

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego  
2, zadanie nr 7

Kacper Marchlewicz, Michał Kwarciański, Adam Wróblewski  
grupa nr 7

Warszawa, 2022

# Spis treści

<b>1. Część projektowa</b>	2
1.1. Sprawdzenie poprawności podanego punktu pracy	2
1.2. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi skokowych procesu	2
1.3. Przekształcenie odpowiedzi skokowej dla algorytmu DMC.	5
1.4. Symulacja cyfrowego algorytmu DMC	5
1.5. Skokowa zmiana zakłócenia podczas działania regulatora DMC	7
1.6. Wpływ zakłóceń sinusoidalnie zmiennych	11
1.7. Wpływ szumu na działanie regulacji	13
<b>2. Część laboratoryjna</b>	15
2.1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem	15
2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych zakłóceń	15
2.3. Otrzymanie odpowiedzi skokowej zakłóceń do algorytmu DMC	17
2.4. Cyfrowy algorytm DMC	17
2.5. Uwzględnienie zakłóceń w algorytmie DMC, dobór parametru $D^z$	19

# 1. Część projektowa

## 1.1. Sprawdzenie poprawności podanego punktu pracy

W celu sprawdzenia poprawności punktu pracy, sygnał sterujący oraz zakłócenie ustawiamy na wartość 0 i obserwujemy wyjście obiektu.

Wartość wyjścia ustaliła się na wartości  $Y_{pp}=0$ . Rysunek 1.1

## 1.2. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi skokowych procesu

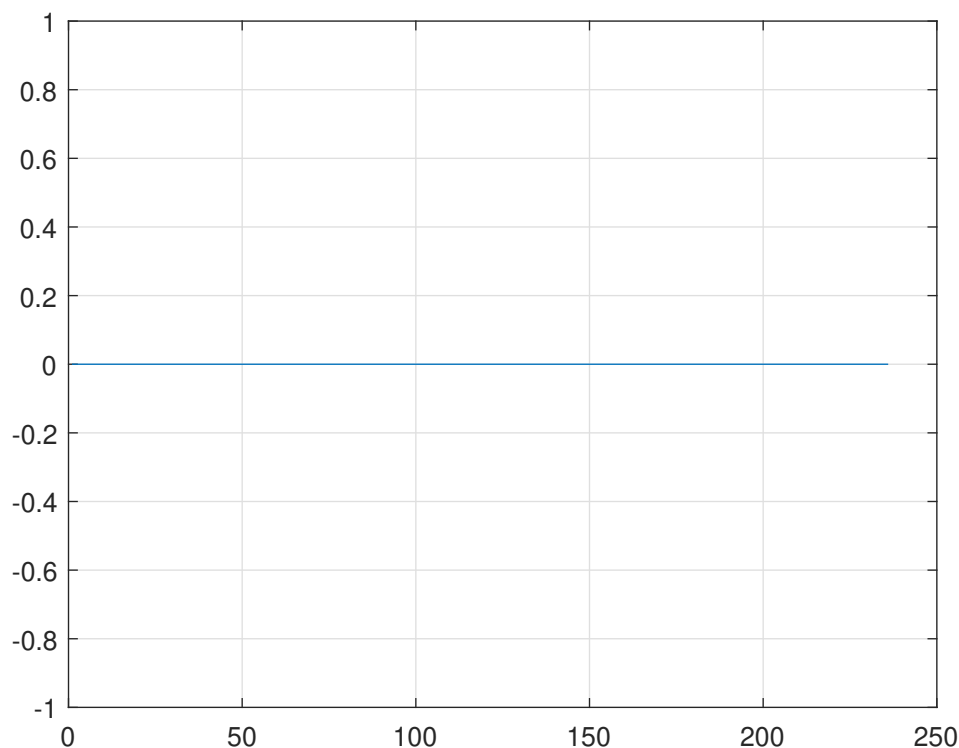
Wykonaliśmy szereg pomiarów odpowiedzi skokowych (rysunek 1.2) dla zmian sygnału sterującego w chwili  $k=15$  i wartości sterowania  $U = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$ .

Następnie symulując odpowiedź układu dla powyższych wartości sygnału sterującego otrzymaliśmy charakterystykę statyczną.

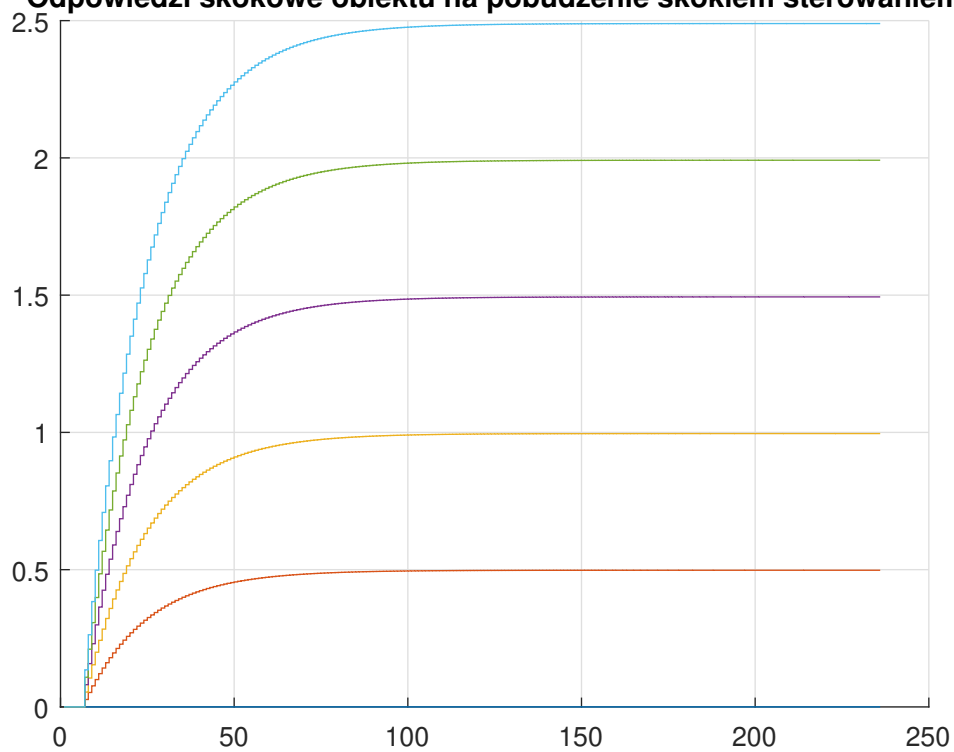
Na podstawie otrzymanego wykresu (rysunek 1.3) można stwierdzić, że właściwości procesu są w liniowe. Wzmocnienie statyczne toru wejście-wyjście  $K_{stat_U}$  wynosi 2,5.

Ponownie wykonaliśmy szereg pomiarów odpowiedzi skokowych (rysunek 1.4) dla zmian sygnału zakłócenia w chwili  $k=15$  i wartości zakłócenia  $Z = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$ .

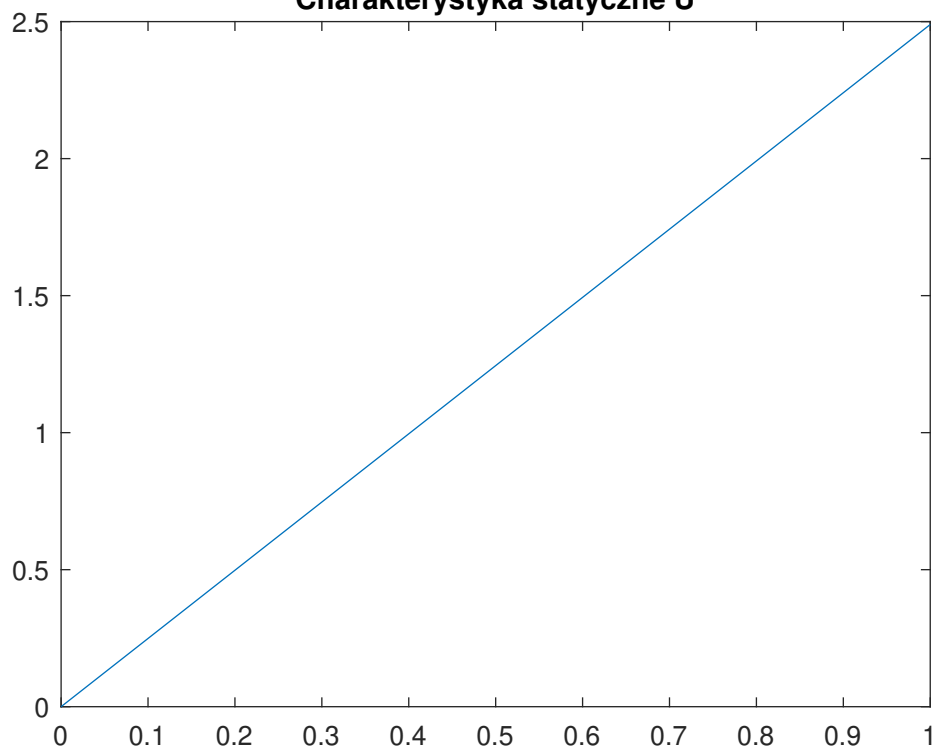
Następnie symulując odpowiedź układu dla powyższych wartości sygnału zakłócenia otrzymaliśmy charakterystykę statyczną.



