

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego  
nr 2, zadanie nr 10

Karol Borowski, Szymon Kozłowski, Bartosz Kurpiewski

Warszawa, 2019

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	2
<b>2. Projekt</b>	3
2.1. Zadanie 1	3
2.2. Zadanie 2	3
2.2.1. Odpowiedź skokowa toru wejście - wyjście	3
2.2.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie - wyjście	4
2.2.3. Charakterystyka statyczna	4
2.2.4. Wzmocnienie statyczne	4
2.3. Zadanie 3	6
2.4. Zadanie 4	7
2.4.1. Strojenie regulatora DMC	8
2.5. Zadanie 5	9
2.6. Zadanie 6	11
<b>3. Laboratorium</b>	19
3.1. Zadanie 1	19
3.2. Zadanie 2	19
3.3. Zadanie 3	20
3.4. Zadanie 4	21

# 1. Wstęp

Tematem projektu i laboratorium drugiego była implementacja, weryfikacja poprawności działania i dobór parametrów algorytmu regulacji procesu z mierzonym zakłóceniem. W ramach projektu należało zasymulować i zbadać podany obiekt. Na podstawie uzyskanych wyników trzeba było zaimplementować i dostroić regulator DMC. Następnie należało zbadać zachowanie regulatora pod wpływem zakłóceń.

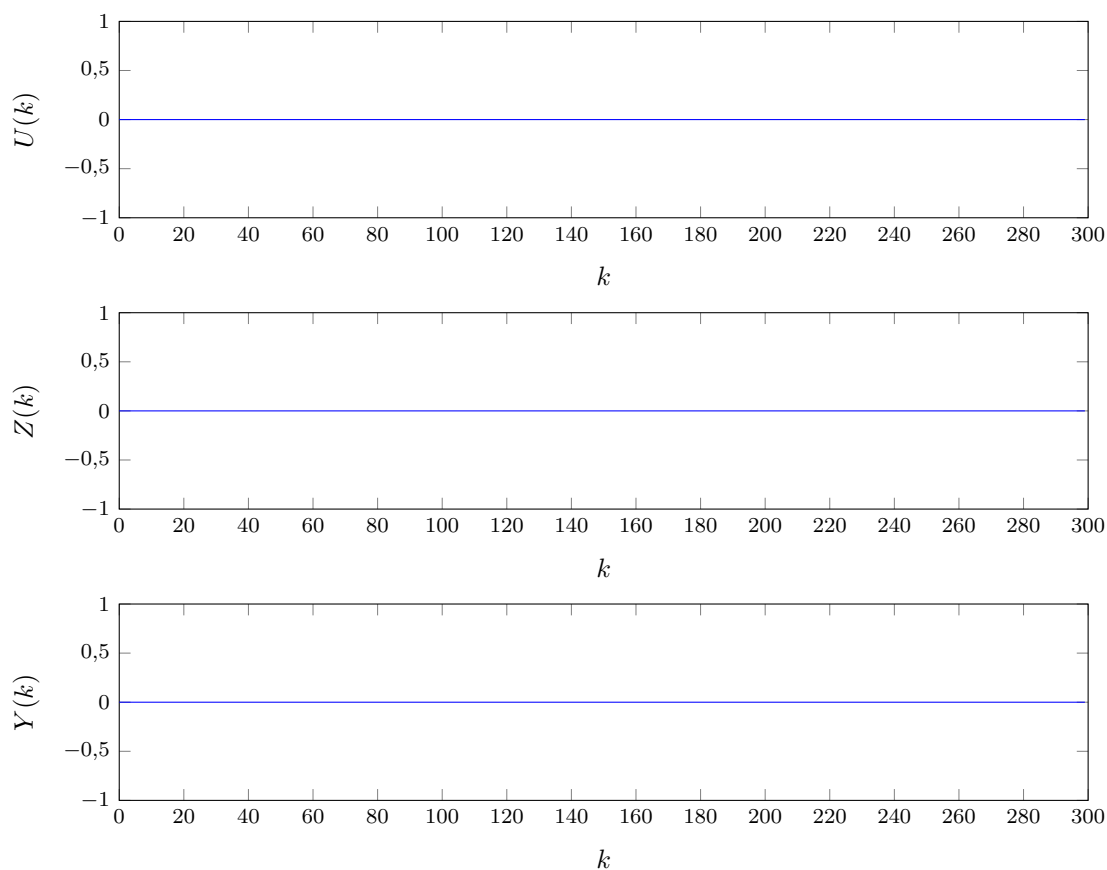
W laboratorium pracowaliśmy na stanowisku grzejąco-chłodzącym. Celem pracy było wykorzystanie nabytych, podczas realizacji projektu, umiejętności do implementacji regulatora na obiekcie rzeczywistym. Podczas ćwiczeń laboratoryjnych korzystaliśmy tylko z części elementów wykonawczych stanowiska: grzałki G1, wentylatora W1 i czujnika temperatury T1. Jako sygnał zakłócający Z zostanie wykorzystana także grzałka G1. Jest to sygnał o nieznanym wzmacnieniu.

## 2. Projekt

### 2.1. Zadanie 1

W celu sprawdzenia poprawności wartości sygnałów w punkcie pracy pobudziliśmy obiekt sygnałem o stałej wartości równej  $U_{pp} = 0$ , przy stałym zakłóceniu  $Z_{pp} = 0$ . Spodziewana wartość wyjścia to  $Y_{pp} = 0$ .

Zadanie wykonaliśmy przy użyciu skryptu `zad1.m`, który symuluje badaną sytuację. Przy opisanym wyżej pobudzeniu obiekt, zgodnie z oczekiwaniami, stabilizuje się w  $Y_{pp} = 0$  (*Rys.2.1*).

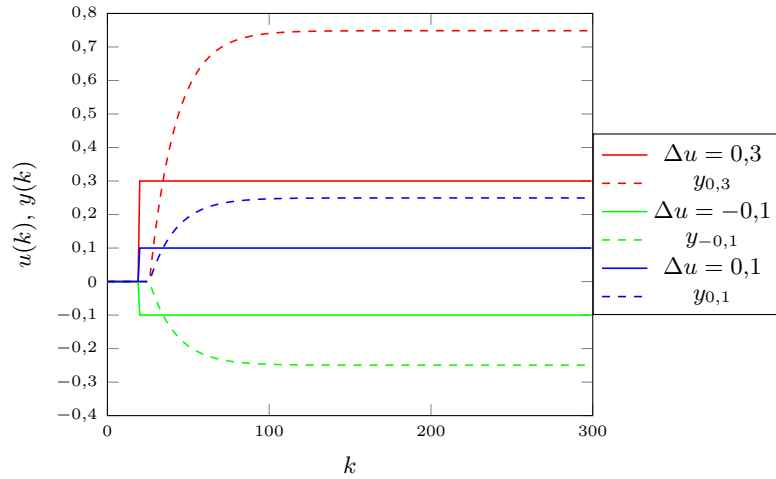


Rys. 2.1. Odpowiedź w punkcie pracy

### 2.2. Zadanie 2

#### 2.2.1. Odpowiedź skokowa toru wejście - wyjście

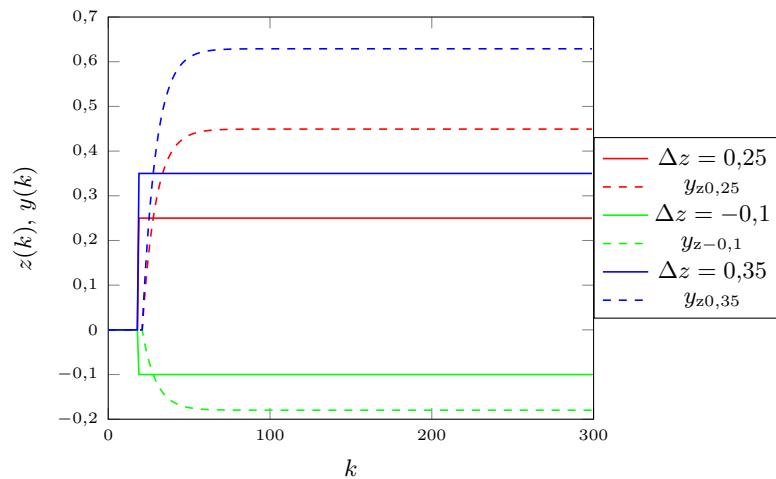
Wyznaczanie odpowiedzi rozpoczęliśmy z ustalonego w zadaniu punktu pracy przy zakłóceniu  $Z_{pp} = 0$ . Widoczne na rysunku *Rys.2.2* odpowiedzi pokazują, że wartość wyjściowa rośnie wraz ze wzrostem wartości skoku.



Rys. 2.2. Odpowiedź procesu na skokową zmianę sygnału sterowania.

### 2.2.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie - wyjście

Odpowiedź skokową otrzymaliśmy pobudzając obiekt skokiem zakłócenia przy zerowych warunkach początkowych (Rys.2.3). Podobnie jak przy pobudzeniu sterowaniem, wartość sygnału wyjściowego rośnie wraz z wartością skoku co potwierdza przypuszczenia o liniowości obiektu.



Rys. 2.3. Odpowiedź procesu na skokową zmianę sygnału zakłócenia.

