak przez zbyt krótki horyzont dynamiki w torze zakłócenia równie szybko przestał uwzględniać wystarczająco jego zmianę w wyliczanym sterowaniu. Skutkuje to charakterystyczną "górką" w przebiegu sterowania chwilę po skoku jego wartości: regulator szybko reaguje na skok zakłócenia, ale zbyt krótko uwzględnia jego wpływ, a rosnący uchyb dopiero po czasie powoduje kolejną reakcję w postaci spadku sygnału sterującego. Takiej sytuacji nie ma w dwóch pozostałych przypadkach, wręcz przeciwnie - pozostałe regulatory dużo gwałtowniej reagują na skok zakłócenia, sygnał wyjściowy spada nawet nieco poniżej wartości zadanej i widać, że regulator powoli zwiększa wartość sygnału wejściowego aby zredukować powstały, ale naprawdę nieznaczny, uchyb.
- **Zbyt długi parametr D_z nie wpływa negatywnie na regulację.** Przebiegi (pomijając wytłumaczone wyżej przesunięcie przebiegu sygnału wejściowego) regulatorów o wartościach parametrów $D_z = 200$ i $D_z = 500$ na dobrą sprawę nie różnią się niczym. Nie są identyczne, ale to naturalnie wynika z tego, że badany obiekt nie jest idealny, występują tu małe różnice, ale co do zasady działania oba regulatory pracują tak samo. Ich regulacja jest dobra pod względem jakościowym oraz poprawnie rekompensują wpływ zakłóceń.

2.5.3. Porównanie działania regulatorów DMC bez oraz z uwzględnianiem zakłóceń

W porównaniu działania regulatorów wykorzystano regulator DMC z parametrem $D_z = 200$, gdyż regulator ten tak samo dobrze rekompensował wpływ zakłóceń co regulator z parametrem $D_z = 500$, więc uznano, że bezcelowe jest zwiększanie nakładu obliczeń.



Rys. 2.12. Sygnał wyjściowy regulatorów DMC z uwzględnieniem i brakiem uwzględnienia zakłóceń



Rys. 2.13. Sygnał sterujący regulatorów DMC z uwzględnieniem i brakiem uwzględnienia zakłóceń

Wyraźnie widać, jak duży wpływ na regulację ma pomiar i uwzględnianie wpływu zakłóceń. Dla regulatora nie uwzględniającego zakłóceń występuje spory uchyb po skoku sygnału

wyjściowego wynikającego ze skoku zakłócenia. W torze sterowania zauważalny jest fakt, że regulator DMC bez uwzględniania zakłóceń z opóźnieniem reaguje na skok zakłócenia i także reaguje on na nie wolno, bo zmiany sygnału sterującego wynikają jedynie z rosnącego uchybu. Regulator DMC uwzględniający zakłócenie reaguje natychmiastowo na jego skok, zmniejszając odpowiednio sterowanie i redukując praktycznie w pełni jego wpływ.

Jeśli regulowany proces jest podatny na zakłócenia i jego wpływ jest szkodliwy, a zakłócenie te jest mierzalne, to zdecydowanie warto uwzględnić jego wpływ w przypadku projektowania regulatora. Regulator DMC bez uwzględnienia zakłóceń w prawdzie ostatecznie i tak redukuje powstały uchyb, jednak będzie on tym większy, im większe zakłócenie lub im większe opóźnienie występuje w obiekcie. Zatem naturalnie - odpowiednie podejście jest zależne od tego jak dokładną regulację autor chce uzyskać, jednak wartym podkreślenia jest fakt, że regulator DMC jest w stanie praktycznie w pełni zniwelować wpływ zakłócenia, jeśli jest możliwość dobrego mierzenia jego wartości.