Rys. 1.1. Sprawdzenie punktu pracy

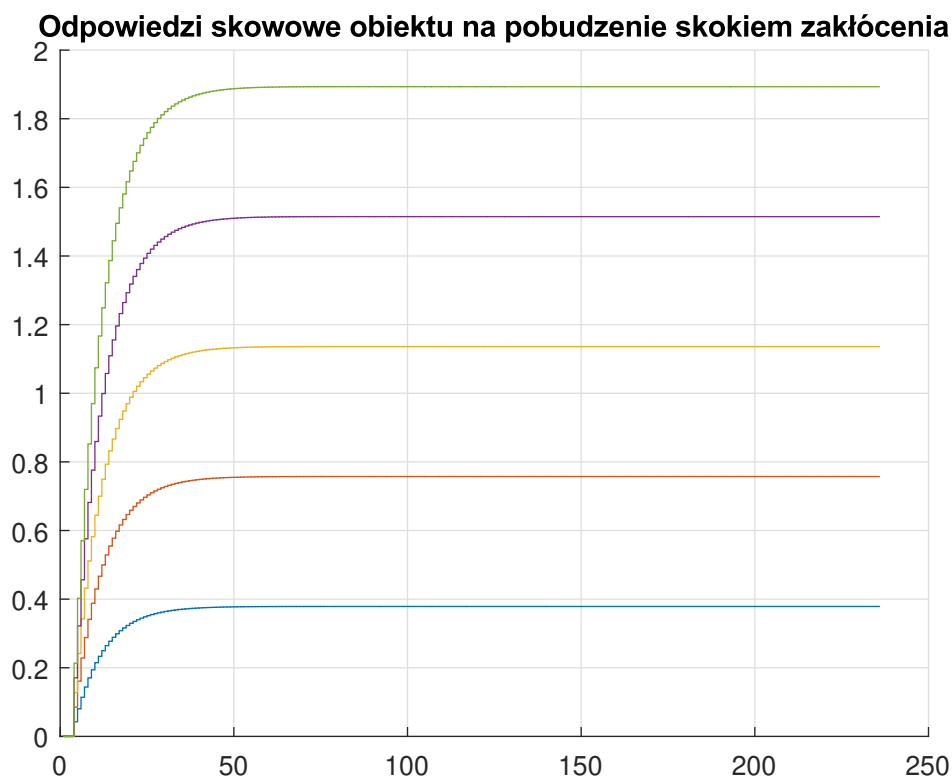
**Odpowiedzi skokowe obiektu na pobudzenie skokiem sterowaniem**

Rys. 1.2. Odpowiedzi skokowe sterowania

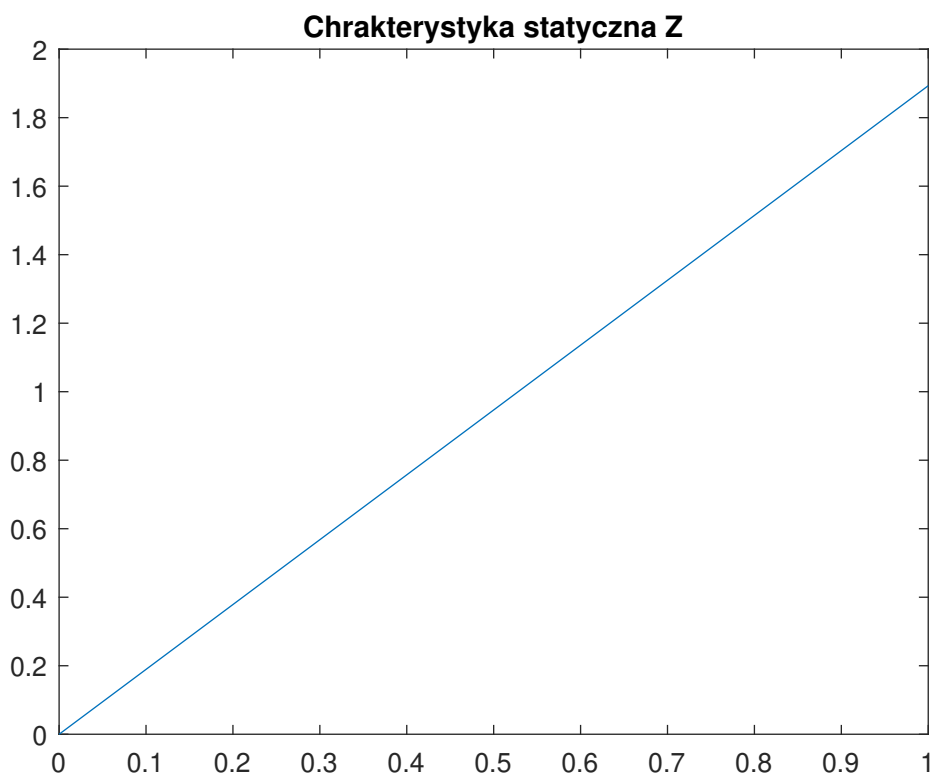
**Charakterystyka statyczna U**

Rys. 1.3. Charakterystyka statyczna sterowania

Na podstawie otrzymanego wykresu (rysunek 1.5) można stwierdzić, że właściwości procesu są w liniowe. Wzmocnienie statyczne toru zakłócenie-wyjście  $K_{statZ}$  wynosi 1,89.



Rys. 1.4. Odpowiedzi skokowe zakłócenia



Rys. 1.5. Charakterystyka statyczna zakłócenia

### 1.3. Przekształcenie odpowiedzi skokowej dla algorytmu DMC.

Algorytm DMC używa jednostkowej odpowiedzi skokowej - czyli takiej w której skok sterowania następuje od wartości 0 do 1. W celu przekształcenia odpowiedzi skokowej do postaci wykorzystywanej w algorytmie DMC Stosujemy wzór:

$$s_i = \frac{y_i - Y_{pp}}{\delta u} \quad (1.1)$$

gdzie:

$s_i$  - kolejne wartości przeskalowanej odpowiedzi skokowej.

$y_i$  - wartości wyjścia nieprzeskalowanej odpowiedzi w kolejnych chwilach.

$Y_{pp}$  - wartość  $y$  w chwili  $k = 0$ .

$\delta u$  - wartość skoku sterowania.

Dla toru zakłócenie-wyjście postępowanie jest analogiczne.

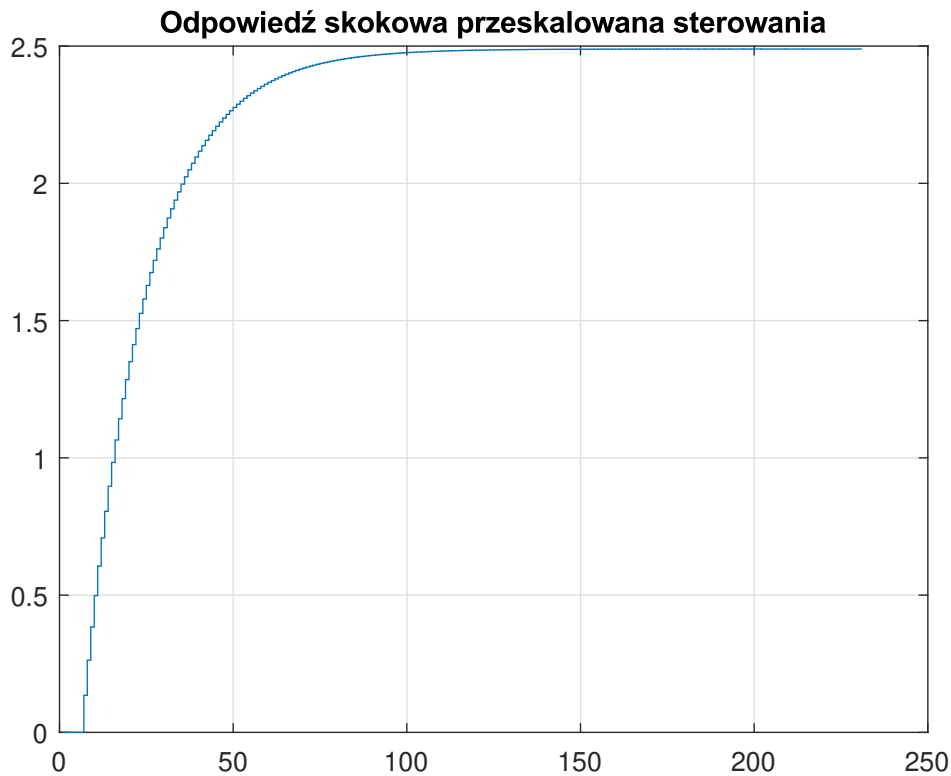
Odpowiedzi skokowe, które można wykorzystać w algorytmie DMC przedstawione są na rysunkach 1.6 i 1.7