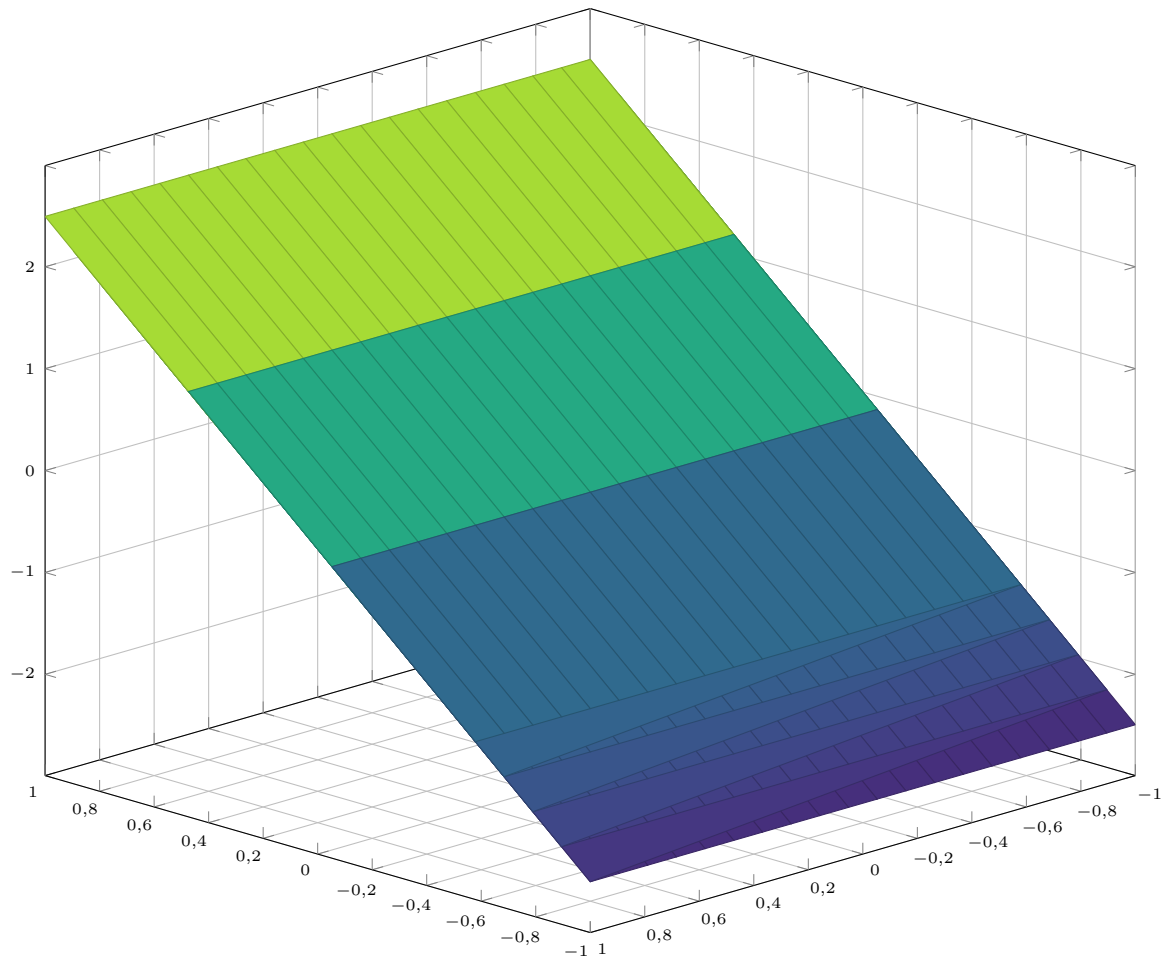
### 2.2.3. Charakterystyka statyczna

W celu otrzymania charakterystyki statycznej zależnej od dwóch argumentów należy przeprowadzić eksperyment dla każdego argumentu oddzielnie i zapamiętać wartość, w której wyjście stabilizuje się. Do wykonania tego zadania wykorzystaliśmy skrypt `zad2_static.m`. Wykres (Rys.2.4) przedstawia płaszczyznę co świadczy o tym, że obiekt jest liniowy.

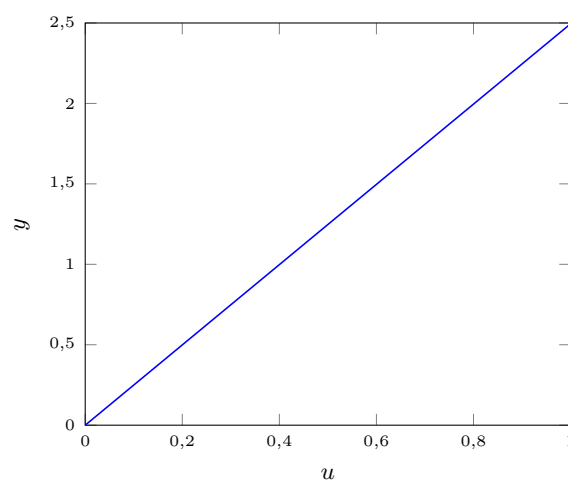
### 2.2.4. Wzmocnienie statyczne

Eksperymenty przeprowadzone w poprzednim podpunkcie pozwalają określić wzmocnienie statyczne  $K_{\text{stat}}$ .

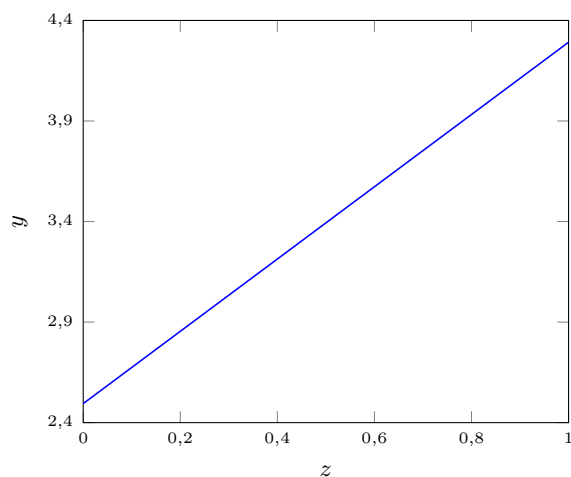
$$K_{\text{stat}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t) - Y_{\text{pp}}}{u_0 - U_{\text{pp}}} \quad (2.1)$$

Rys. 2.4. Charakterystyka statyczna  $y(u, z)$ .

Jest ono również równe tangensowi kąta nachylenia prostej do osi  $OX$ . Charakterystyki statyczne torów wejście-wyjście i zakłócenie-wyjście widoczne są na rysunkach *Rys.2.5* i *Rys.2.6* i wynoszą odpowiednio  $K_{\text{stat}U} = 2,49$  oraz  $K_{\text{stat}Z} = 1,79$ .



Rys. 2.5. Charakterystyka statyczna toru wejście-wyjście.

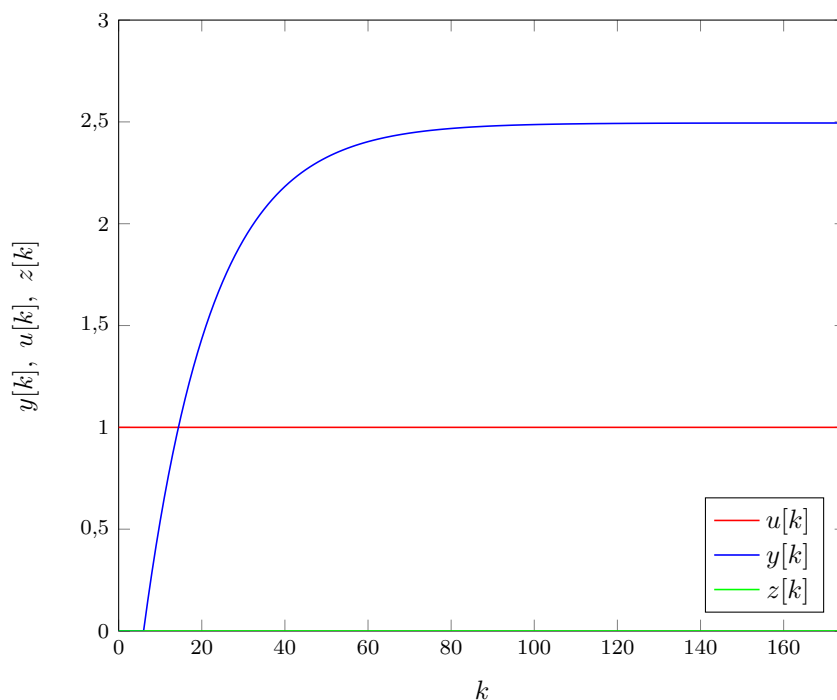


Rys. 2.6. Charakterystyka statyczna toru zakłócenie-wyjście.

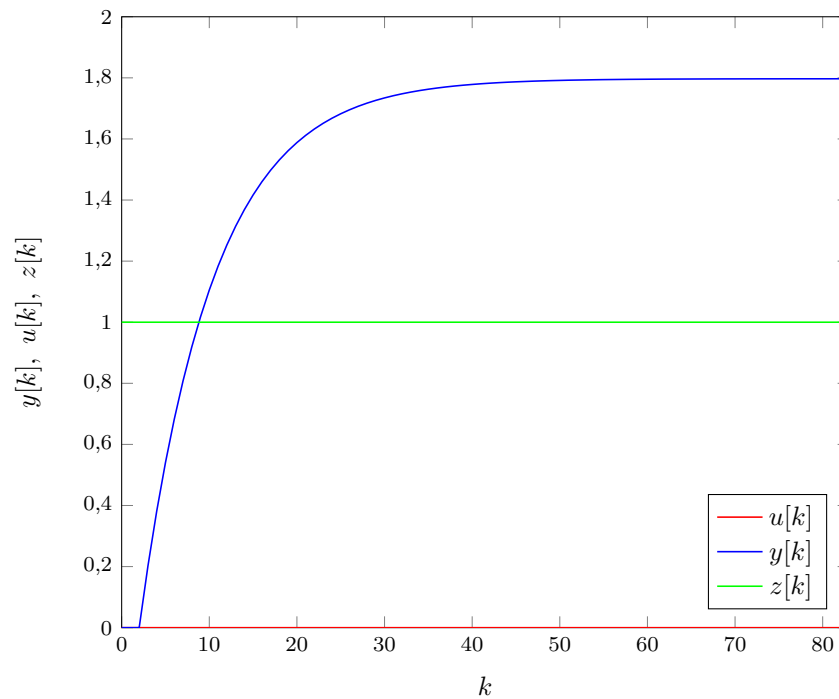
### 2.3. Zadanie 3

W regulatorze predykcyjnym DMC wykorzystujemy znormalizowaną odpowiedź skokową w postaci zestawu liczb  $s_1, s_2, \dots$ , które opisują reakcje obiektu na skok jednostkowy.

