

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. Laboratorium</b>	3
2.1. Zadanie 1	3
2.2. Zadanie 2	3
2.3. Zadanie 3	4
2.4. Zadanie 4	6
2.4.1. Dobór parametrów algorytmu DMC przy zerowym zakłóceniu	6
2.5. Zadanie 5	9
<b>3. Projekt</b>	14
3.1. Zadanie 1	14
3.2. Zadanie 2	14
3.2.1. Odpowiedź skokowa toru wejście - wyjście	14
3.2.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie - wyjście	15
3.2.3. Charakterystyka statyczna	15
3.2.4. Wzmocnienie statyczne	16
3.3. Zadanie 3	17
3.4. Zadanie 4	18
3.4.1. Strojenie regulatora DMC	19
3.5. Zadanie 5	25
3.6. Zadanie 6	27
3.7. Zadanie 7	30

# 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 wzmocnieniu.

## 2. Laboratorium

### 2.1. 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.

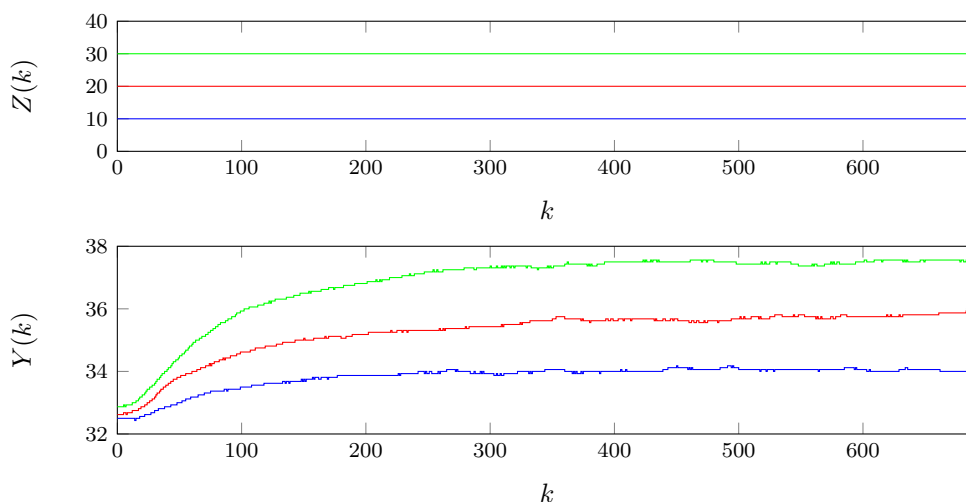
Sterowanie grzałką w tym zadaniu odbywało się z użyciem drugiej z wymienionych funkcji, aby zrealizować zadane w poleceniu zakłócenia. Funkcja `sendControlsToG1AndDisturbance.m` przyjmuje dwa argumenty: wartość sterowania grzałką `G1` i zakłócenia `Z`.

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

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

### 2.2. Zadanie 2

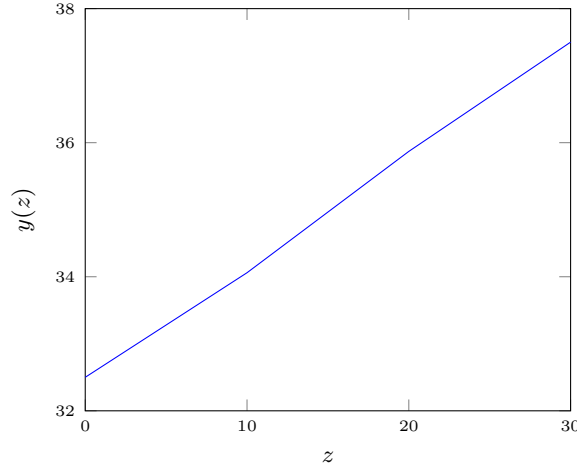
Rozpoczynając z punktu pracy - przy zerowym zakłóceniu - wyznaczyliśmy trzy odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyście, wykonując skoki sygnału zakłócającego w chwili  $k = 0$  odpowiednio do wartości 10, 20 i 30. Wszystkie odpowiedzi przedstawione są na rysunku *Rys. 2.1*.



Rys. 2.1. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyście dla różnych zmian sygnału zakłócającego w chwili  $k = 0$  (w przeszłości zerowe)

Wyznaczono charakterystykę statyczną (*Rys. 2.2*). Właściwości statyczne obiektu możemy określić jako (w przybliżeniu) liniowe. Wzmocnienie statyczne dla tego toru wynosi w przy-

blężeniu 0,15 - wartość współczynnika kierunkowego funkcji liniowej będącej charakterystyką statyczną.



Rys. 2.2. Charakterystyka statyczna - tor zakłócenie-wyjście

### 2.3. 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.

$$s_i = \frac{y_i - Y_{pp}}{\Delta U}, \text{ dla } i = 1, \dots \quad (2.1)$$

$$s_i^z = \frac{y_i - Y_{pp}}{\Delta Z}, \text{ dla } i = 1, \dots \quad (2.2)$$

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.

$$\min E = \sum_{k=1}^{k_{\max}} (s(k) - y_{\text{apros}}(k))^2 \quad (2.3)$$

Przyjęto następujące ograniczenia parametrów:

$$0,001 \ll T_1 \ll 1000 \quad (2.4)$$

$$0,001 \ll T_2 \ll 1000 \quad (2.5)$$

$$-10 \ll K \ll 10 \quad (2.6)$$

$$0 \ll T_d \ll 500 \quad (2.7)$$

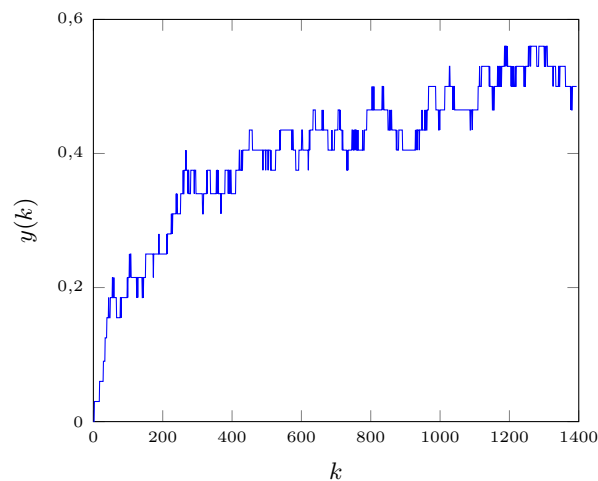
Optymalizacji dokonano wykorzystując funkcję `fmincon`, która znajduje minimum funkcji z uwzględnieniem ograniczeń. Jedynymi ograniczeniami są te, narzucone na argumenty wywołania funkcji celu, czyli na wyżej określone parametry. Kryteria zatrzymania algorytmu pozostawiono domyślne. Podsumowując, wynik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

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

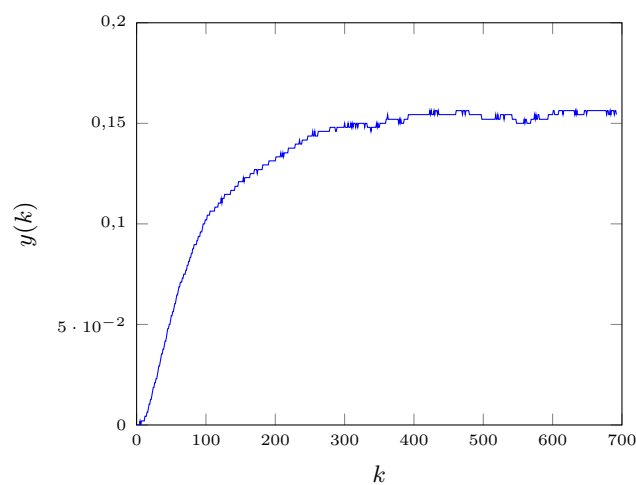
gdzie:

```
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
```