### 1.4. Symulacja cyfrowego algorytmu DMC

Algorytm DMC jest algorytmem, którego celem jest minimalizacja wskaźnika jakości  $J$ .

$$J(k) = \sum_{p=1}^N (y^{zad}(k+p|k) - \bar{y}(k+p|k))^2 + \lambda \sum_{p=0}^{N_k=1} (\Delta U(k+p|k))^2 \quad (1.2)$$

Poniżej przedstawiamy fragment głównej pętli algorytmu DMC:



Rys. 1.6. Odpowiedź skokowa sterowania przeskalowana



Rys. 1.7. Odpowiedź skokowa zakłócenia przeskalowana

```

for k=start:Ts
    %symulacja obiektu
    z(k) = 0;
    y(k)=symulacja_obiektu7y_p2(u(k-6), u(k-7), z(k-3), z(k-4),
        y(k-1), y(k-2));

    %Obliczenie DU_p
    for d=1:(D-1)
        DU_p(d) = u(k-d) - u(k-d-1);
    end

    %Pomiar wyjścia
    Y = ones(N, 1) * y(k);

    %Obliczenie Y_0
    yo = M_p * DU_p + Y;

    Y_zad = ones(N, 1) * yzad(k);

    %Obliczenie sterowania
    DU = K * (Y_zad - yo);
    u(k) = u(k-1) + DU(1);

    E = E + (yzad(k)-y(k))^2;

```

Obliczamy macierz  $K$  (licząc macierz  $M$ ), macierz  $M_p$  i inicjalizujemy macierz  $DU_p$ . W pętli głównej po pomiarze aktualnego wyjścia obliczamy macierz  $DU_p$ , uzupełniamy macierze  $Y$  (pomiar wyjścia),  $Y_o$ ,  $Y_{zad}$  (wartości zadane). W kolejnych liniach obliczamy sterowanie, publikujemy obliczoną wartość sterowania i wyznaczamy wskaźnik jakości dla algorytmu minimalizującego.

Nastawy regulatora DMC dobieraliśmy na podstawie wskaźnika jakości za pomocą algorytmu *ga*. Zwrócone parametry wynoszą:  $N=20$ ,  $N_u=1$ ,  $lambda=5$ . Działanie regulatora przedstawia rysunek 1.4

### 1.5. Skokowa zmiana zakłócenia podczas działania regulatora DMC

Algorytm DMC uzupełniliśmy o potrzebne wzory na pomiar i uwzględnienie zakłócenia. Poniżej przedstawiamy fragment głównej pętli algorytmu DMC:

```

for k=start:Ts
    %symulacja obiektu
    y(k)=symulacja_obiektu7y_p2(u(k-6), u(k-7), z(k-3), z(k-4),
        y(k-1), y(k-2));

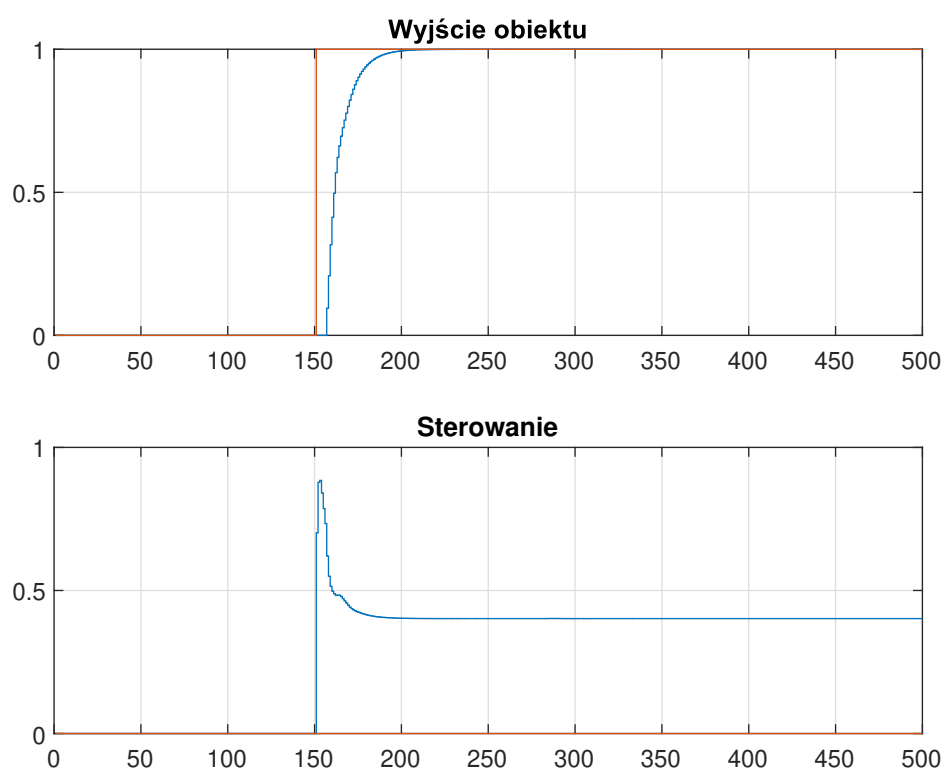
    %Obliczenie DU_p
    for d=1:(D-1)
        DU_p(d) = u(k-d) - u(k-d-1);
    end

    %Obliczenie DZ
    for d=1:(Dz)
        DZ(d) = z(k-d+1) - z(k-d);
    end

    %Pomiar wyjścia
    Y = ones(N, 1) * y(k);