W celu normalizacji wykonaliśmy skok jednostkowy sterowania oraz oddzielnie zakłócenia i zniwelowaliśmy wpływ punktu pracy na wynik. Współczynniki po ustabilizowaniu odpowiedzi nie wpływają na jakość regulacji więc możemy je odrzucić. Współczynniki pozostawione są użyteczne, stanowią horyzonty dynamiki  $D_U$  i  $D_Z$  procesu. Odpowiedzi skokowe przedstawione są na rysunkach *Rys.2.7* oraz *Rys.2.8*.



Rys. 2.7. Znormalizowana odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście



Rys. 2.8. Znormalizowana odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście

## 2.4. Zadanie 4

W implementacji regulatora DMC wykorzystaliśmy kod z poprzedniego projektu, którego fragment widoczny jest poniżej.

```
%Wyznaczanie macierzy predykcji
Mp = zeros(N,D-1);

for i = 1:N
    for j = 1:(D-1)
        if (i+j > D)
            Mp(i,j) = s(D) - s(j);
        else
            Mp(i,j) = s(i+j) - s(j);
        end
    end
end

%Wyznaczanie macierzy dynamicznej
M = zeros(N,Nu);

for j = 1:Nu
    for i = 1:N
        if i >= j
            M(i,j) = s(i-j+1);
        end
    end
end

%Wyznaczenie współczynnika K
K = (M'*M+lambda*eye(Nu))^-1*M';
```

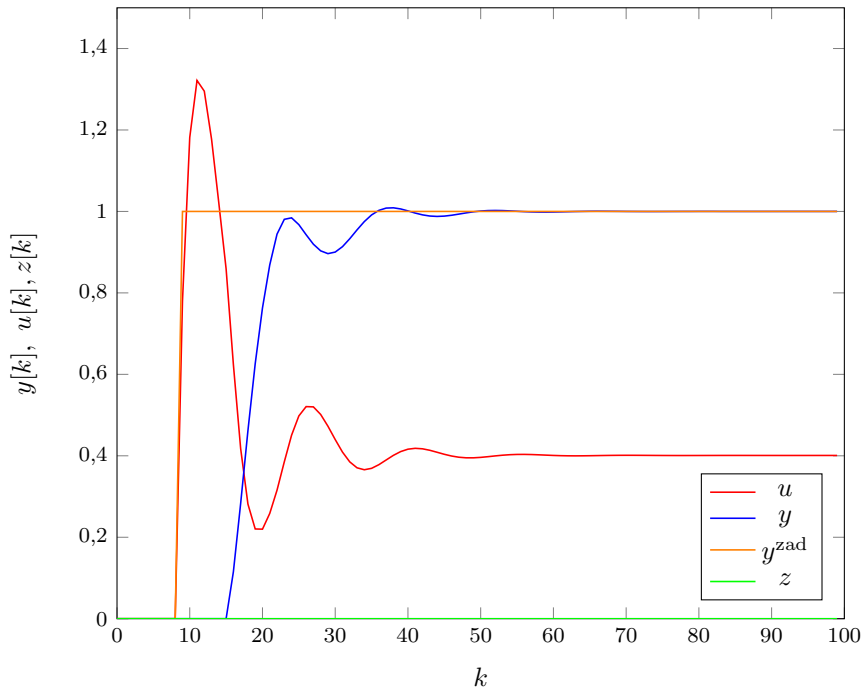


### 2.4.1. Strojenie regulatora DMC

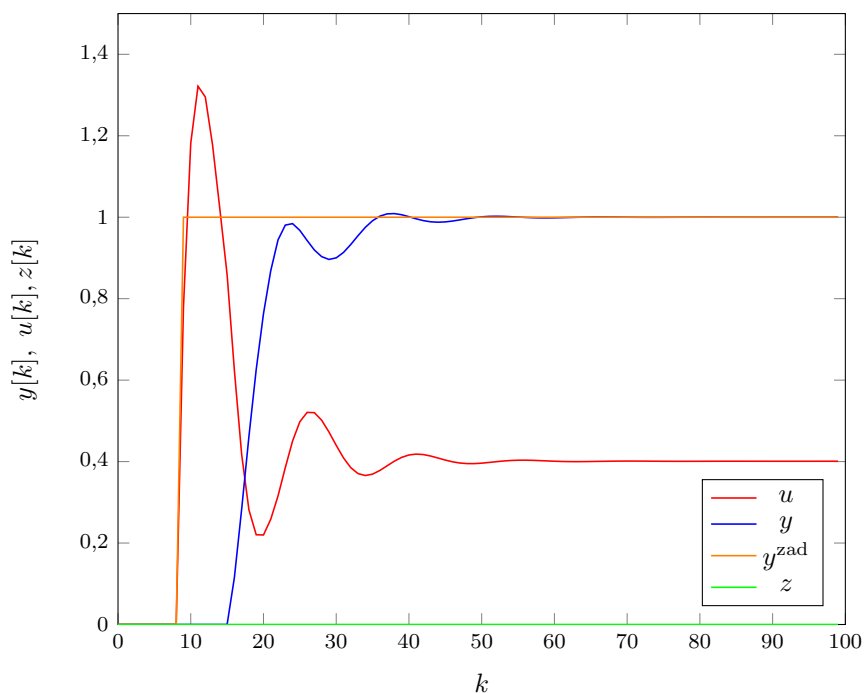
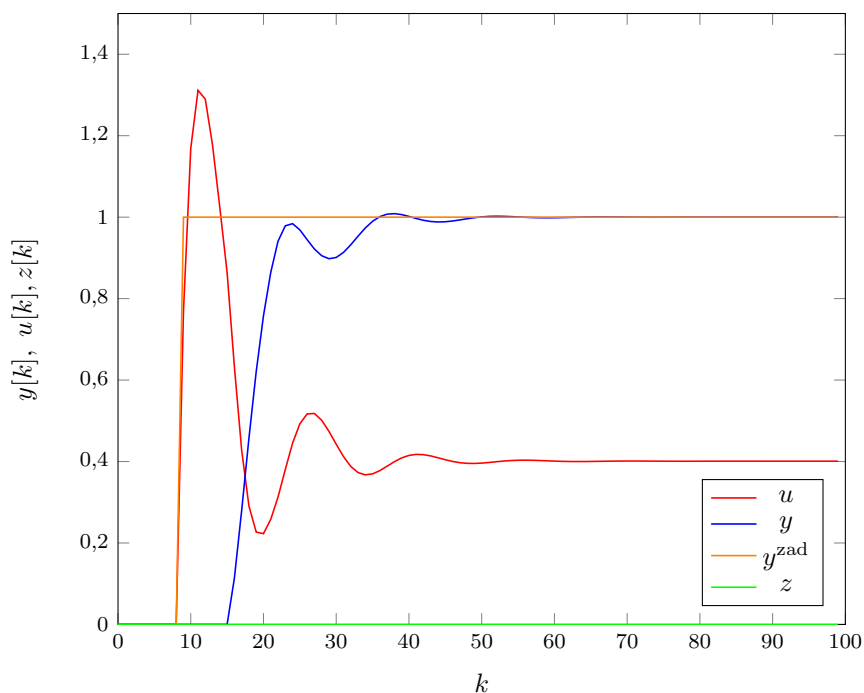
W celu dobrania odpowiednich nastaw regulatora DMC, wykonywaliśmy stały skok wartości zadanej z 0 na 1 w tej samej próbkę czasu podczas każdej symulacji. Przed skokiem układ za każdym razem był w stanie ustalonym. Na tym etapie wartość zakłócenia mierzalnego wynosiła 0 przez cały czas trwania symulacji, więc człon regulatora uwzględniający zakłócenia mierzalne był wyłączony. Czas symulacji za każdym razem ustawialiśmy na 100 próbek w celu łatwego porównania działania regulatora DMC przy różnych parametrach.

Parametr  $D$  ustawiliśmy na 175 (długość odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy). Pierwszym krokiem strojenia było przypisanie  $N_u = N$ ,  $\lambda = 1$  i stopniowe zmniejszanie parametru  $N$  zaczynając od wielkości  $D$  (Rys.2.9). Regulator zaczął działać minimalnie gorzej dla  $N = 13$  (Rys.2.12). Od tego momentu ustawiliśmy parametr  $N$  na powyższą wartość i dobraliśmy najlepsze  $N_u$  z zakresu od 1 do  $N$ . Optymalnie dobre wyniki dawał regulator z parametrem  $N_u = 2$  (Rys.2.13). Kolejnym krokiem było eksperymentalne zmienianie parametru  $\lambda$ . Zwiększając  $\lambda$  powyżej 1 otrzymywaliśmy coraz lepsze przebiegi sygnałów, lecz znacznie odbiło się to na szybkość i jakość regulacji. Z kolei w drugą stronę (zmniejszając parametr  $\lambda$ ) poprawiała się jakość regulacji kosztem przebiegów sygnałów, które stawały się coraz bardziej chaotyczne i ulegały gwałtownym, dużym zmianom (Rys.2.14 – Rys.2.17). Przyjęliśmy zatem  $\lambda = 1$  jako optymalną wartość parametru (Rys.2.18).

Nie byliśmy zadowoleni z działania regulatora z nastawami  $N = 13$ ,  $N_u = 2$ ,  $\lambda = 1$ , przez co zaczęliśmy eksperymentalnie zmieniać ponownie parametry w kolejności takiej samej jak poprzednio ( $N$ ,  $N_u$ ,  $\lambda$ ) i otrzymaliśmy optymalnie działający regulator z nastawami  $N = 17$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 2$  (Rys.2.19). Wskaźnik jakości regulacji uległ lekkiemu pogorszeniu (spadek jakości z  $E = 8,8069$  na  $E = 9,4566$ ), jednak przebiegi sygnałów znacznie się poprawiły. Proces regulacji przedstawiają wykresy Rys.2.9 - Rys.2.15.