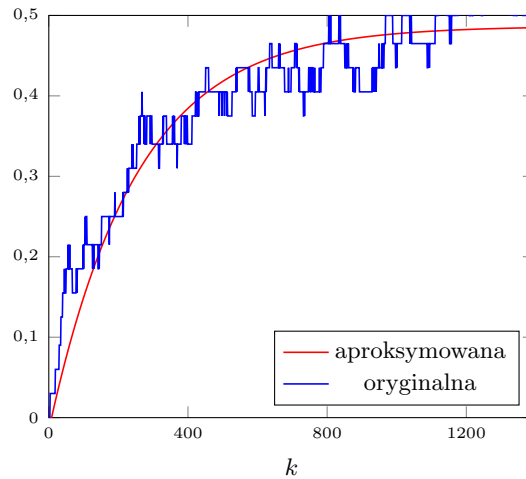
Wyznaczone parametry - tor sterowanie-wyjście:  $T_1 = 251,2387$ ,  $T_2 = 0,072366$ ,  $K = 0,48671$ ,  $T_d = 6$ ,  $E = 2,0984$ . Wyznaczone parametry - tor zakłócenie-wyjście:  $T_1 = 89,0529$ ,  $T_2 = 2,1074$ ,  $K = 0,15435$ ,  $T_d = 9$ ,  $E = 0,0030778$ .



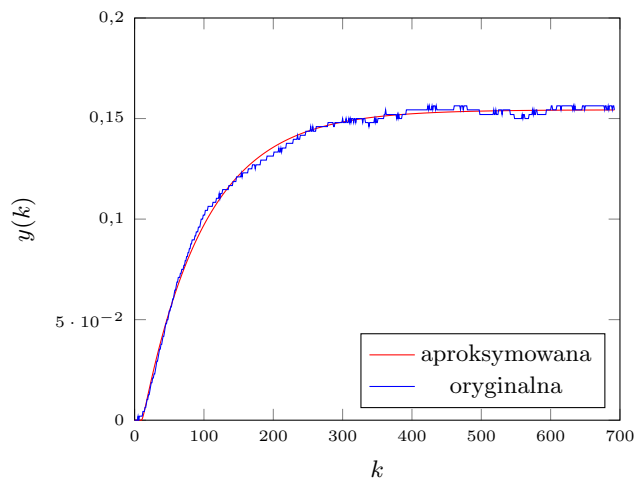
Rys. 2.3. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście wykorzystywana w algorytmie DMC



Rys. 2.4. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście wykorzystywana w algorytmie DMC



Rys. 2.5. Porównanie oryginalnej odpowiedzi skokowej toru wejście-wyjście z aproksymowaną



Rys. 2.6. Porównanie oryginalnej odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjście z aproksymowaną

## 2.4. Zadanie 4

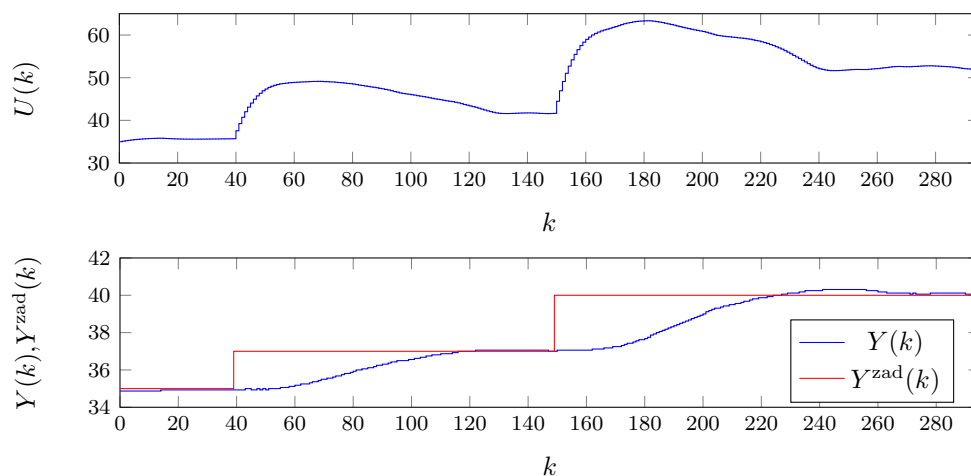
Implementacja i opis programu znajduje się w pliku DMC\_lab.m.

### 2.4.1. Dobór parametrów algorytmu DMC przy zerowym zakłóceniu

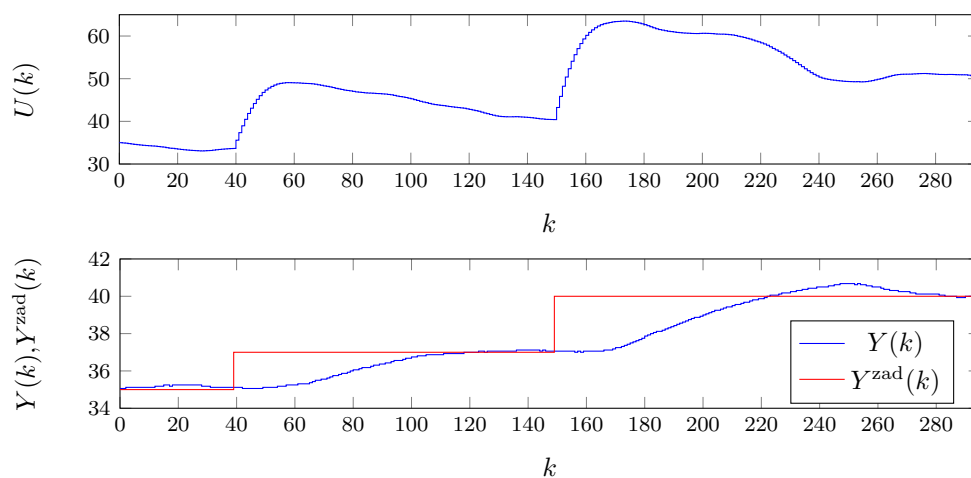
Eksperyment rozpoczęto od następujących parametrów:  $N = N_u = D = 1395$ ,  $\lambda = 1$  (Rys. 2.7).  $D$  przyjęto jako długość wektora pobranej odpowiedzi skokowej. Wartości horyzontów zmniejszono do 80 (Rys. 2.8). Wartość wskaźnika jakości udało się minimalnie zmniejszyć, jednak dalej jest ona zbyt duża. Układ działa wolno, występuje niezerowe przeregulowanie. Następnie eksperyment polegał na stopniowym zmniejszaniu horyzontu sterowania (Rys. 2.9). Wartość wskaźnika jakości zmniejszyła się o ok. 10%. Przy dalszym zmniejszaniu wartości horyzontu sterowania suma kwadratów uchybów rośnie (Rys. 2.10).