```





Rys. 1.8. Wyjście i sterowanie regulatora DMC

```

%Obliczenie Y_0
yo = M_p * DU_p + Y + M_zp * DZ;

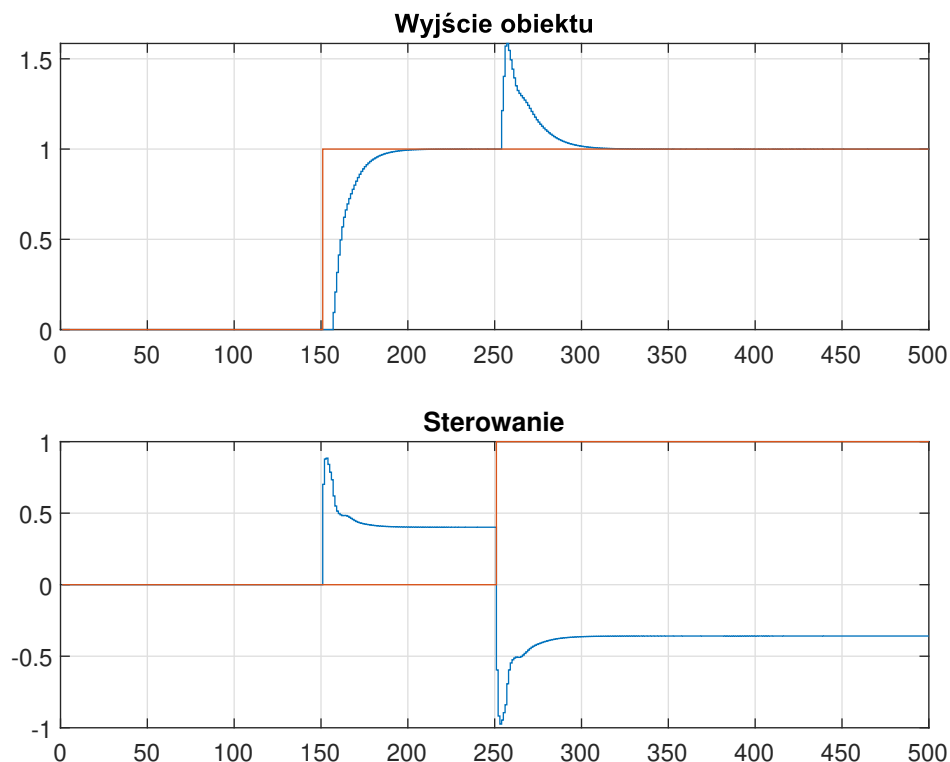
Y_zad = ones(N, 1) * yzad(k);

%Obliczenie sterowania
DU = K * (Y_zad - yo);
u(k) = u(k-1) + DU(1);

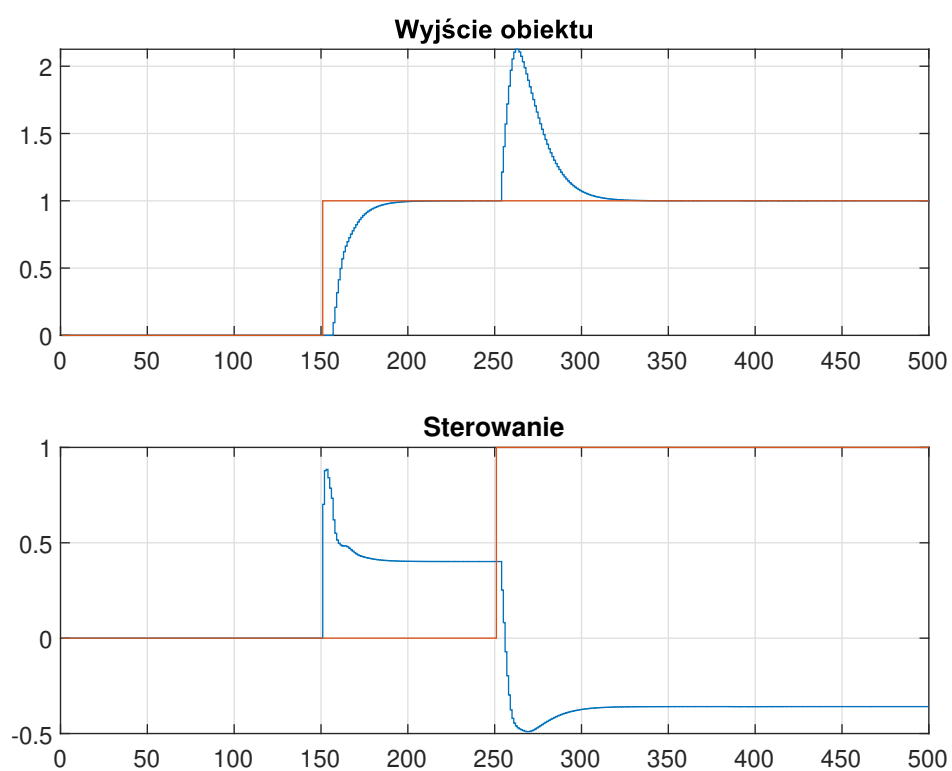
E = E + (yzad(k)-y(k))^2;

```

W pętli głównej po pomiarze aktualnego wyjścia obliczamy macierz  $DU_p$ , oraz macierz  $DZ$ . Następnie uzupełniamy macierze  $Y$  (pomiar wyjścia),  $Y_o$ ,  $Y_{zad}$  (wartości zadane) i  $M_{zp} * DZ$  (uwzględnienie zakłócenia). W kolejnych liniach obliczamy sterowanie, publikujemy obliczoną wartość sterowania i wyznaczamy wskaźnik jakości dla algorytmu minimalizującego. Działanie regulatora jest zadowalające. Na rysunku 1.9 widać kompensację zakłócenia z wyznaczonym  $Dz=100$ . Brak pomiaru zakłócenia ( $Dz=0$ ) przedstawia 1.10, gdzie widoczny jest większy skok wartości wyjścia i dłuższy powrót sygnału do wartości zadanej.



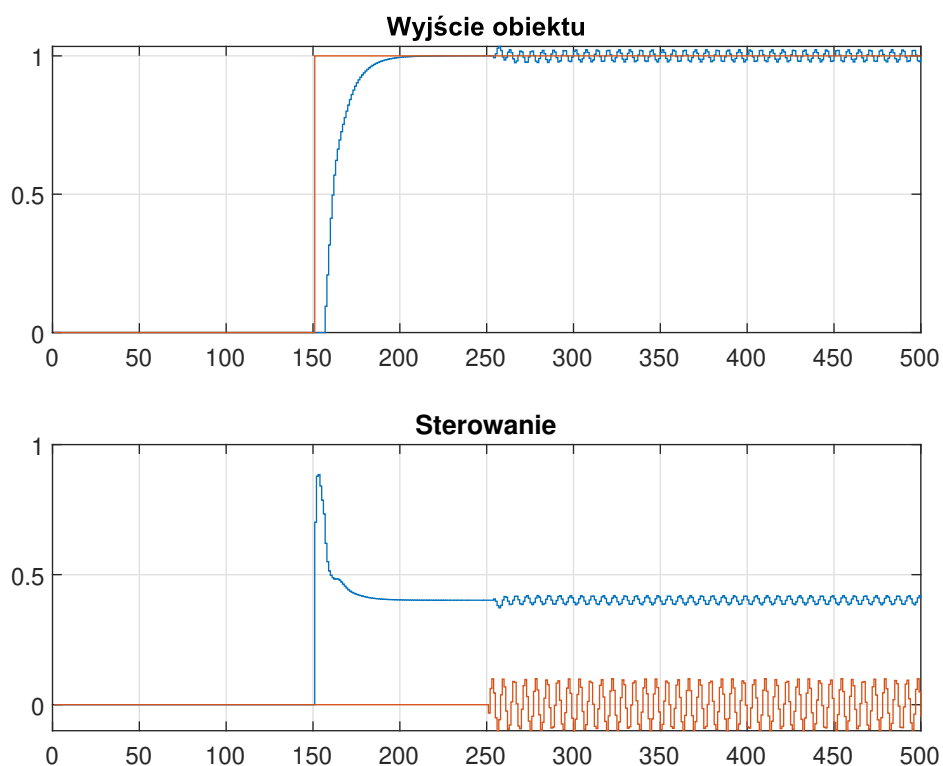
Rys. 1.9. Wyjście i sterowanie regulatora DMC z  $Dz=100$



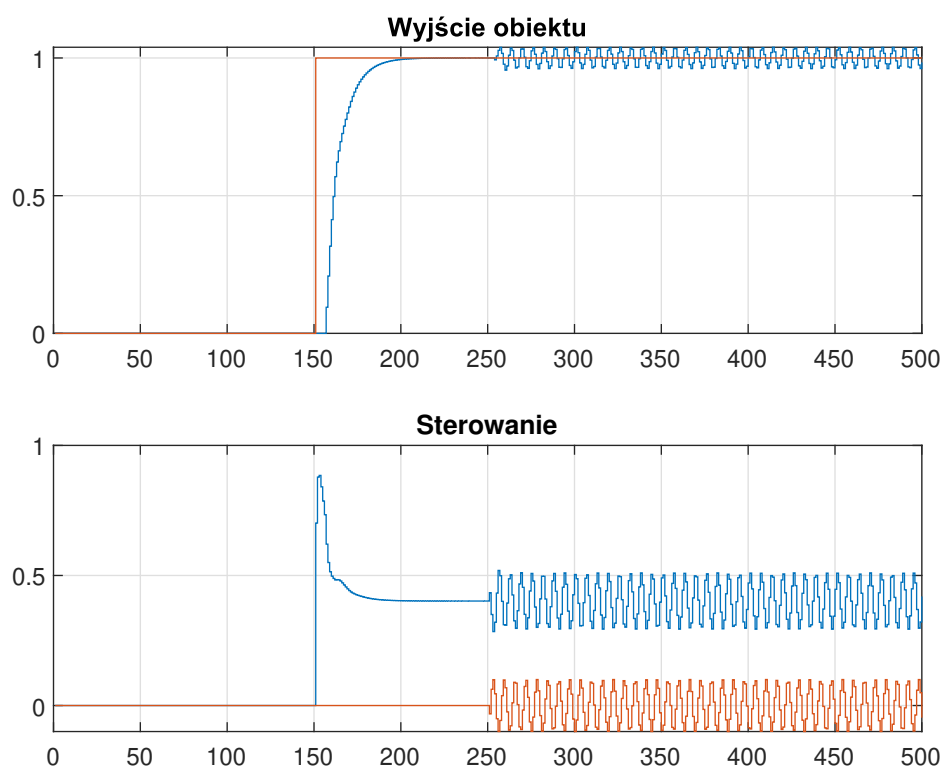
Rys. 1.10. Wyjście i sterowanie regulatora DMC przy braku pomiaru zakłócenia

### 1.6. Wpływ zakłóceń sinusoidalnie zmiennych

Dla regulatora DMC uruchomiliśmy zakłócenia sinusoidalne. Wpływ przy pomiarze wpływu przedstawia rysunek 1.12, przy braku rysunek 1.11. Oba regulatory działają niezadowalająco. Dla pomiaru zakłócenia widać większe skoki wartości sterowania, algorytm stara się skompensować zakłócenie, lecz nie zdąża.