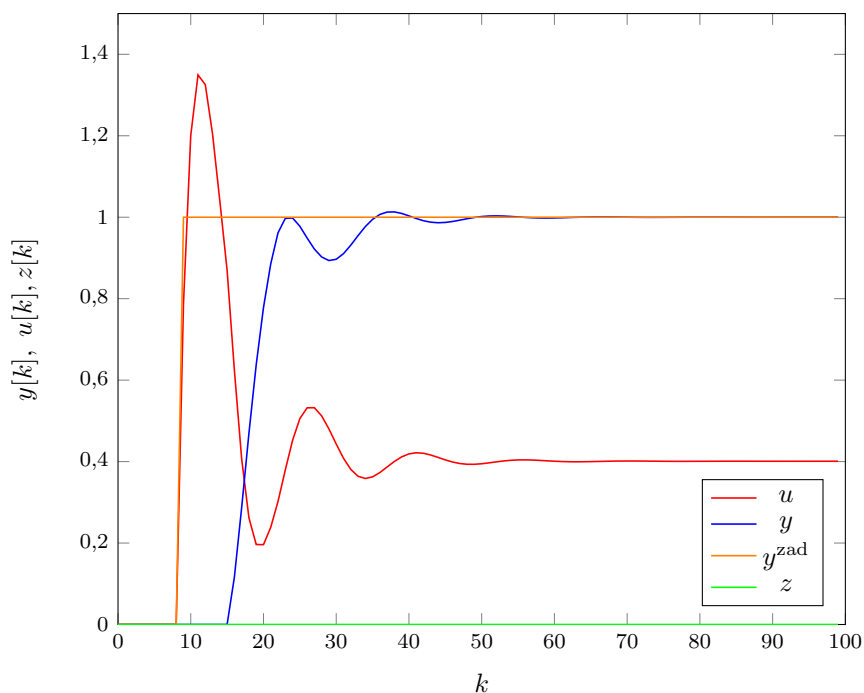
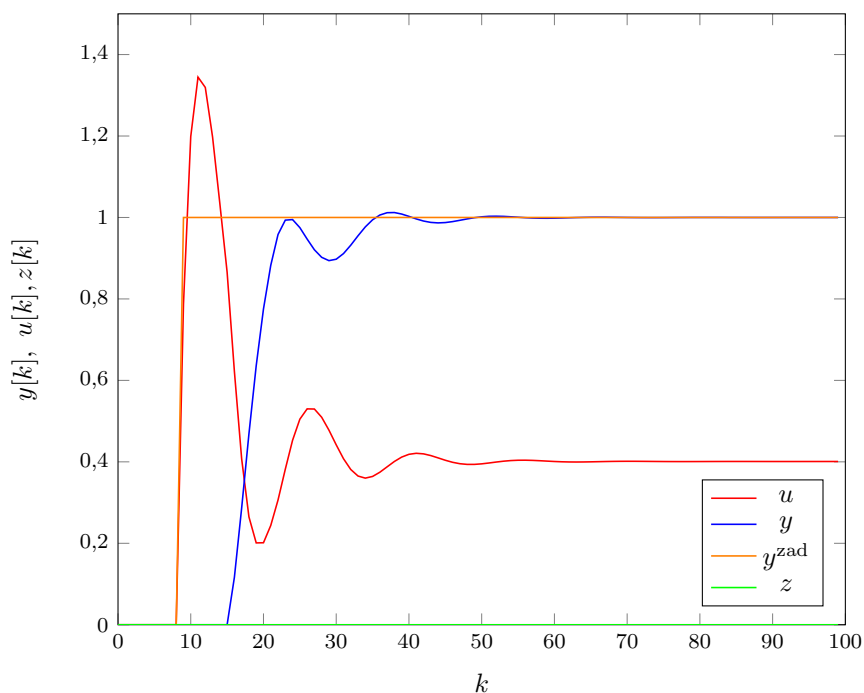


Rys. 2.9. Regulator DMC:  $D = 175$ ,  $N = 175$ ,  $N_u = 175$ ,  $\lambda = 1$ ,  $E = 8,8594$

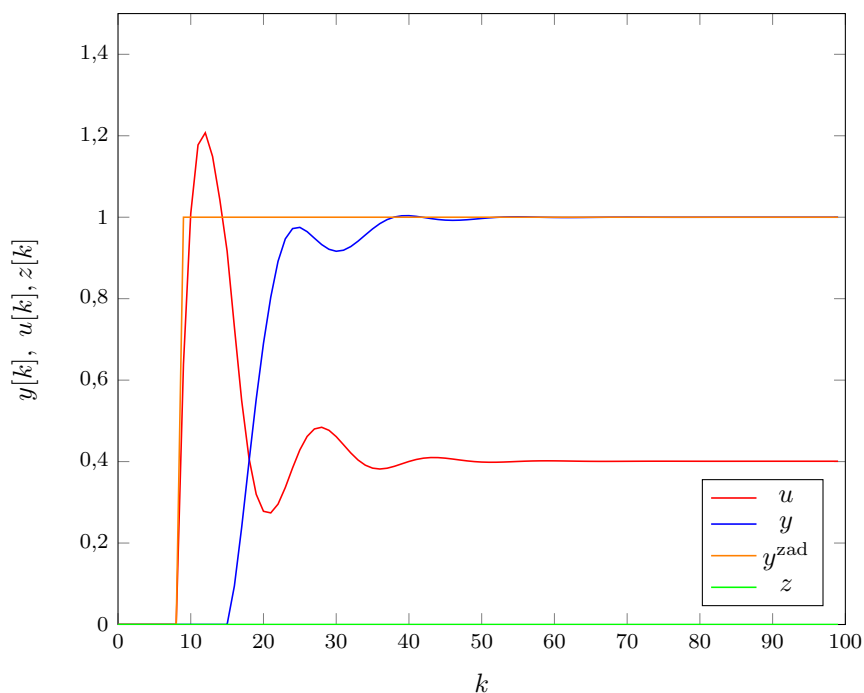
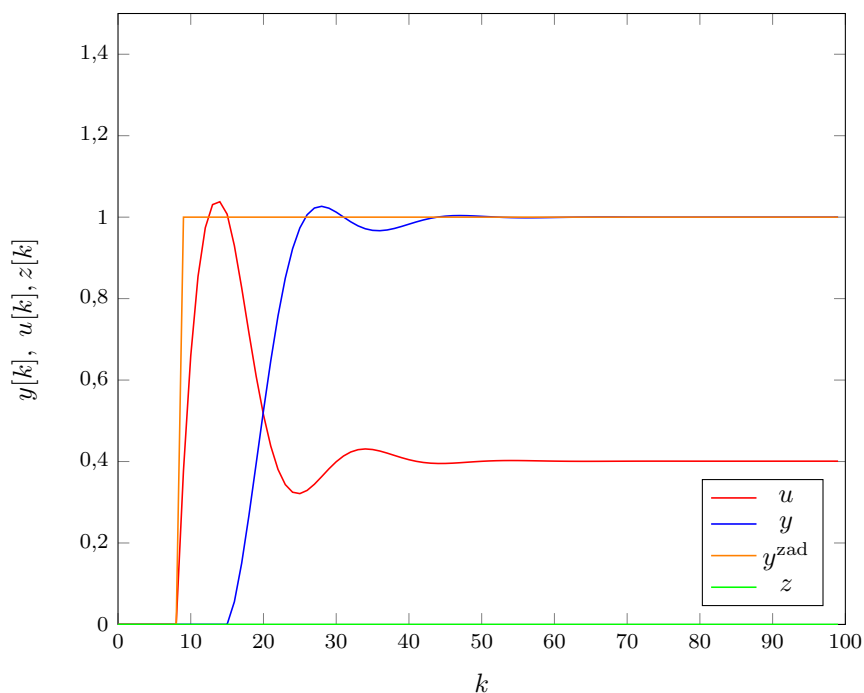
Rys. 2.10. Regulator DMC:  $D = 175, N = 25, N_u = 25, \lambda = 1, E = 8,8594$ Rys. 2.11. Regulator DMC:  $D = 175, N = 17, N_u = 17, \lambda = 1, E = 8,8792$ 

## 2.5. Zadanie 5

Najlepszy regulator z poprzedniego zadania ( $N = 17, N_u = 1, \lambda = 2$ ) przetestowaliśmy z włączonym członem uwzględniającym pomiar zakłócenia mierzalnego. W momencie ustabilizowania się wartości wyjściowej (osiągnięcie wartości zadanej i ustabilizowanie się obiektu w tym punkcie) dokonaliśmy skoku zakłócenia z wartości 0 na 1. Dobraliśmy parametr  $D^z$  w taki sposób, że zmniejszaliśmy jego wartość zaczynając od 82 (długość odpowiedzi obiektu na