Największą zmianę przyniosła zmiana parametru  $\lambda$  – parametru kar za przyrosty sterowania. Jego zwiększenie powoduje jeszcze wolniejszą pracę układu regulacji (Rys. 2.11). Natomiast zmniejszenie znacznie przyspiesza reakcję układu na zmianę wartości zadanej (Rys. 2.12). Dalsze zmniejszenie parametru lambda przynosi jeszcze bardziej gwałtowne zmiany sterowania oraz zwiększenie oscylacji temperatury (Rys. 2.13). Wartość wskaźnika jakości jest mniejsza. Jednak

przy wyborze parametru  $\lambda$  istotne są zmiany sygnału sterowania, które mogą być niebezpieczne dla obiektu, gdy są zbyt gwałtowne. Dlatego zdecydowaliśmy się na wartość parametru  $\lambda = 1$ . Eksperyment zakończono wybierając następujące parametry algorytmu:  $N = 80, N_u = 25, \lambda = 1$ .

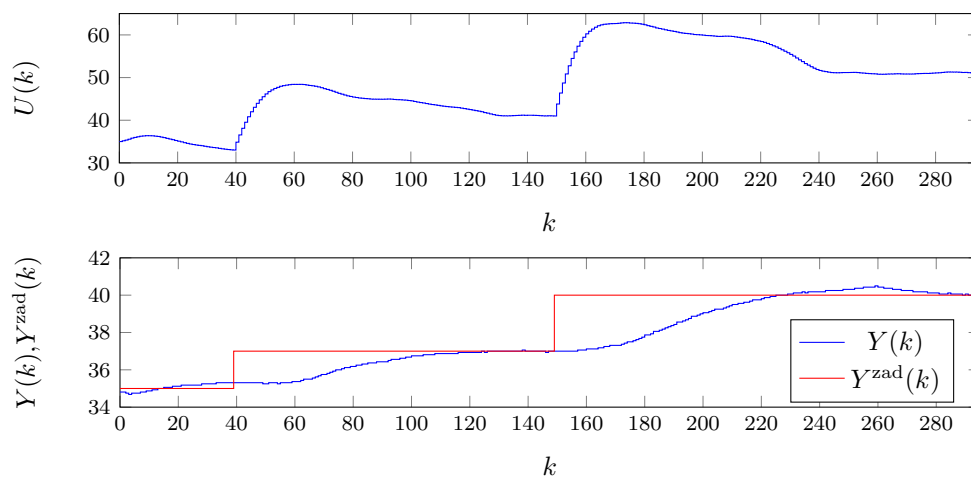


Rys. 2.7. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = N_u = D = 1395, \lambda = 1, E = 454$

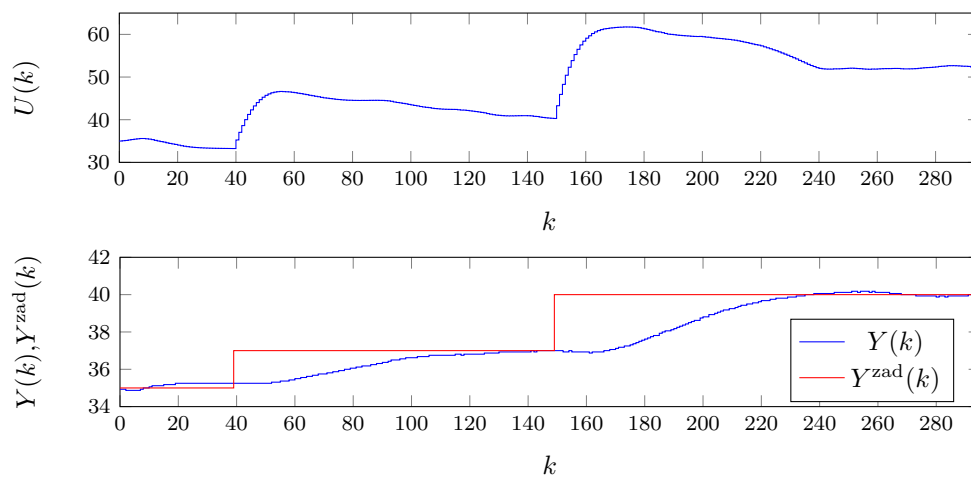


Rys. 2.8. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = N_u = 80, \lambda = 1, E = 440$

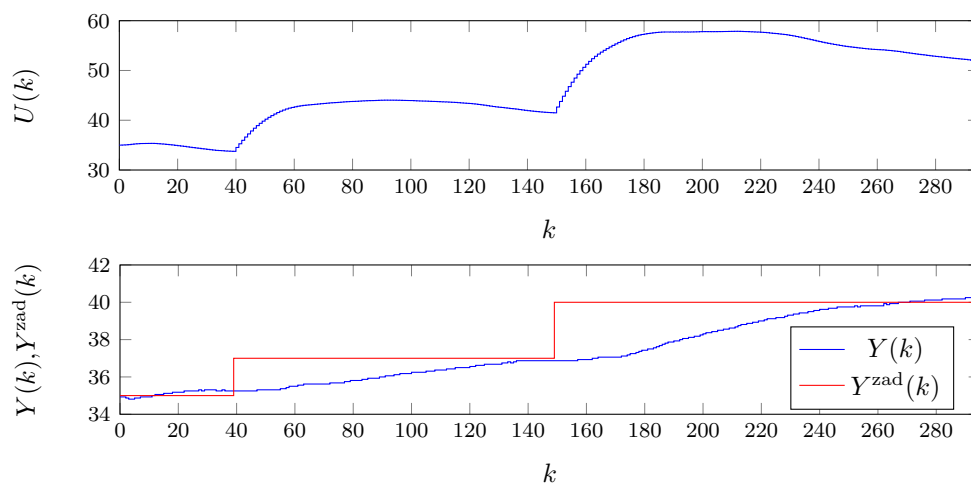




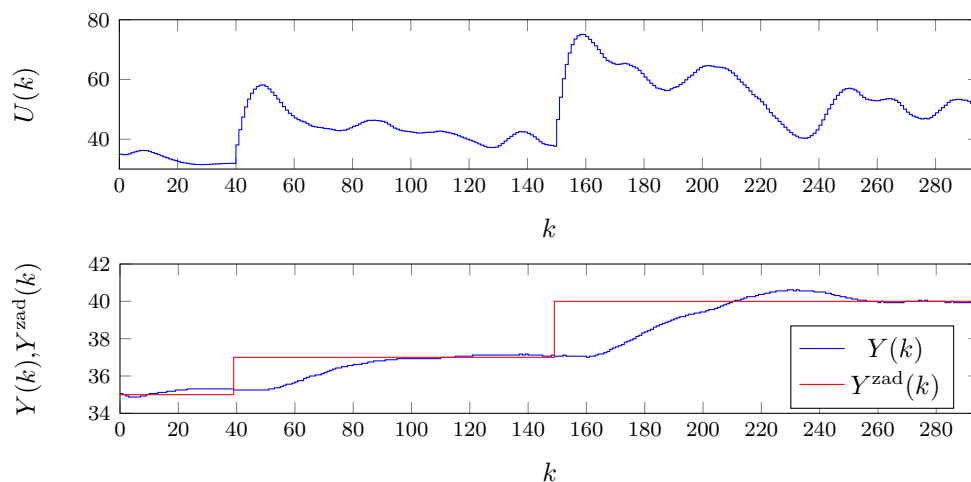
Rys. 2.9. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = 80, N_u = 25, \lambda = 1, E = 405$