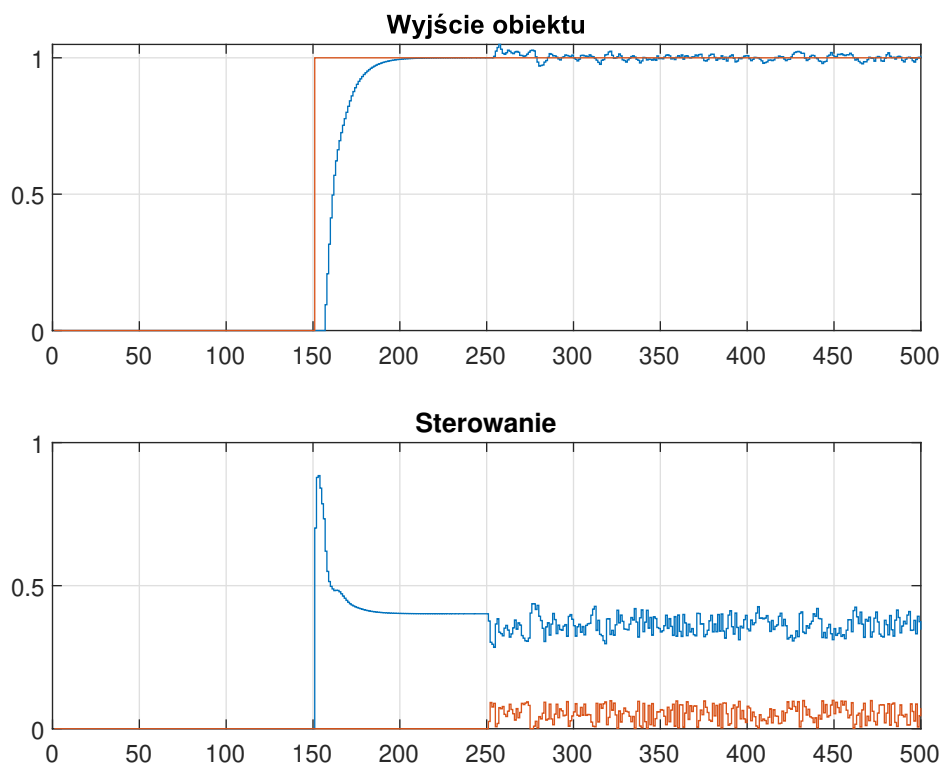


Rys. 1.11. Działanie regulatora DMC dla zakłóceń sinusoidalnych przy braku pomiaru zakłócenia

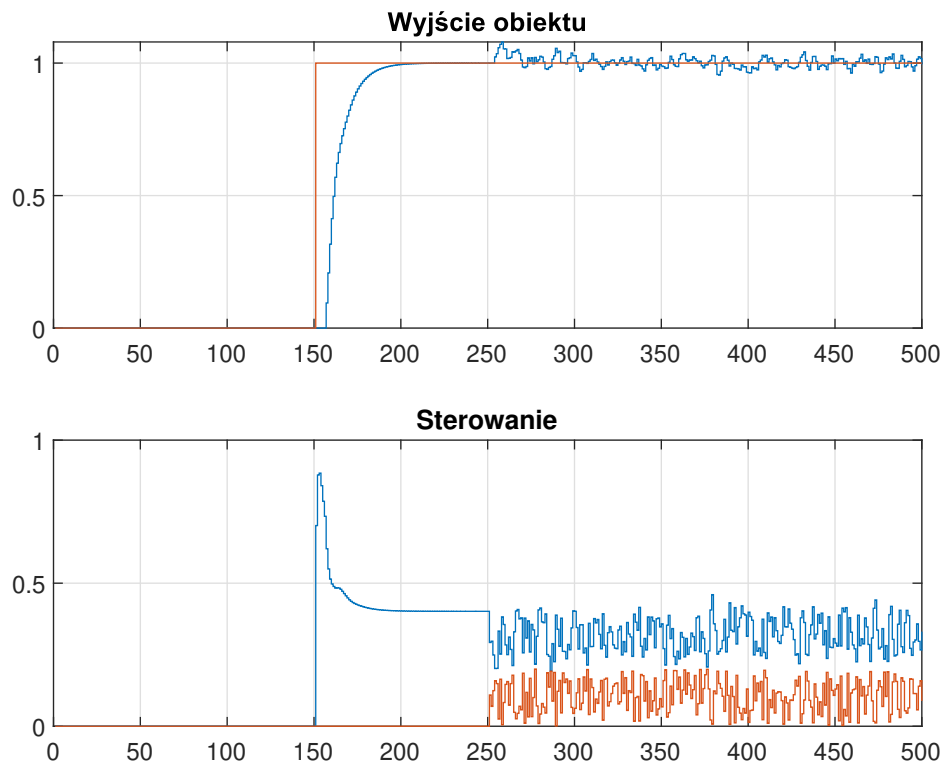
Rys. 1.12. Działanie regulatora DMC dla zakłóceń sinusoidalnych z  $Dz=100$

### 1.7. Wpływ szumu na działanie regulacji

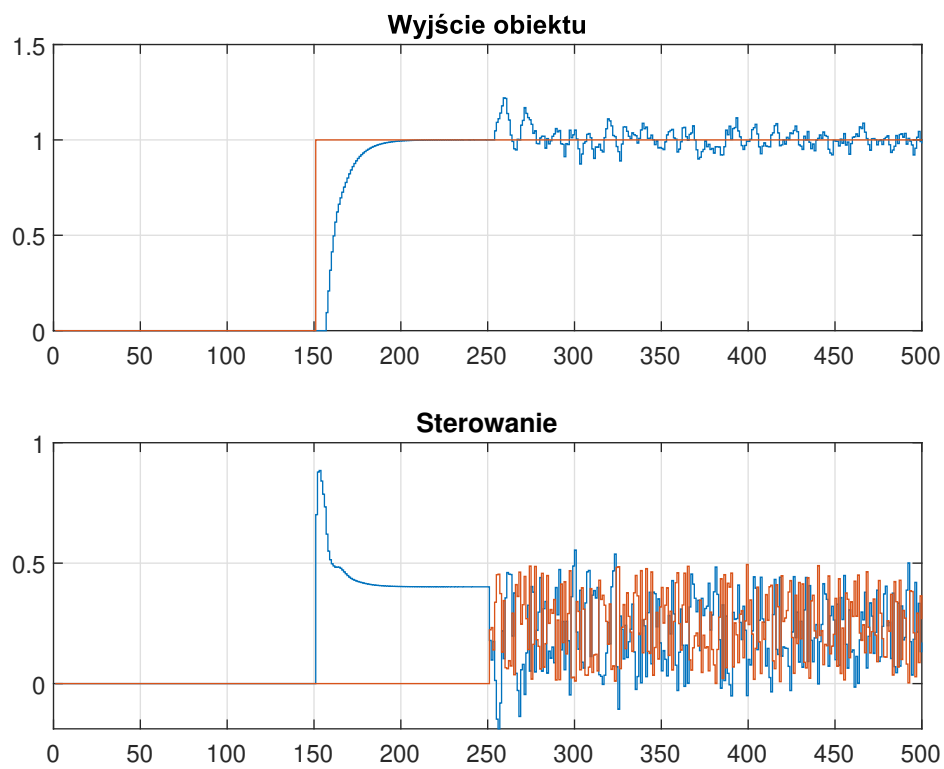
Dla regulatora DMC uruchomiliśmy zakłócenia w postaci szumu pomiarowego. Wpływ różnych amplitud wartości przedstawiają rysunki 1.13, 1.14 i 1.15. Regulator nie radzi sobie z szybkością zmian, lecz po sterowaniu widać próby kompensacji. Można stwierdzić, że wraz z wzrostem wielkości szumu spada jakość regulacji.