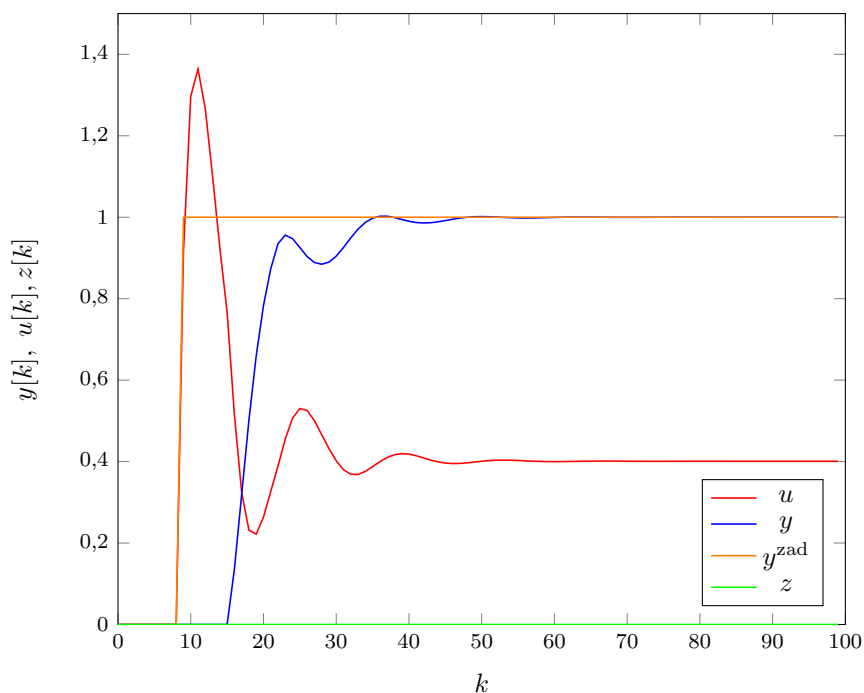
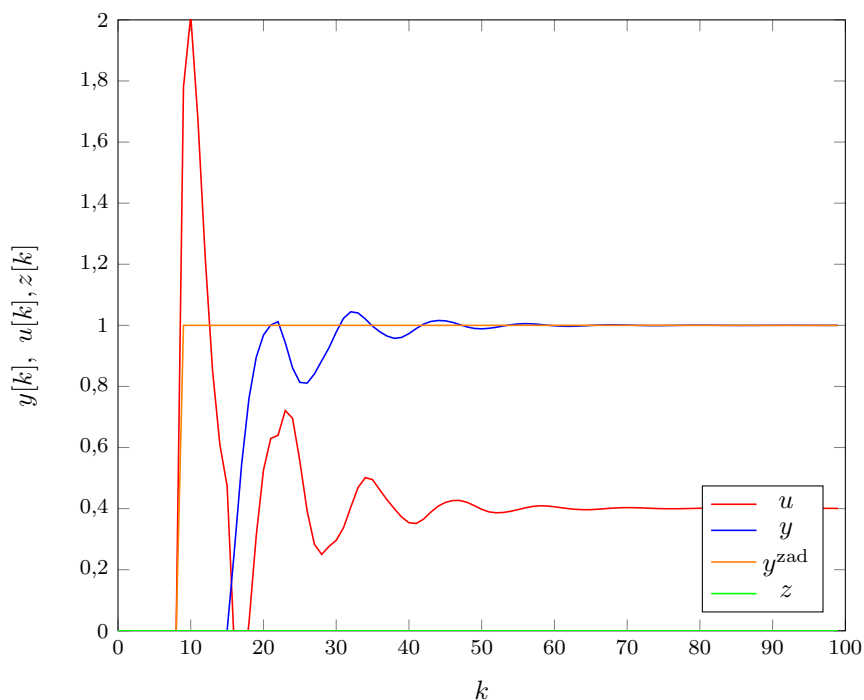
Rys. 2.12. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 13, \lambda = 1, E = 8, 8229$ Rys. 2.13. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 4, \lambda = 1, E = 8, 8275$ 

skok jednostkowy zakłócenia - Rys.2.20). Wpływ wprowadzonej zmiany okazał się znikomy. Dla  $D^z = 49$  zauważyliśmy minimalne pogorszenie się jakości regulacji, więc zostawiliśmy regulator DMC z wartością  $D^z = 50$  (Rys.2.21). Porównaliśmy również działanie regulatora uwzględniającego pomiar zakłócenia z regulatorem z zadania 4 z wyłączonym członem reagującym na zmianę zakłócenia (Rys.2.22). Gołym okiem widać, że uwzględnienie pomiaru zakłóceń daje lepsze wyniki niż jego brak, aczkolwiek regulator i tak nie jest w stanie zareagować na zmianę zakłócenia w taki sposób, by nie odbiło się to sygnale wyjściowym.

Rys. 2.14. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 2, E = 9, 1525$ Rys. 2.15. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 5, E = 9, 962$ 

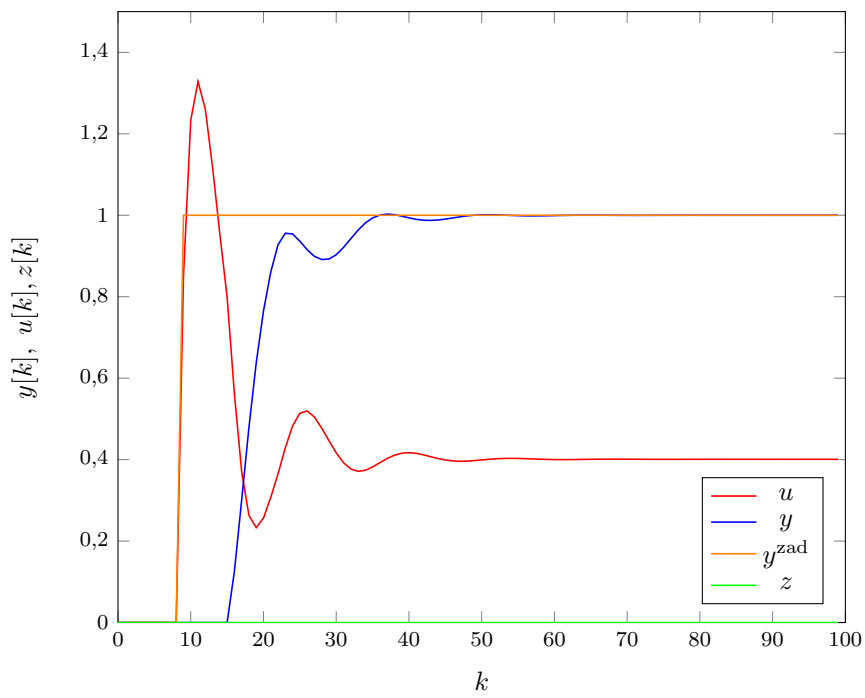
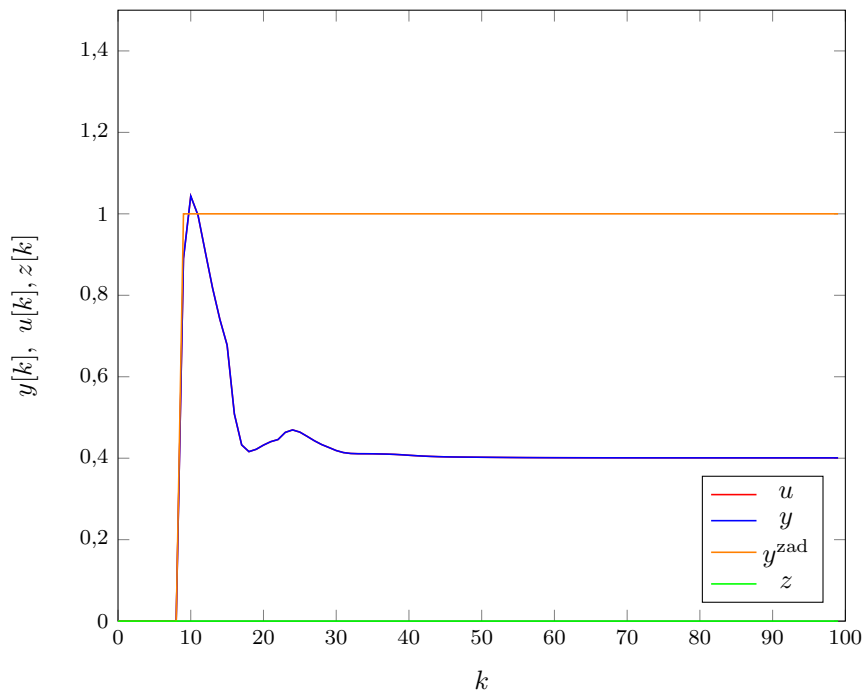
## 2.6. Zadanie 6