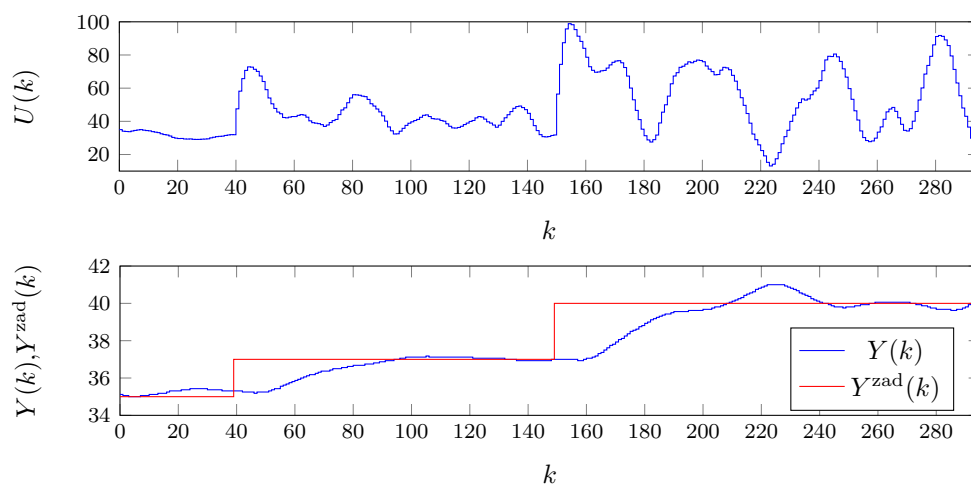
Rys. 2.10. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = 80, N_u = 10, \lambda = 1, E = 454$



Rys. 2.11. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = 80, N_u = 25, \lambda = 10, E = 543$



Rys. 2.12. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = 80, N_u = 25, \lambda = 0,1, E = 327$

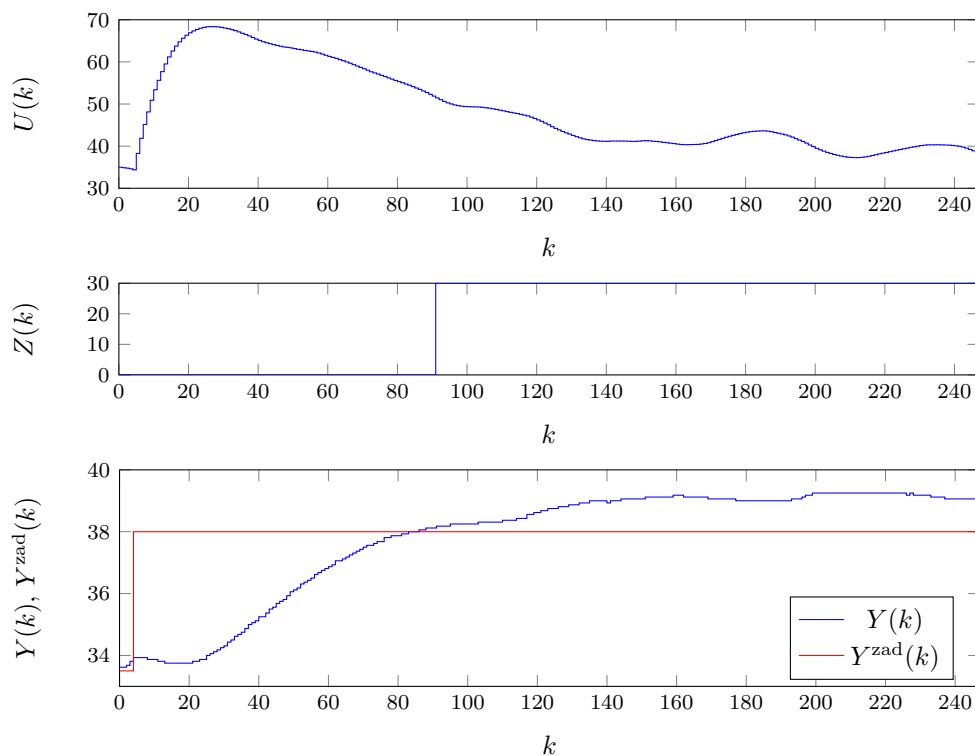


Rys. 2.13. Odpowiedź układu przy sterowaniu algorytmem DMC z parametrami  $N = 80, N_u = 25, \lambda = 0,01, E = 290$

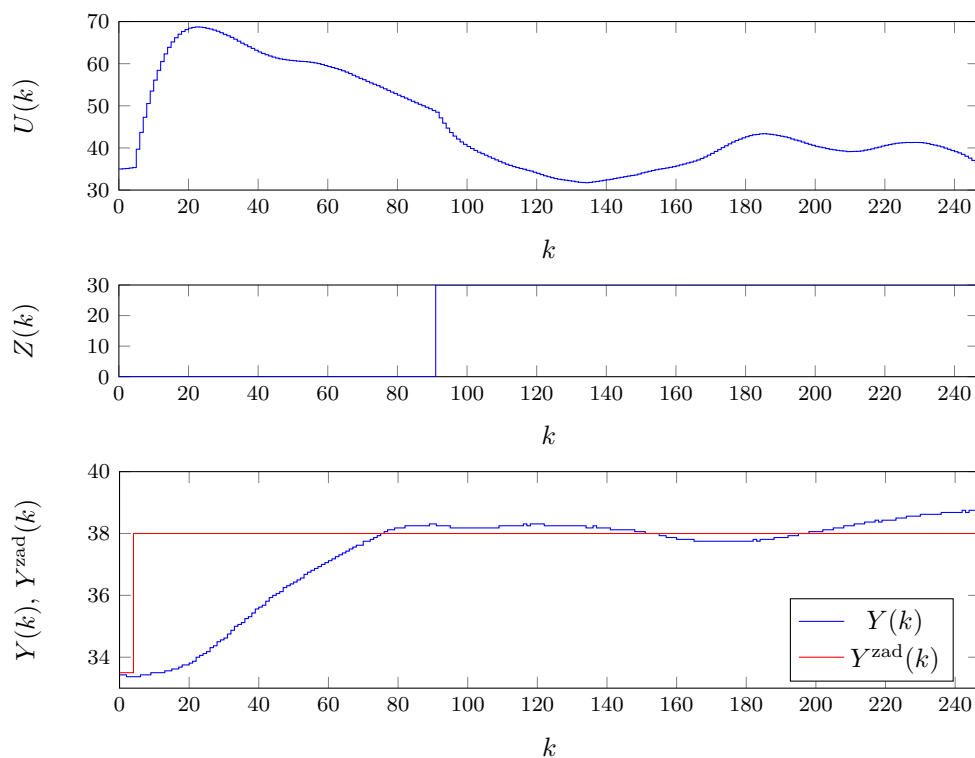
## 2.5. Zadanie 5

Parametr  $D^z$  jest wartością określającą liczbę kroków zakłóceń, które uwzględniamy. Dobrano go jako liczbę próbek, po której odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście wykorzystywana w algorytmie DMC stabilizuje się.  $D^z = 400$ .