Rys. 1.13. Działanie regulatora DMC dla szumu z amplitudą 0,1



Rys. 1.14. Działanie regulatora DMC dla szumu z amplitudą 0,2



Rys. 1.15. Działanie regulatora DMC dla szumu z amplitudą 0,5

## 2. Część laboratoryjna

### 2.1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem

Uruchomiliśmy stanowisko, oraz sprawdziliśmy możliwość sterowania i komunikacji z nim. Określiliśmy wartość pomiaru temperatury w punkcie pracy  $Z = 0$ ,  $G1 = 27$ , sygnał  $W1$  traktujemy jako cechę otoczenia, jego wartość jest stała i równa  $W1 = 50$ .

Wartość temperatury ustaliła się na wartości  $Y_{pp}=32,5$ . Rysunek 2.1

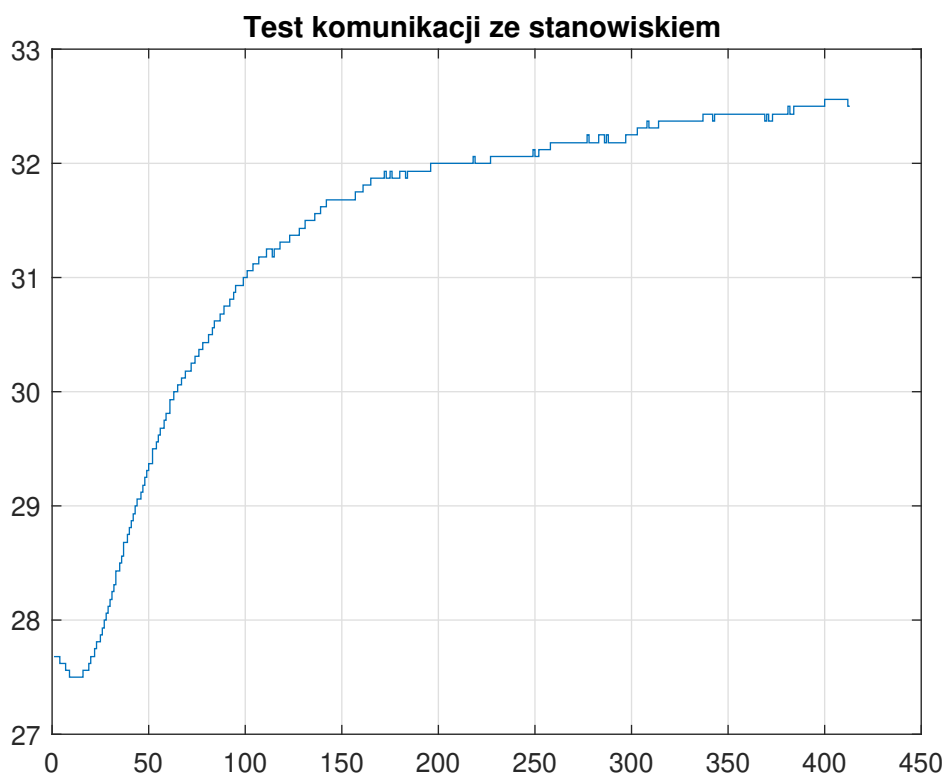
### 2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych zakłóceń

Znając punkt pracy wyznaczaliśmy 3 odpowiedzi skokowe toru zakłócenie - wyjście (skoki wartości zakłócenia  $G1$  do 10, 20 i 30). Dla powyższych skoków otrzymaliśmy odpowiedzi skokowe przedstawione na rysunku 2.2 2.2.

Właściwości statyczne obiektu można w przybliżeniu określić jako liniowe, potwierdza to wykres charakterystyki statycznej 2.3, który jest w przybliżeniu liniowy. Oraz fakt że na wykresie 2.2 wartość na której ustala się wyjście jest proporcjonalna do wartości skoku.

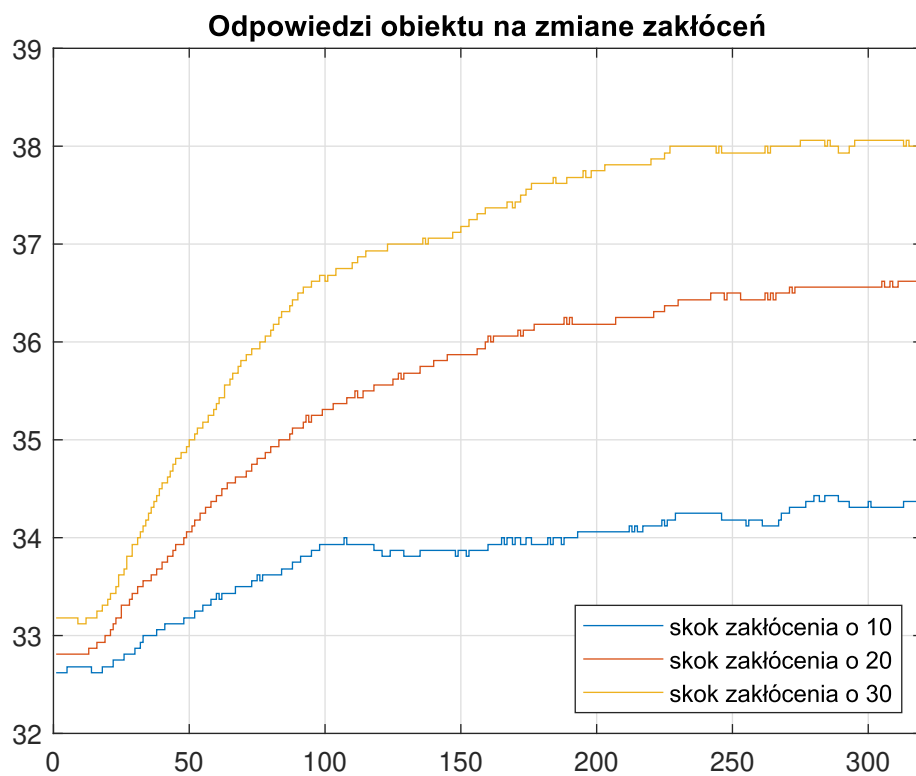
Wartość wzmocnienia statycznego wynosi ok 1,8.

Otrzymaną charakterystykę statyczną 2.3 można uznać za liniową. Jej niedokładność wynika z niedużej ilości skoków użytych do otrzymania jej i wzrostu punktu pracy.

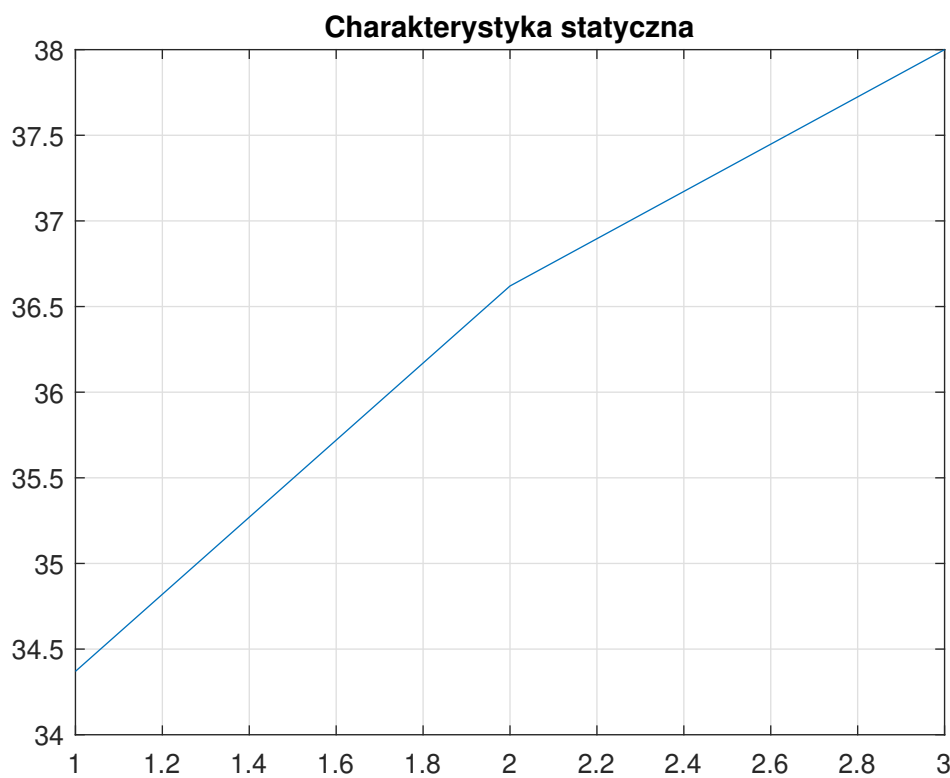


Rys. 2.1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru





Rys. 2.2. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie - wyjście (skoki do 10, 20 i 30)



Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna wyznaczona na podstawie 3 odpowiedzi skokowych

### 2.3. Otrzymanie odpowiedzi skokowej zakłóceń do algorytmu DMC

Otrzymane odpowiedzi skokowe zakłóceń z punktu 2.2 przeskalowaliśmy, posługując się wzorem 1.1, tak aby nadawały się do wykorzystania w algorytmie DMC co przedstawia rysunek 2.4.