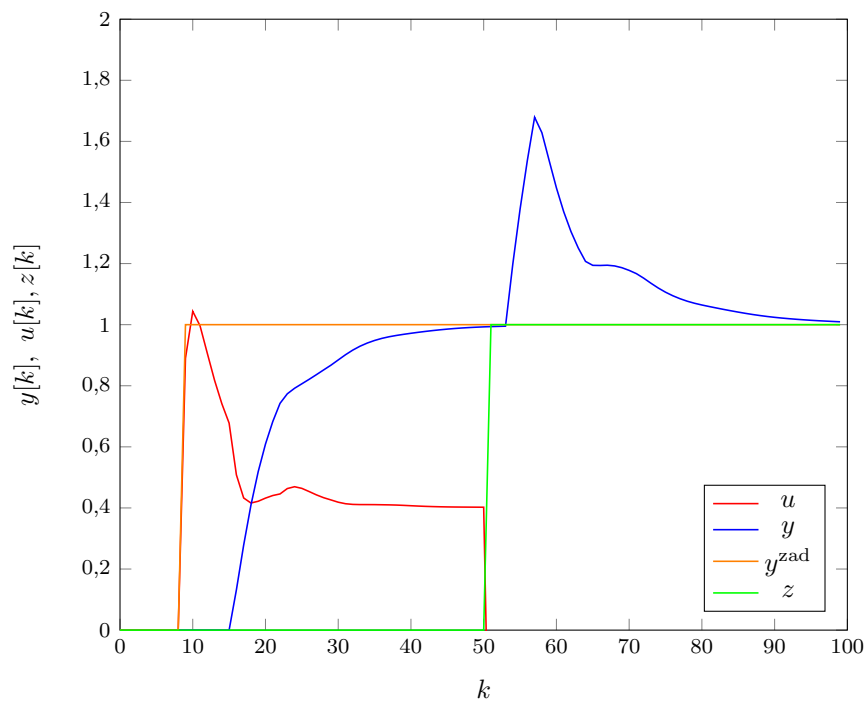
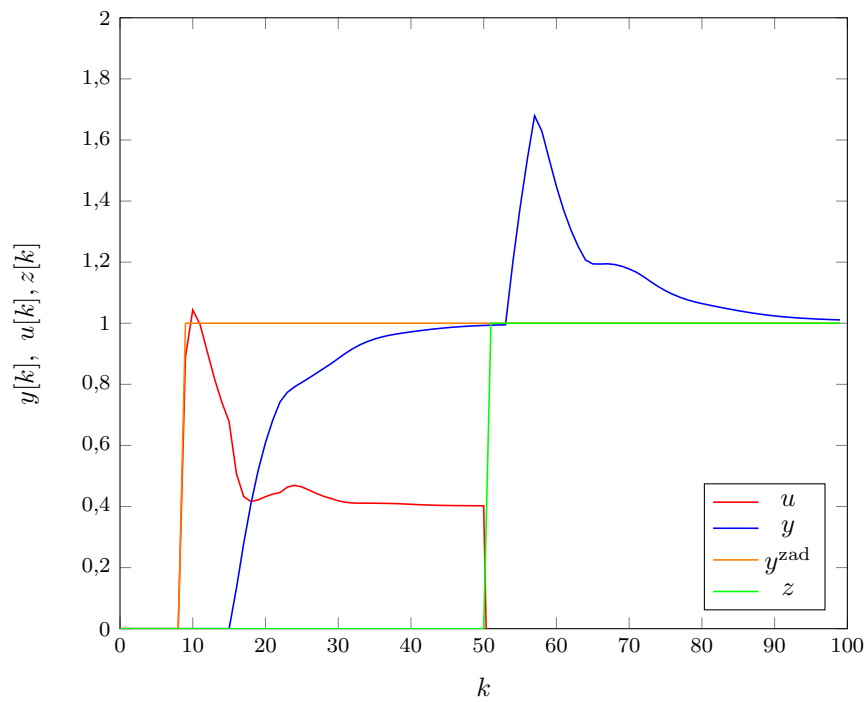
W poprzednim zadaniu sprawdzaliśmy pracę regulatora przy jednorazowej zmianie zakłócenia z 0 na 1. Tym razem przetestowaliśmy działanie regulatora przy ciągłej zmianie zakłócenia. Użyliśmy sygnału sinusoidalnego o różnych okresach oscylacji i różnych wzmocnieniach. Jeśli chodzi o pierwszy regulator (uwzględniający zakłócenia) to nie otrzymaliśmy zadowalających rezultatów (rys. 2.23 – rys. 2.25). Pomimo pomiaru zakłóceń, układ wpada w niekończące się

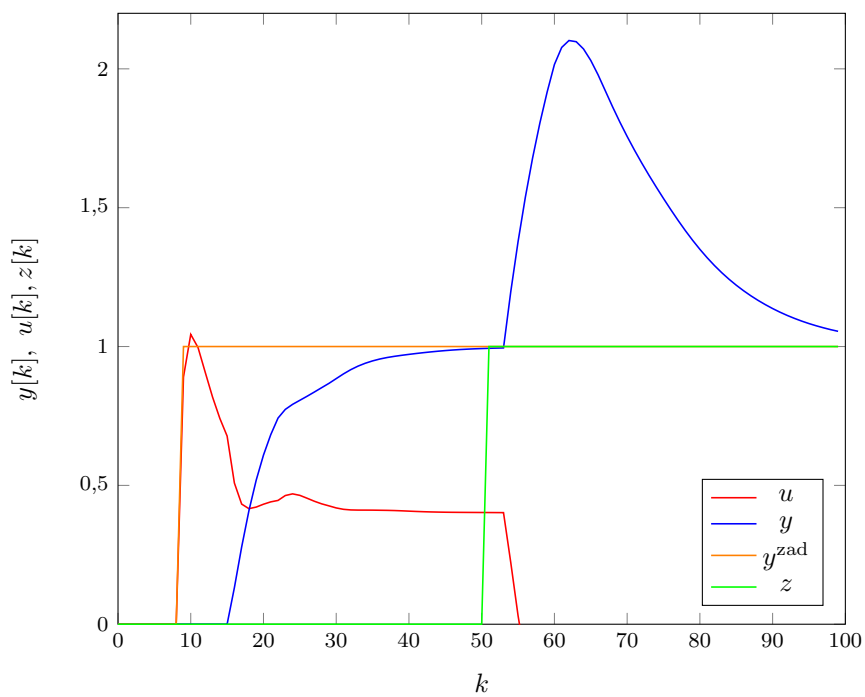
Rys. 2.16. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 0.8, E = 8,7189$ Rys. 2.17. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 0.1, E = 7,9691$ 

oscylacje, więc nie możemy uznać takiej regulacji za poprawną. Z kolei drugi regulator (bez uwzględnienia zakłóceń) okazuje się nie działać dużo gorzej dla sygnału sinusoidalnego o małej amplitudzie (np. 0.1) niż jego przeciwnik. Jednak dla sygnału zakłócenia z większą amplitudą (np. 1) jest on znacznie gorszy (Rys.2.26 – Rys.2.28).

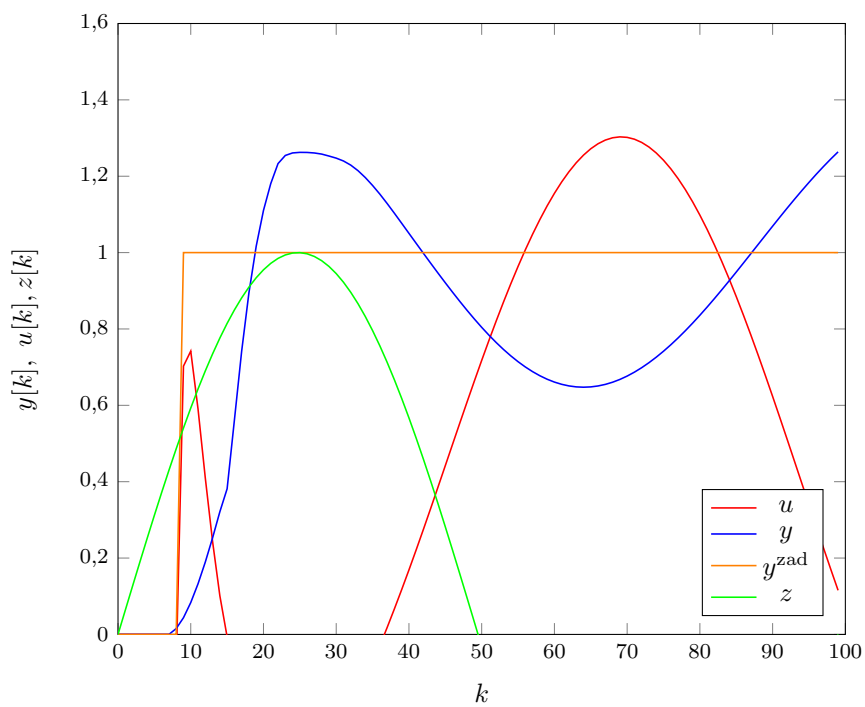
Podsumowując: nawet regulator uwzględniający zakłócenia nie jest w stanie zniwelować sinusoidalnego sygnału zakłóceń, chyba że byłby to sygnał o bardzo małym okresie.

Rys. 2.18. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 1, E = 8, 8069$ Rys. 2.19. Regulator DMC:  $D = 175, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 9, 4566$

Rys. 2.20. Regulator DMC:  $D = 175, D^z = 83, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 11,9702$ Rys. 2.21. Regulator DMC:  $D = 175, D^z = 50, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 11,9704$

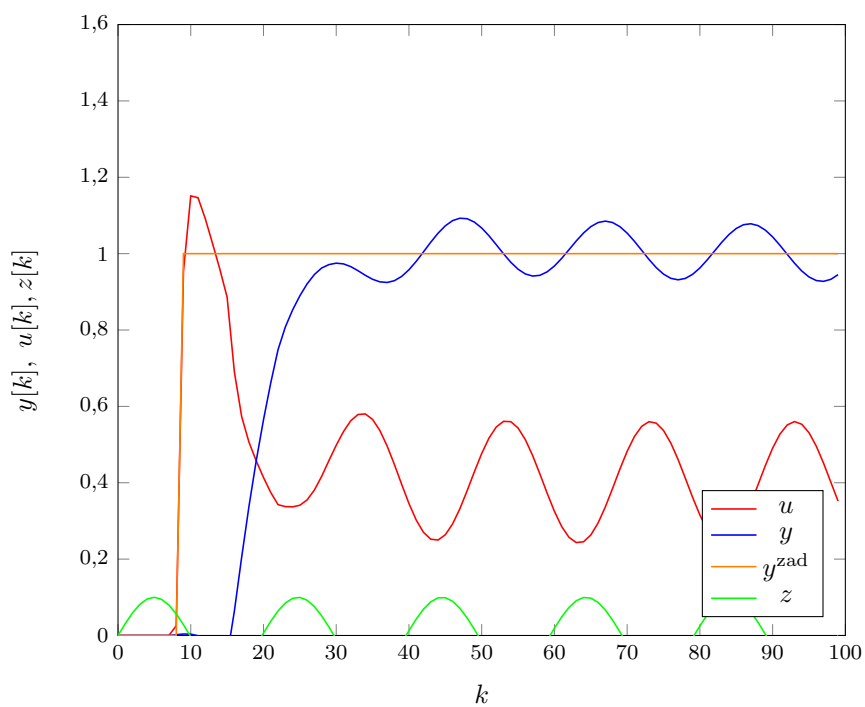


Rys. 2.22. Regulator DMC:  $D = 175, D^z = 0, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 25,8762$