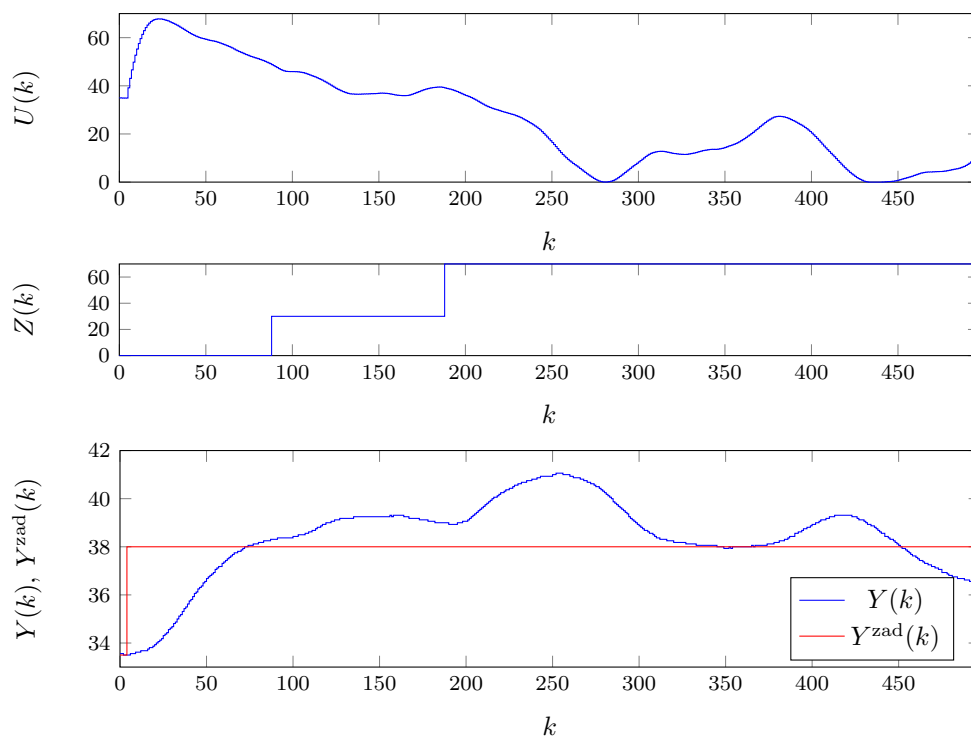
Następnie wykonano eksperymenty, w których po zmianie wartości zadanej i ustabilizowaniu się temperatury obiektu następują zmiany sygnałów zakłóceń. Zebrano wyniki dla trzech różnych trajektorii zakłóceń wykorzystując odpowiednio algorytm bez pomiaru zakłóceń i z pomiarem zakłóceń.



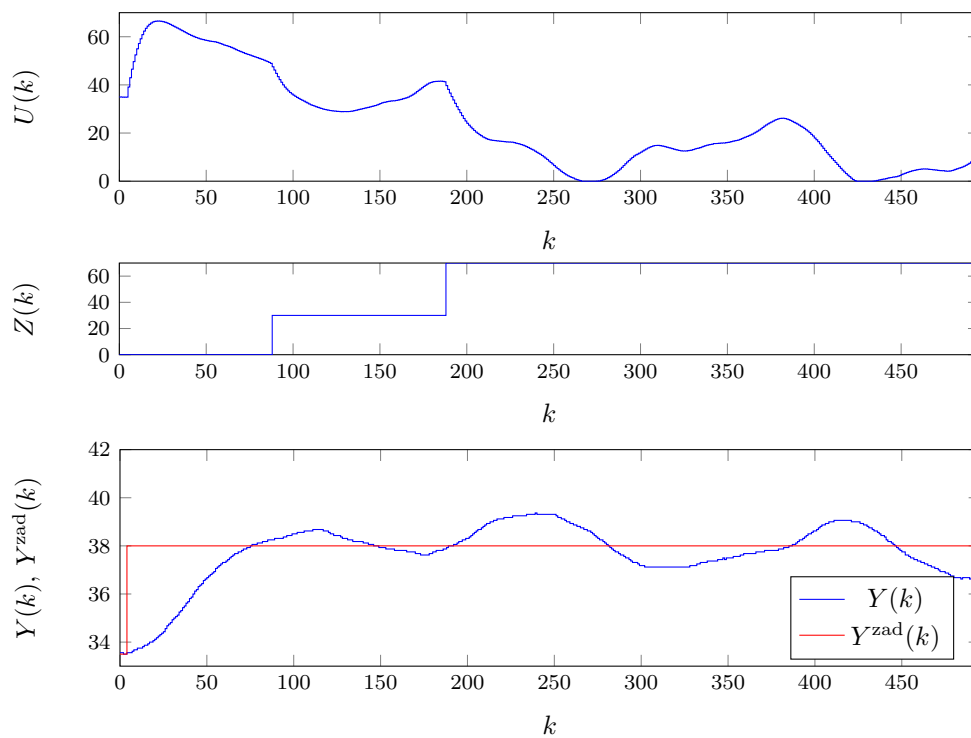
Rys. 2.14. Regulacja obiektu algorytmem DMC bez uwzględnienia pomiaru zakłóceń



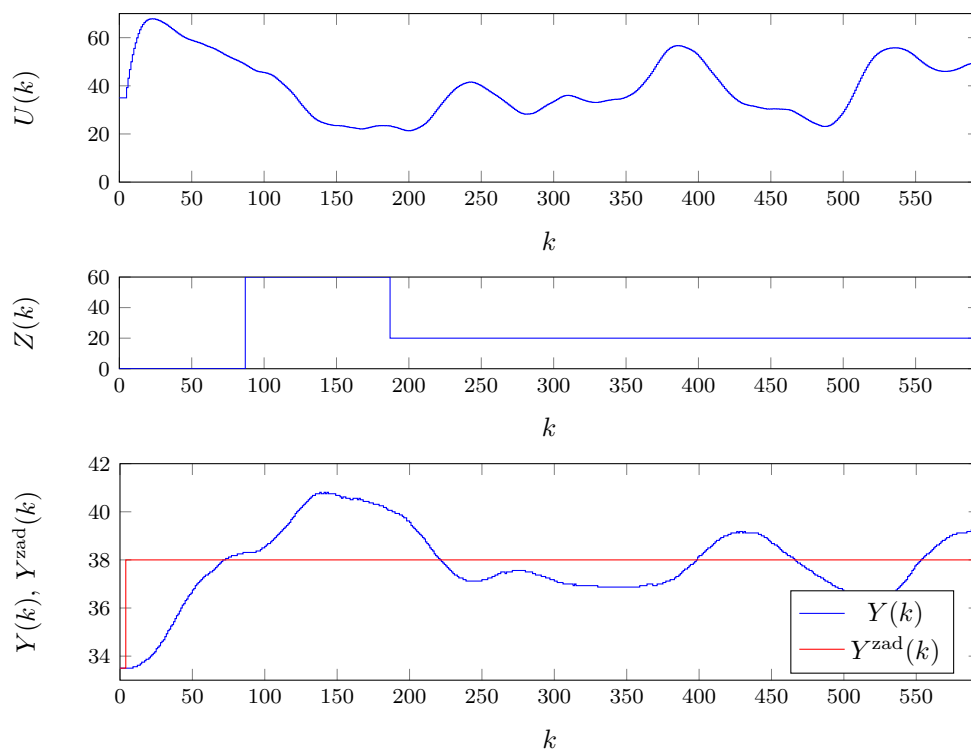
Rys. 2.15. Regulacja obiektu algorytmem DMC z uwzględnieniem pomiaru zakłóceń