Do zastosowania w algorytmie DMC wybraliśmy odpowiedź skokową powstałą w wyniku skoku zakłócenia do wartości 20.

Następnie przekształconą odpowiedź skokową aproksymujemy, używając w tym celu członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem. Otrzymujemy odpowiedź skokową przedstawioną na rysunku 2.5:

W celu znalezienia najlepszych parametrów, użyliśmy funkcji *fmincon*. Otrzymane parametry:  $T_1 = 10,96$ ,  $T_2 = 71,24$ ,  $K = 0,17$ ,  $T_d = 4,5$ .

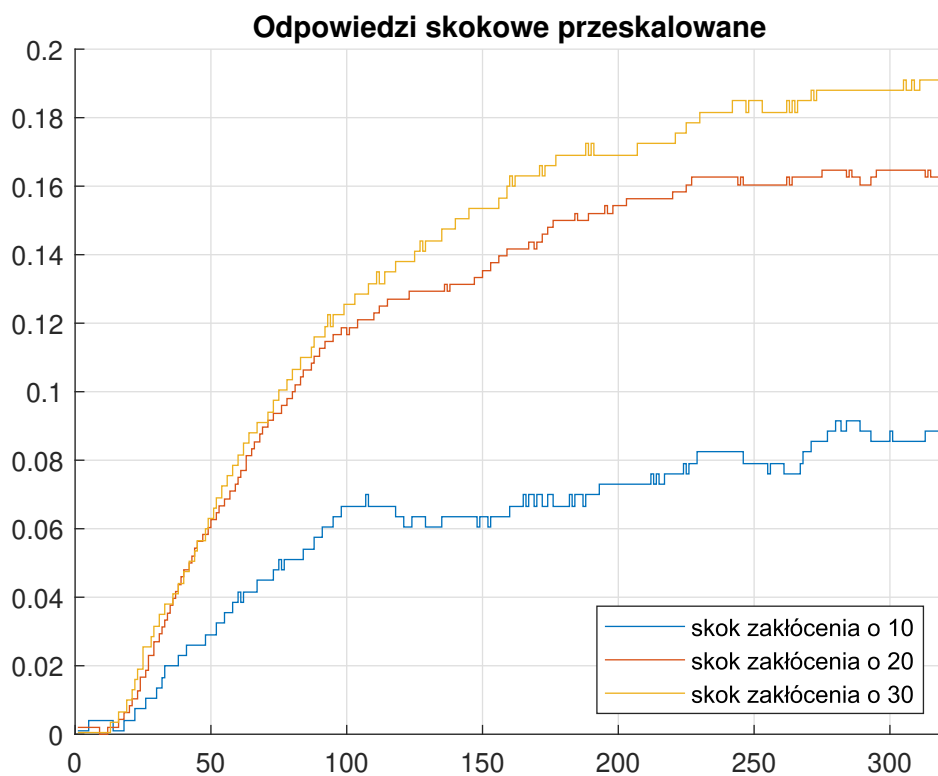
Otrzymana odpowiedź jest dobrym przybliżeniem. Widać to w po bardzo dobrze znalezionym wzmocnieniu które pokrywa się z częścią przed aproksymacją, a także po niewielkim błędzie aproksymacji, który wyniósł 0,02.

Odpowiedź skokową na zmianę sterowania użyliśmy z poprzedniego projektu, jako że pracujemy na takim samym obiekcie.

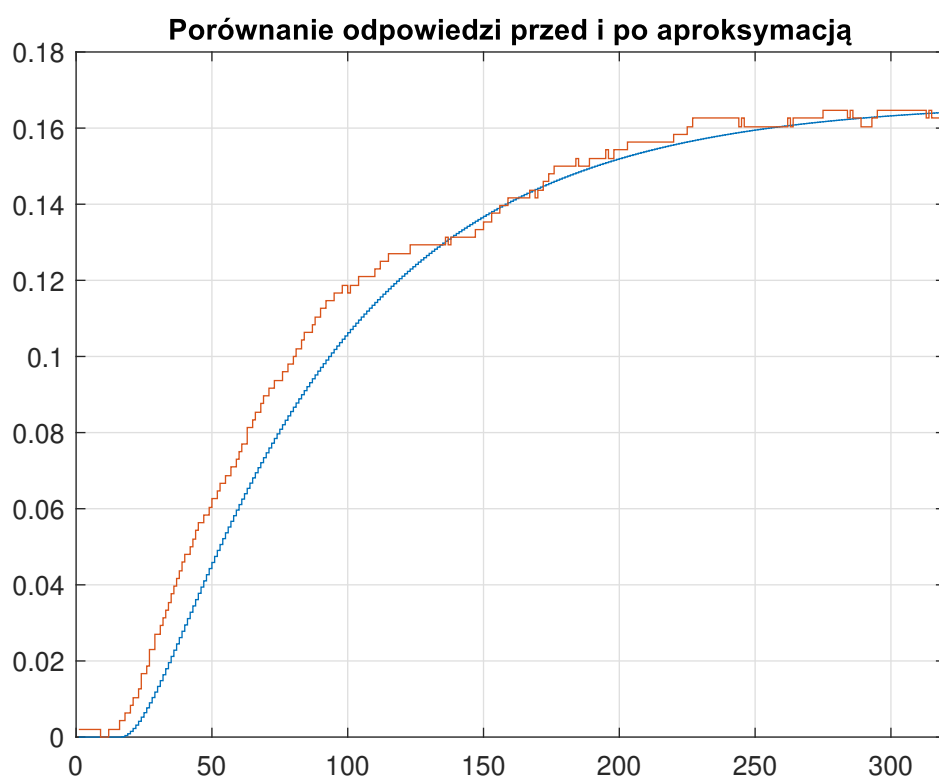
### 2.4. Cyfrowy algorytm DMC

W celu napisania programu do regulacji DMC, odpowiednio zmodyfikowaliśmy plik *MinimalWorkingExample*.

Na początku działania algorytmu DMC pobieramy model (obliczony w zadaniu 3), ustalamy parametry regulatora, wartości zadane. Obliczamy macierz  $K$  (licząc macierz  $M$ ), macierz  $M_p$  i inicjalizujemy macierz  $DU_p$ . W pętli głównej po pomiarze aktualnej temperatury obliczamy macierz  $DU_p$ , uzupełniamy macierze  $Y$  (pomiar wyjścia),  $Y_o$ ,  $Y_{zad}$  (wartości zadane). W kolejnych



Rys. 2.4. Przeskalowane odpowiedzi skokowe toru zakłócenie - wyjście



Rys. 2.5. Charakterystyka statyczna po linearyzacji

linijkach obliczamy sterowanie, uwzględniamy ograniczenia i na koniec publikujemy obliczoną wartość sterowania przy użyciu funkcji *sendControls*, która wysyła je do grzałki.

Dobór parametrów  $D, N, N_u, \lambda$  przy skokowej zmianie sygnału wartości zadanej i zerowym zakłóceniu i uwzględnieniu ograniczeń sygnału sterującego  $0 \leq G1(k) \leq 100$ .