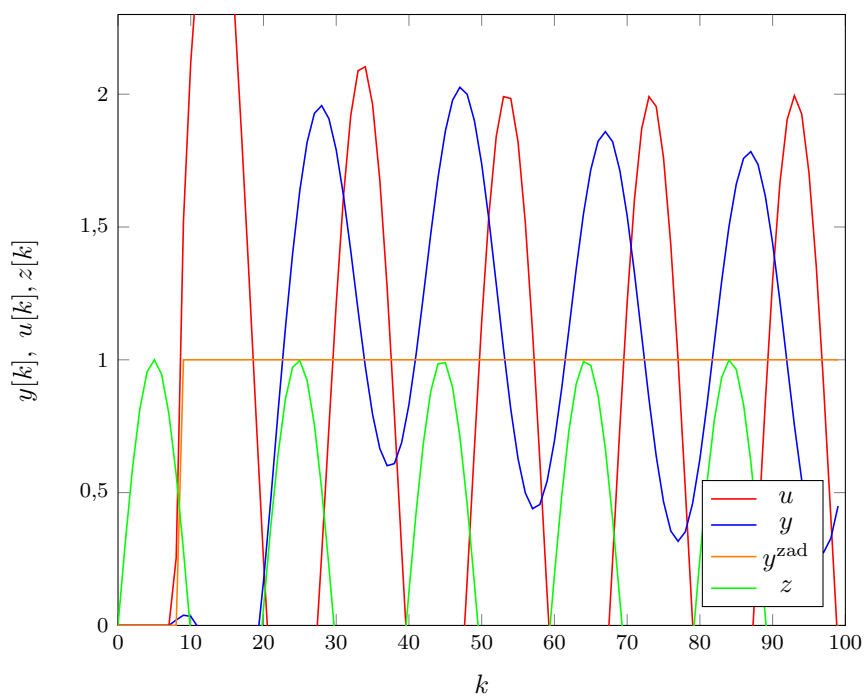


Rys. 2.23. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń:  $f = 6,2832, K = 1, E = 8,9114$

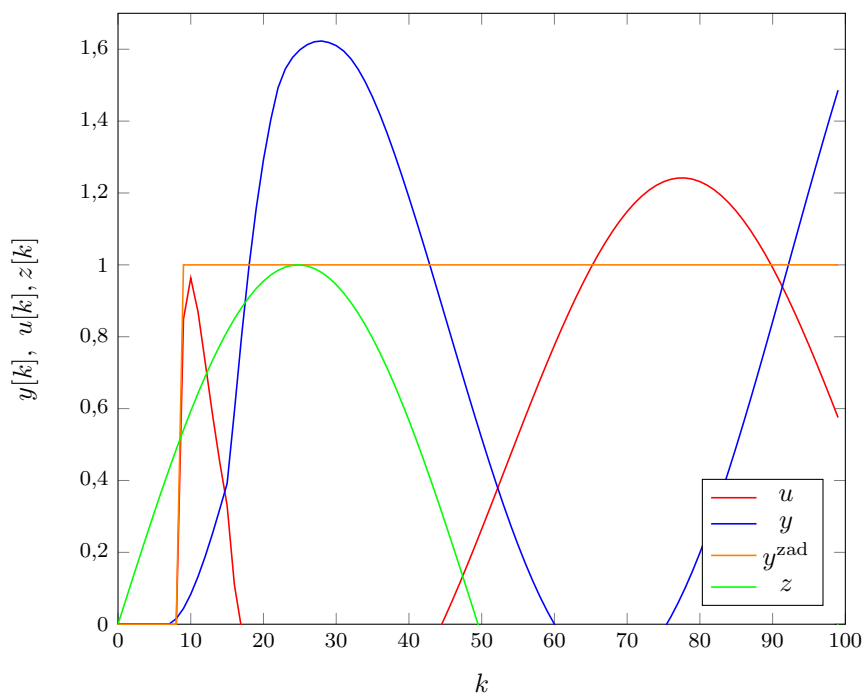




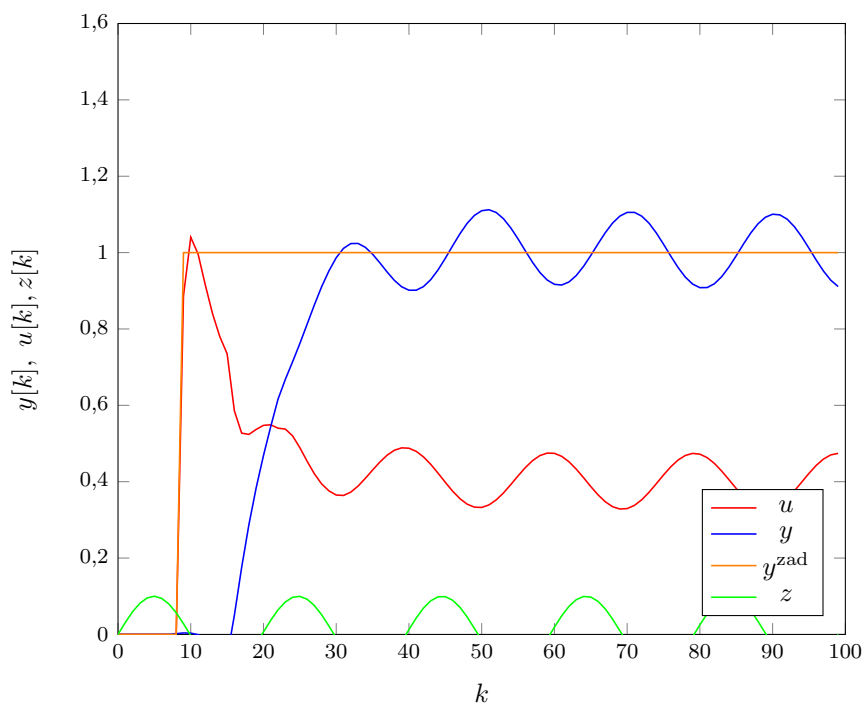
Rys. 2.24. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń:  $f = 31,4159$ ,  $K = 0,1$ ,  $E = 10,1471$



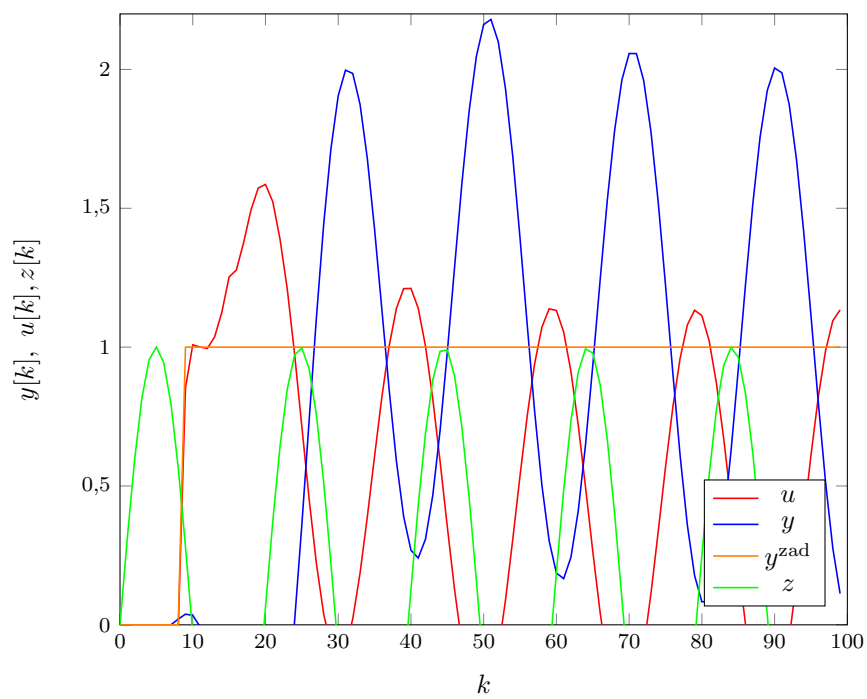
Rys. 2.25. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń:  $f = 6,2832$ ,  $K = 1$ ,  $E = 8,9114$



Rys. 2.26. Regulator DMC bez pomiaru zakłóceń:  $f = 6,2832$ ,  $K = 1$ ,  $E = 42,4819$



Rys. 2.27. Regulator DMC bez pomiaru zakłóceń:  $f = 31,4159$ ,  $K = 0,1$ ,  $E = 10.9901$



Rys. 2.28. Regulator DMC bez pomiaru zakłóceń:  $f = 31,4159, K = 1, E = 69,1634$

## 3. Laboratorium

### 3.1. Zadanie 1

Sprawdzając komunikację ze stanowiskiem skorzystaliśmy z dwóch funkcji zapewnionych przez prowadzącego `MinimalWorkingExample.m` raz `sendControlsToG1AndDisturbance.m`. Pierwsza z nich pozwala w prosty sposób, konfigurując port, na którym odbywa się komunikacja, zadawać wartości sterowania na poszczególne elementy wykonawcze stanowiska.

```
sendControls(1, 50);
```

Zadając wartość 0 i 50 na wentylator widzimy i słyszymy czy komunikacja zachodzi.