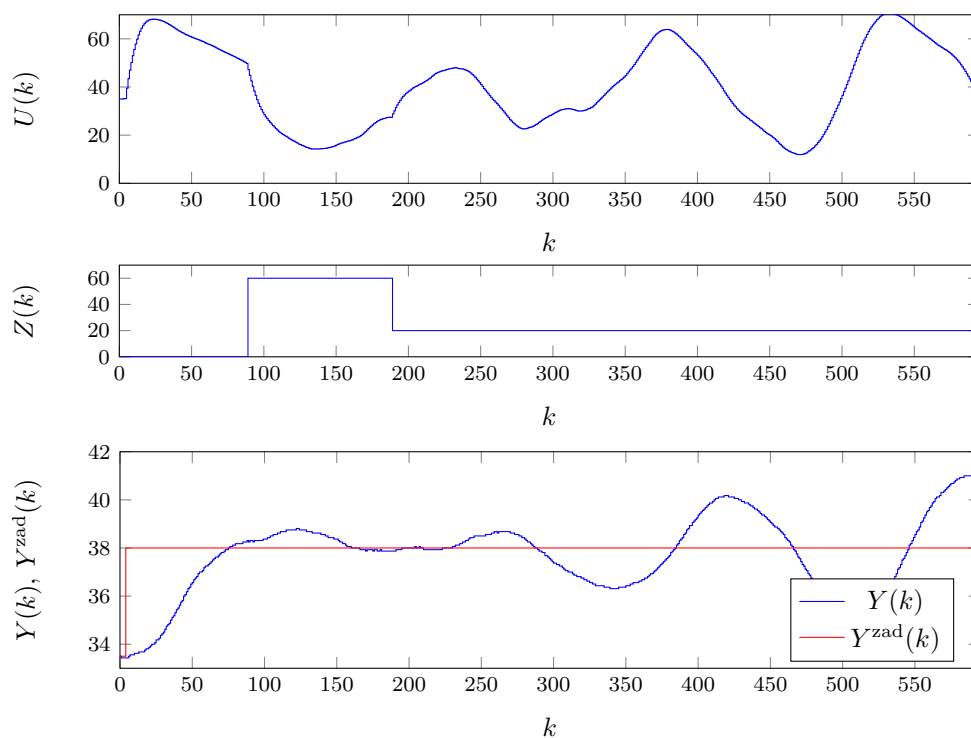
Rys. 2.16. Regulacja obiektu algorytmem DMC bez uwzględnienia pomiaru zakłóceń



Rys. 2.17. Regulacja obiektu algorytmem DMC z uwzględnieniem pomiaru zakłóceń



Rys. 2.18. Regulacja obiektu algorytmem DMC bez uwzględnienia pomiaru zakłóceń



Rys. 2.19. Regulacja obiektu algorytmem DMC z uwzględnieniem pomiaru zakłóceń

Uwzględnienie zakłóceń poprawiło działanie układu regulacji. Widać to szczególnie przy jednokrotnym skoku zakłócenia (*Rys. 2.15*). Układ szybko reaguje na zmianę zakłócenia, obniżając wartość sygnału sterowania. Pozwala to na utrzymanie temperatury zadanej mimo stałych zakłóceń. Natomiast przy braku uwzględnienia zakłóceń (*Rys. 2.14*) pojawia się uchyb - tempe-

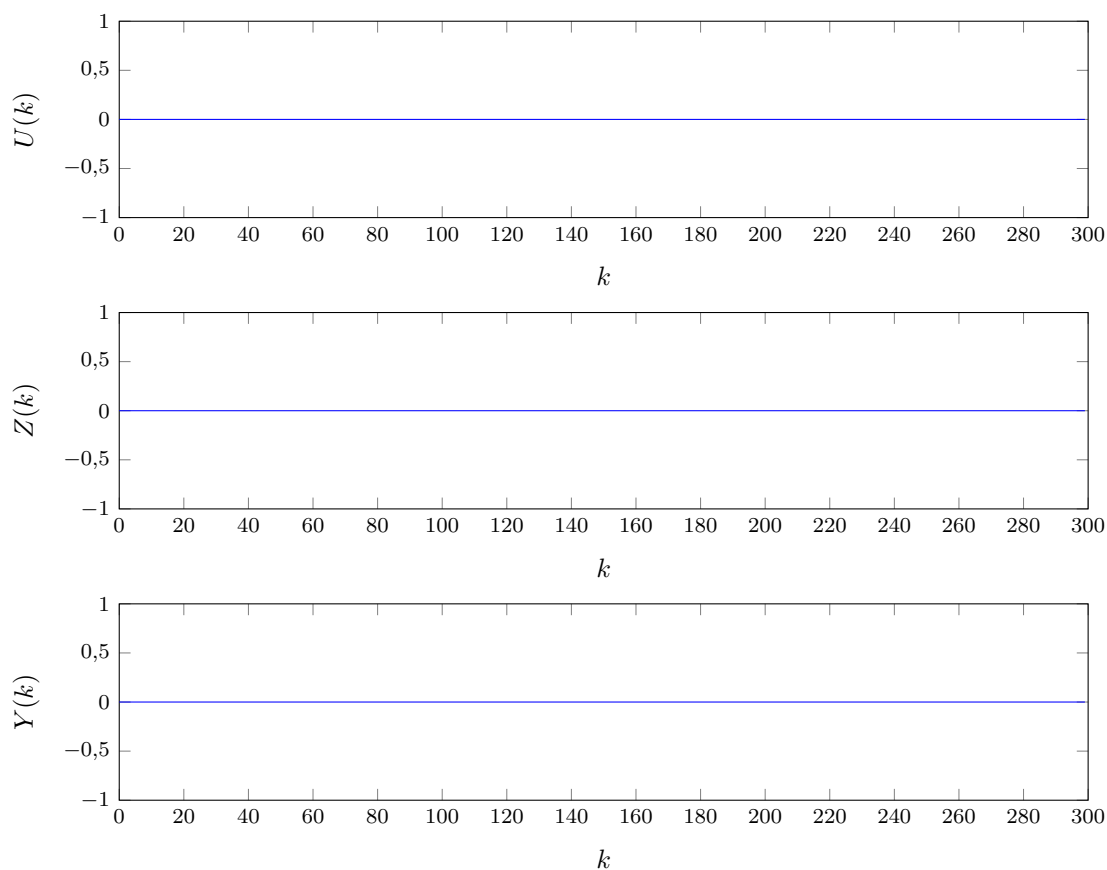
ratura odbiega od wartości zadanej po wystąpieniu zakłóceń. Dla kolejnych trajektorii zakłóceń - dwukrotnego skoku, układ działa gorzej. Kiedy jeszcze pierwszą zmianę zakłóceń udaje się w miarę skompensować (*Rys. 2.17, Rys. 2.19*), tak rozpoczynając z innego punktu pracy, zmiana zakłóceń prowadzi do destabilizacji układu. Oczywiście, algorytm bez uwzględnienia pomiaru zakłóceń także nie jest w stanie utrzymać wartości zadanej. Jednak jakość regulacji jest jeszcze mniejsza.