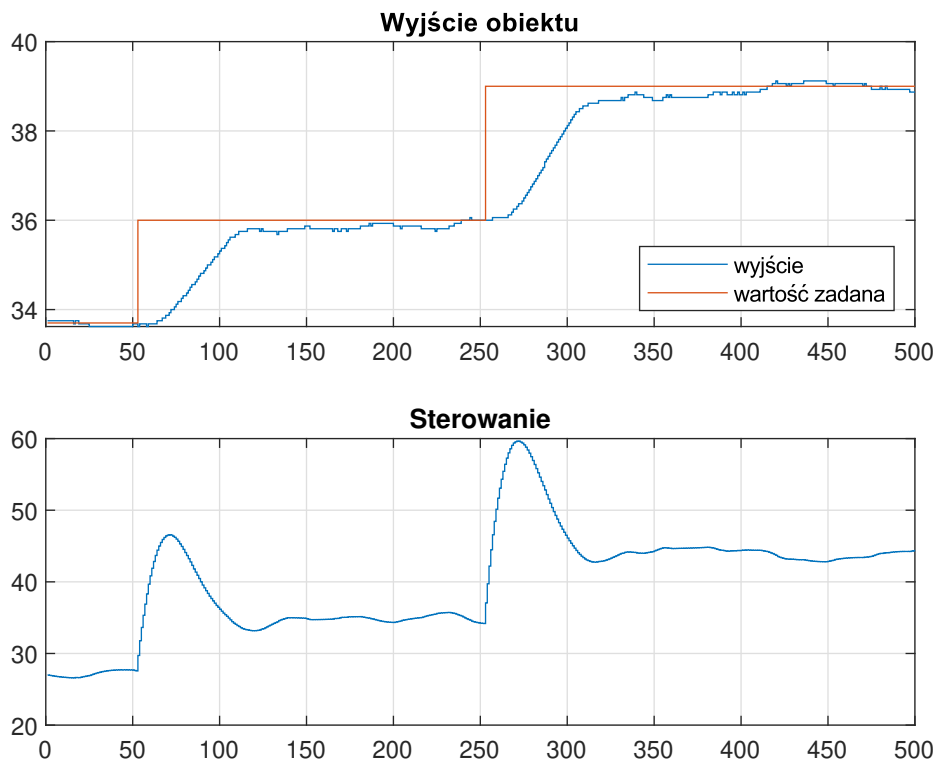
Wybrane wartości parametrów DMC :  $D = 300, N = 260, N_u = 260, \lambda = 1$ . Działanie algorytmu DMC z powyższymi parametrami zostało przedstawione na rysunku 2.6

## 2.5. Uwzględnienie zakłóceń w algorytmie DMC, dobór parametru $D^z$

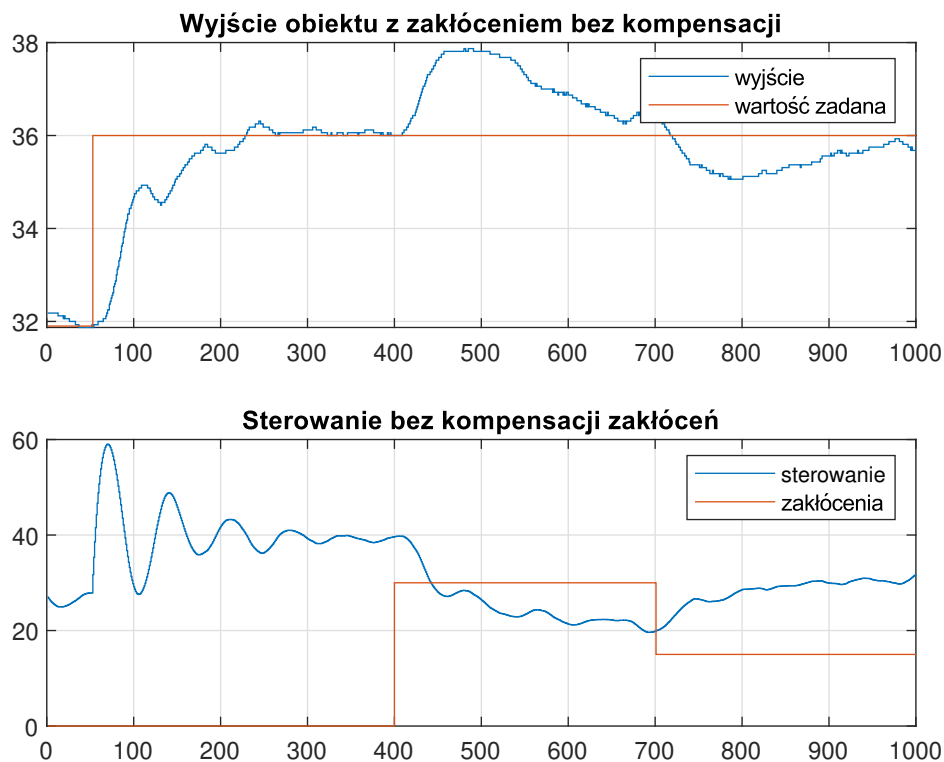
Najpierw sprawdziliśmy działanie algorytmu regulacji DMC przy włączonych zakłóceniach ale z wyłączoną kompensacją zakłóceń. Skoki zakłócenia następują odpowiednio w chwili 400 (skok 0-30) i w chwili 700 (skok 30 - 15). Wynik działania przedstawiony jest na rysunku 2.7

Następnie włączyliśmy uwzględnianie zakłóceń w algorytmie DMC, wartość parametru  $D^z$  ustawiliśmy na 250. Działanie regulatora zostało przedstawiony na rysunku 2.8

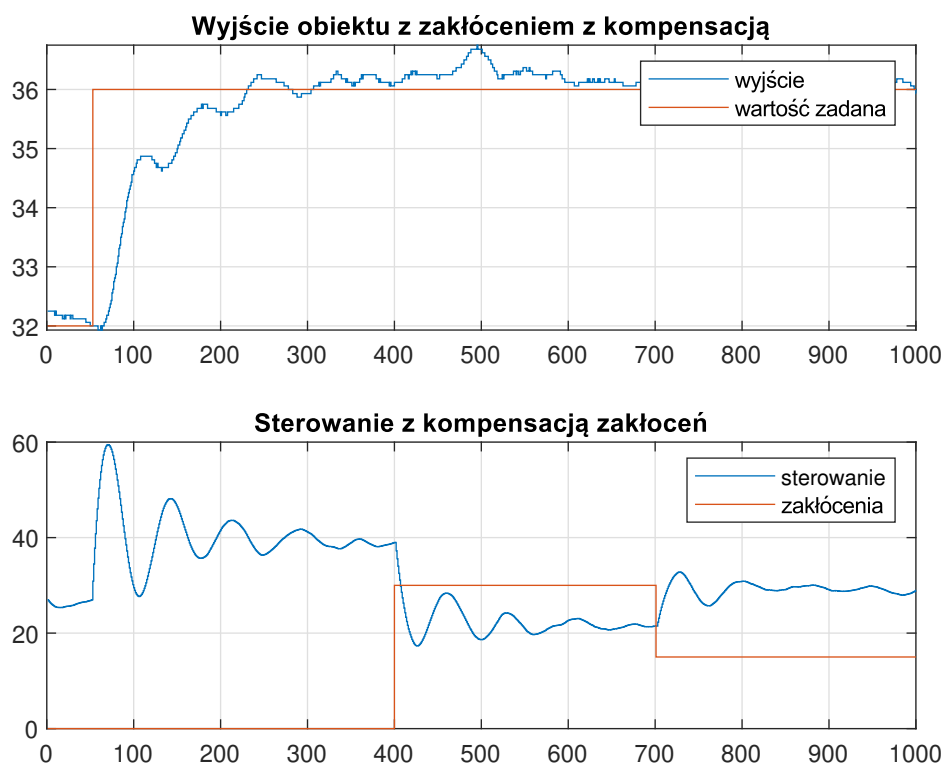
Analizując przebiegi wyjścia i sterowania dla obu przypadków możemy stwierdzić, że jakość regulacji z włączoną kompensacją zakłóceń jest dużo lepsza niż w przypadku gdy tej kompensacji brak. Obserwujemy mniejsze przeregulowanie a także wyjście szybciej osiąga wartość zadaną po skoku zakłócenia. Na przebiegu sterowania jest także widoczne to że regulator stara się zminimalizować wpływ zakłóceń na wyjście obiektu poprzez odpowiednie zmiany wartości sterowania  $u$ .



Rys. 2.6. Działanie algorytmu regulacji DMC ( $D = 300, N = 260, N_u = 260, \lambda = 1$ )



Rys. 2.7. DMC bez kompensacji zakłóceń (skoki zakłócenia w chwilach 400 i 700)

Rys. 2.8. DMC z kompensacją zakłóceń -  $D^z = 250$  (skoki zakłócenia w chwilach 400 i 700)