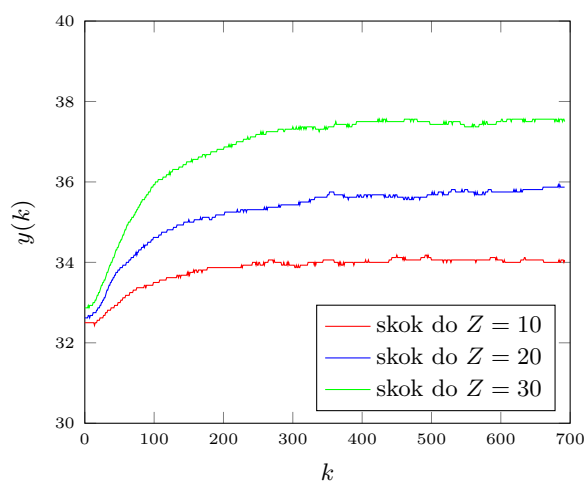
Sterowanie grzałką w tym zadaniu odbywało się z użyciem drugiej z wymienionych funkcji, aby zrealizować zadane w poleceniu zakłócenia. Funkcja `sendControlsToG1AndDisturbance.m` przyjmuje dwa argumenty: wartość sterowania grzałką `G1` i zakłócenia `Z`.

```
sendControlsToG1AndDisturbance(35, Z);
```

Kolejnym krokiem było określenie wartości temperatury w punkcie pracy:  $G1 = 35$ ,  $W1 = 50$ ,  $Z = 0$ . Dla takich nastaw temperatura wynosiła ok.  $32^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2. Zadanie 2

Rozpoczynając z punktu pracy - przy zerowym zakłóceniu - wyznaczyliśmy trzy odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście, wykonując skoki sygnału zakłócającego w chwili  $k = 0$  odpowiednio do wartości 10, 20 i 30. Wszystkie odpowiedzi przedstawione są na rysunku *Rys.2.1*. Wyznaczono charakterystykę statyczną (*Rys.2.2*). Właściwości statyczne obiektu możemy określić jako (w przybliżeniu) liniowe. Wzmocnienie statyczne dla tego toru wynosi w przybliżeniu 0,15 - wartość współczynnika kierunkowego funkcji liniowej będącej charakterystyką statyczną.



Rys. 3.1. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyjście dla różnych zmian sygnału zakłócającego w chwili  $k = 0$

### 3.3. Zadanie 3

Przygotowujemy odpowiedź skokową toru wejście-wyjście tzn. zestaw liczb  $s_1, s_2, \dots$  oraz odpowiedź skokową toru zakłócenie-wyjście tzn. zestaw liczb  $s_1^z, s_2^z, \dots$  wykorzystywane w algorytmie DMC (odpowiedź na skok jednostkowy w chwili  $k = 0$ ). Dokonujemy poniższych operacji na wektorach pobranych odpowiedzi skokowych obiektu.

$$s_i = \frac{y_i - Y_{pp}}{\Delta U}, \text{ dla } i = 1, \dots \quad (3.1)$$

$$s_i^z = \frac{y_i - Y_{pp}}{\Delta Z}, \text{ dla } i = 1, \dots \quad (3.2)$$

Wykorzystano odpowiedź skokową przy zmianie wartości  $G1$  z 35 na 37 oraz odpowiedź skokową przy zmianie wartości  $Z$  z 0 na 30. Odpowiedzi skokowe zaproksymowano używając członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem. Zastosowano optymalizację – wyznaczenie takich wartości parametrów  $T_1, T_2, K, T_d$ , aby wartość funkcji celu (wartość błędu dopasowania) była jak najmniejsza.

$$\min E = \sum_{k=1}^{k_{\max}} (s(k) - y_{\text{apros}}(k))^2 \quad (3.3)$$

Przyjęto następujące ograniczenia parametrów:

$$0,001 \ll T_1 \ll 1000 \quad (3.4)$$

$$0,001 \ll T_2 \ll 1000 \quad (3.5)$$

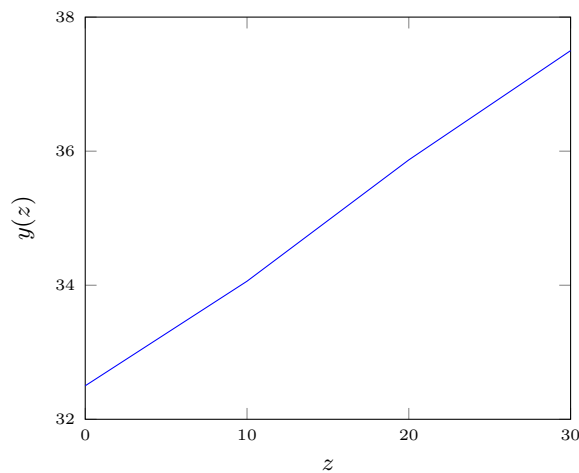
$$-10 \ll K \ll 10 \quad (3.6)$$

$$0 \ll T_d \ll 500 \quad (3.7)$$

Optymalizacji dokonano wykorzystując funkcję **fmincon**, która znajduje minimum funkcji z uwzględnieniem ograniczeń. Jedynymi ograniczeniami są te, narzucone na argumenty wywołania funkcji celu, czyli na wyżej określone parametry. Kryteria zatrzymania algorytmu pozostawiono domyślne. Podsumowując, wynik algorytmu otrzymano przez zastosowanie polecenia:

```
[optim_params , E] = fmincon(fun , x0 , [], [], [], [], lb , ub);
```

gdzie:



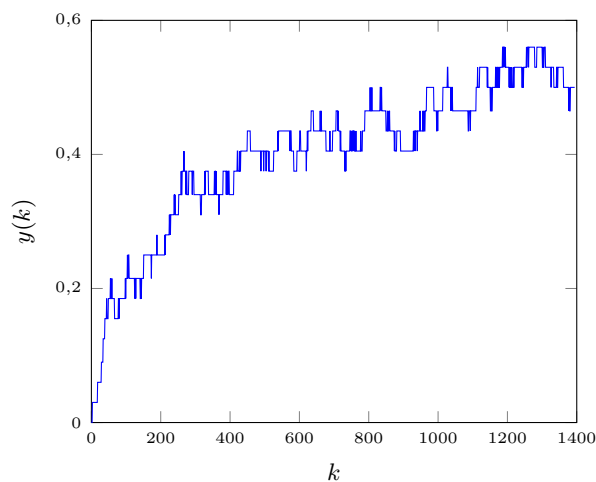
Rys. 3.2. Charakterystyka statyczna - tor zakłócenie-wyjście

`optim_params` – szukane parametry  
`E` – błąd dopasowania  
`fun` – funkcja zwracająca wartość błędu dopasowania  
`x0` – wektor parametrów początkowych  
`lb` – wektor dolnych ograniczeń  
`ub` – wektor górnych ograniczeń

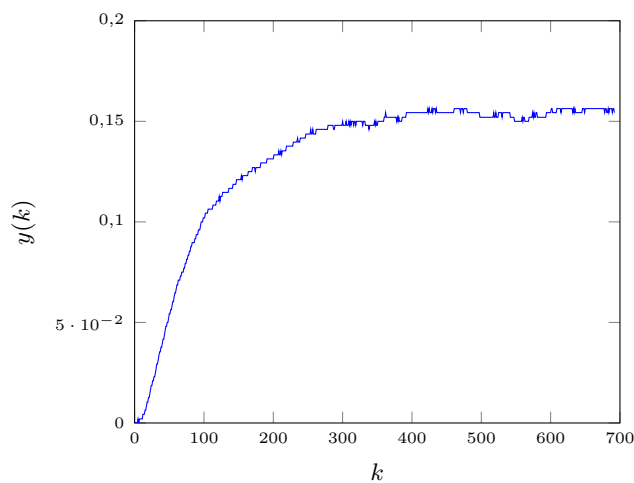
Wyznaczone parametry - tor sterowanie-wyjście:  $T_1 = 251,2387$ ,  $T_2 = 0,072\,366$ ,  $K = 0,486\,71$ ,  $T_d = 6$ ,  $E = 2,0984$ . Wyznaczone parametry - tor zakłócenie-wyjście:  $T_1 = 89,0529$ ,  $T_2 = 2,1074$ ,  $K = 0,154\,35$ ,  $T_d = 9$ ,  $E = 0,003\,077\,8$ .

### 3.4. Zadanie 4

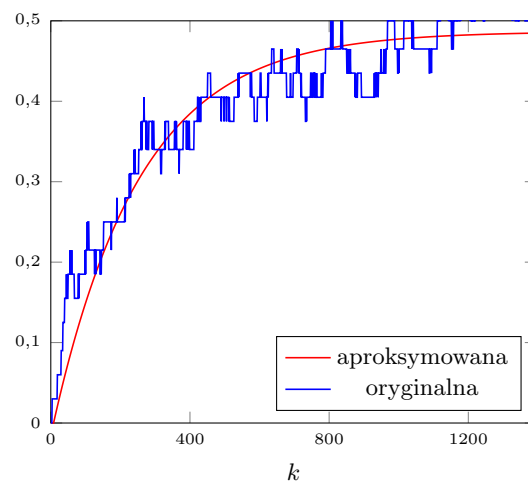
Zaimplementowany program znajduje się w pliku `DMC_lab.m`.



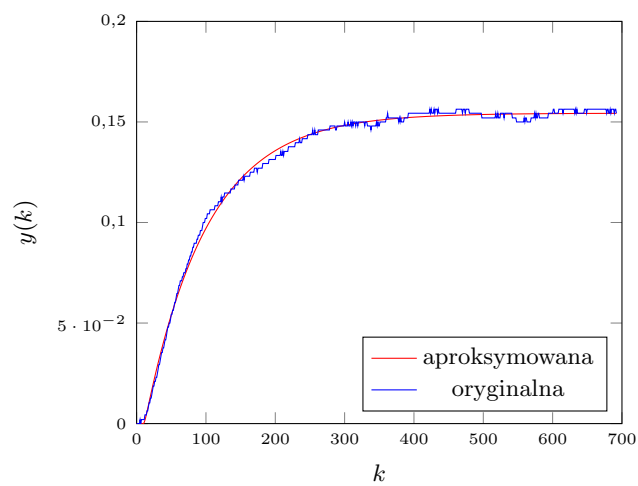
Rys. 3.3. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście wykorzystywana w algorytmie DMC



Rys. 3.4. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście wykorzystywana w algorytmie DMC



Rys. 3.5. Porównanie oryginalnej odpowiedzi skokowej toru wejście-wyjście z aproksymowaną



Rys. 3.6. Porównanie oryginalnej odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście z aproksymowaną