## 3. Projekt

### 3.1. 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. 3.1*).

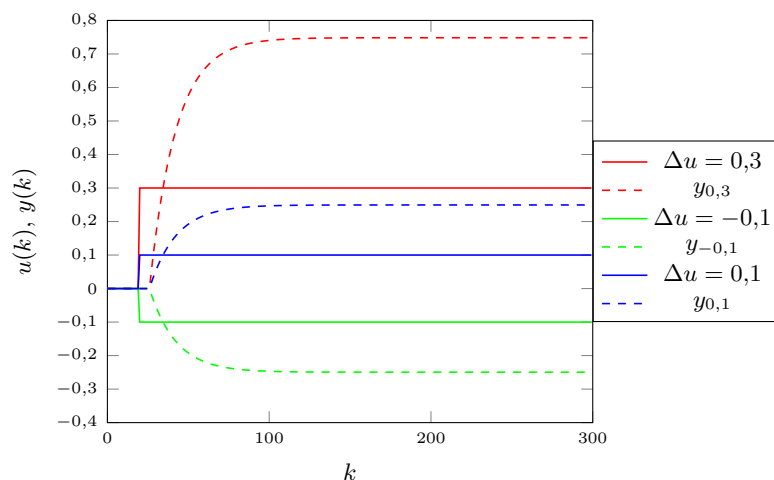


Rys. 3.1. Odpowiedź w punkcie pracy

### 3.2. Zadanie 2

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

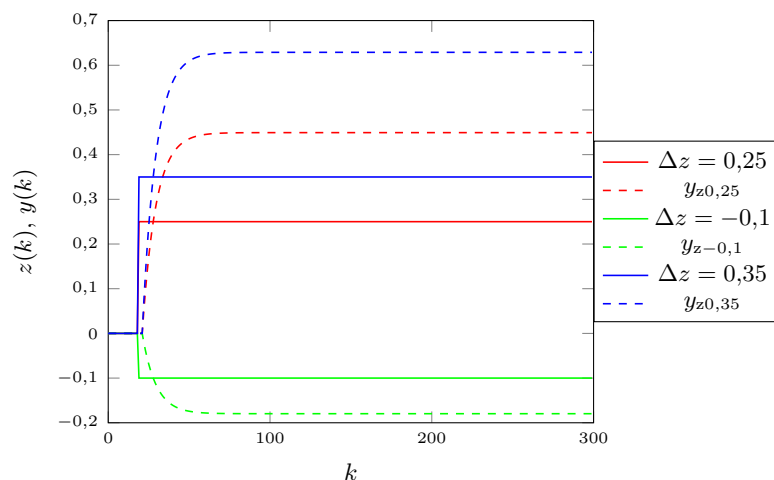
Wyznaczanie odpowiedzi rozpoczęliśmy z ustalonego w zadaniu punktu pracy przy zakłóceniu  $Z_{pp} = 0$ . Widoczne na rysunku *Rys. 3.2* odpowiedzi pokazują, że wartość wyjściowa rośnie wraz ze wzrostem wartości skoku.



Rys. 3.2. Odpowiedź procesu na skokową zmianę sygnału sterowania.

### 3.2.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie - wyjście

Odpowiedź skokową otrzymaliśmy pobudzając obiekt skokiem zakłócenia przy zerowych warunkach początkowych (Rys. 3.3). Podobnie jak przy pobudzeniu sterowaniem, wartość sygnału wyjściowego rośnie wraz z wartością skoku co potwierdza przypuszczenia o liniowości obiektu.

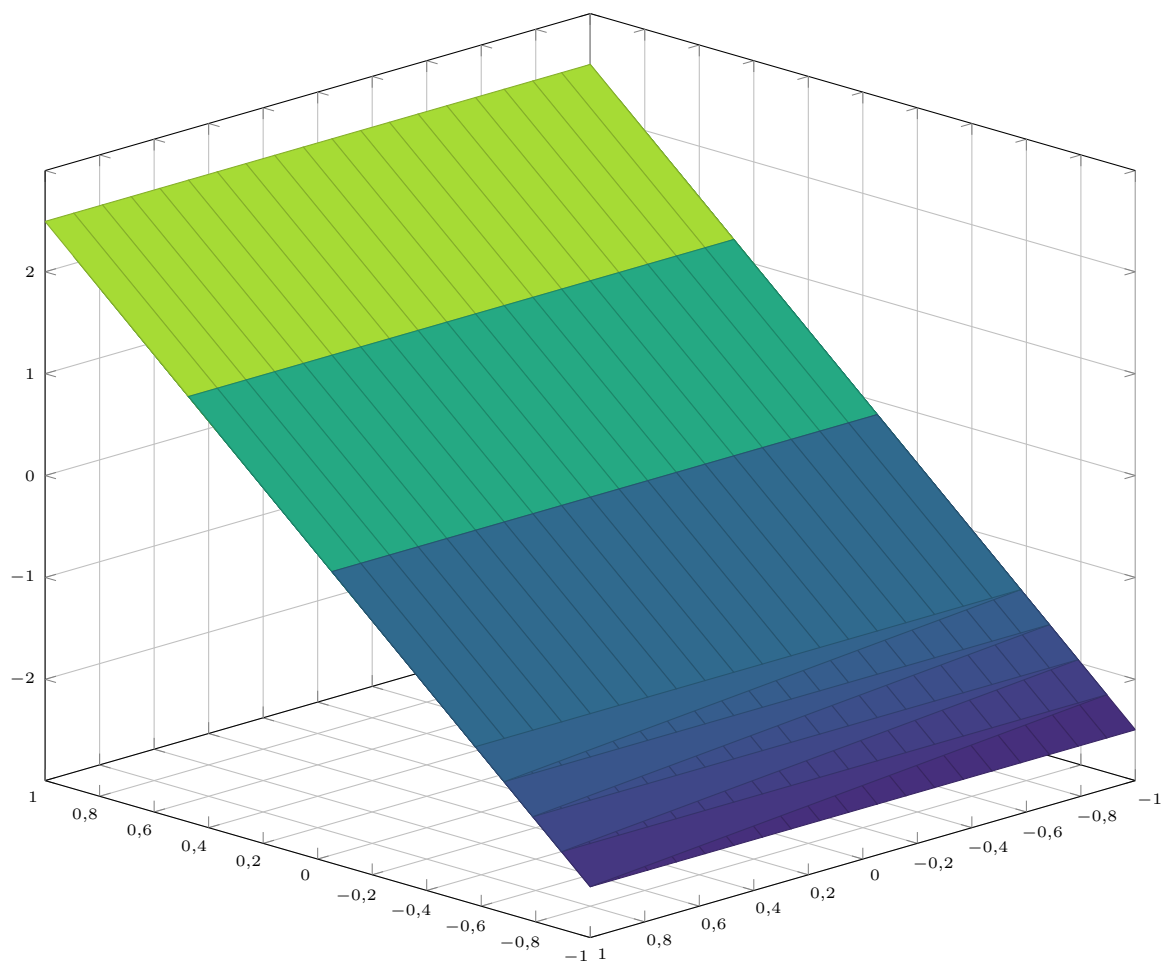


Rys. 3.3. Odpowiedź procesu na skokową zmianę sygnału zakłócenia.

### 3.2.3. 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. 3.4) przedstawia płaszczyznę co świadczy o tym, że obiekt jest liniowy.



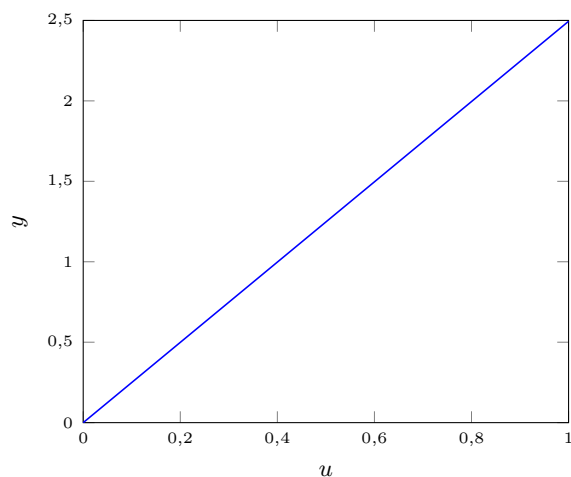
Rys. 3.4. Charakterystyka statyczna  $y(u, z)$ .

### 3.2.4. Wzmocnienie statyczne

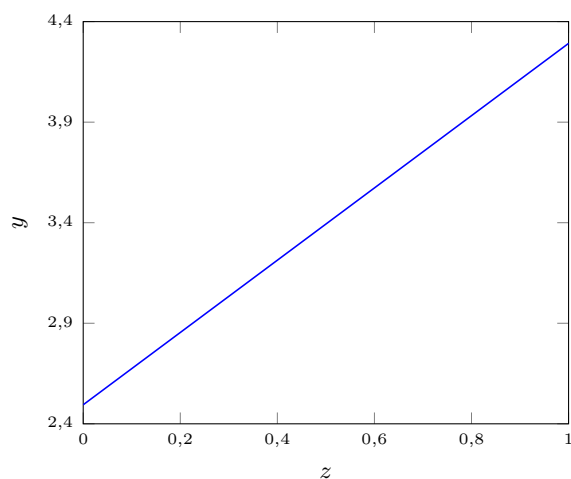
Eksperymenty przeprowadzone w poprzednim podpunkcie pozwalają określić wzmocnienie statyczne  $K_{\text{stat}}$ .

$$K_{\text{stat}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t) - Y_{\text{pp}}}{u_0 - U_{\text{pp}}} \quad (3.1)$$

Jest ono również równe tangensowi kąta nachylenia prostej do osi OX. Charakterystyki statyczne torów wejście-wyjście i zakłócenie-wyjście widoczne są na rysunkach *Rys. 3.5* i *Rys. 3.6* i wynoszą odpowiednio  $K_{\text{statU}} = 2,49$  oraz  $K_{\text{statZ}} = 1,79$ .



Rys. 3.5. Charakterystyka statyczna toru wejście-wyjście.

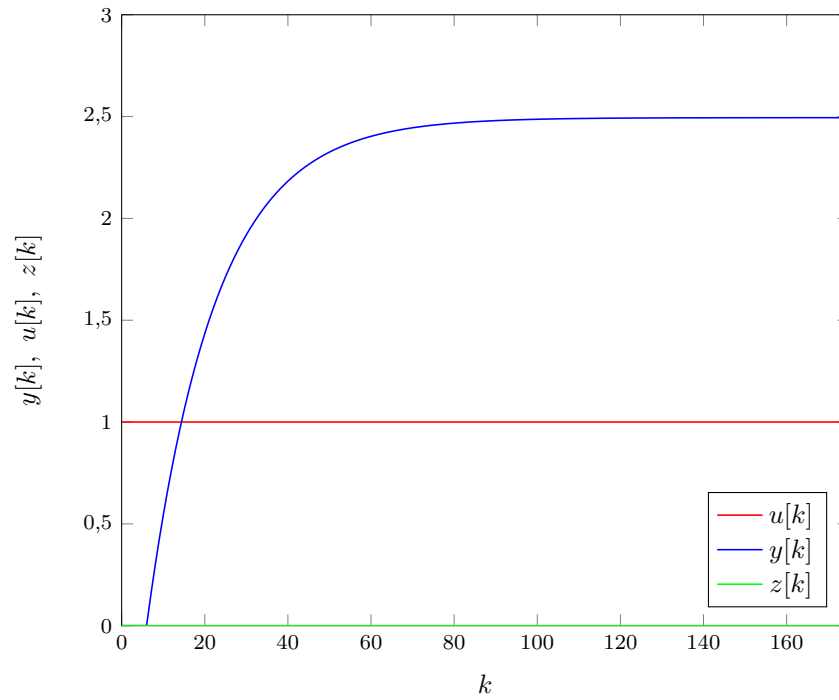


Rys. 3.6. Charakterystyka statyczna toru zakłócenie-wyjście.

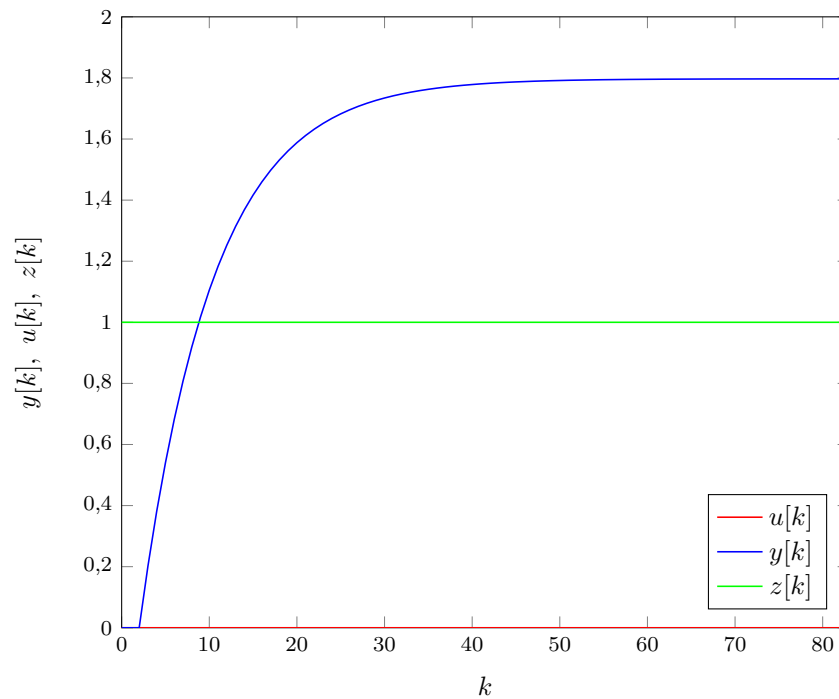
### 3.3. Zadanie 3

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  $D$  i  $D^z$  procesu. Odpowiedzi skokowe przedstawione są na rysunkach *Rys. 3.7* oraz *Rys. 3.8*.



Rys. 3.7. Znormalizowana odpowiedź skokowa toru wejście-wyście



Rys. 3.8. Znormalizowana odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyście

### 3.4. 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';

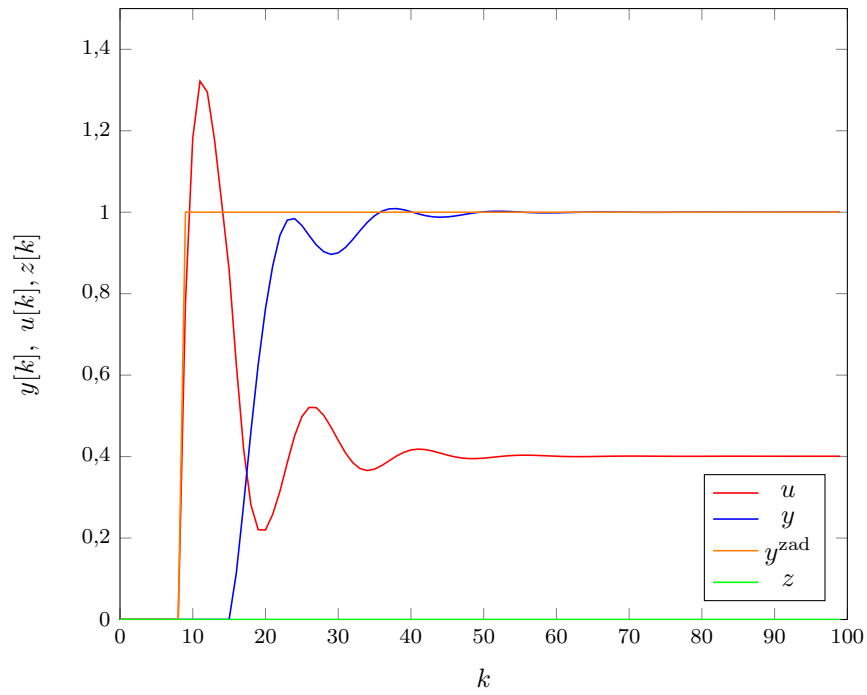
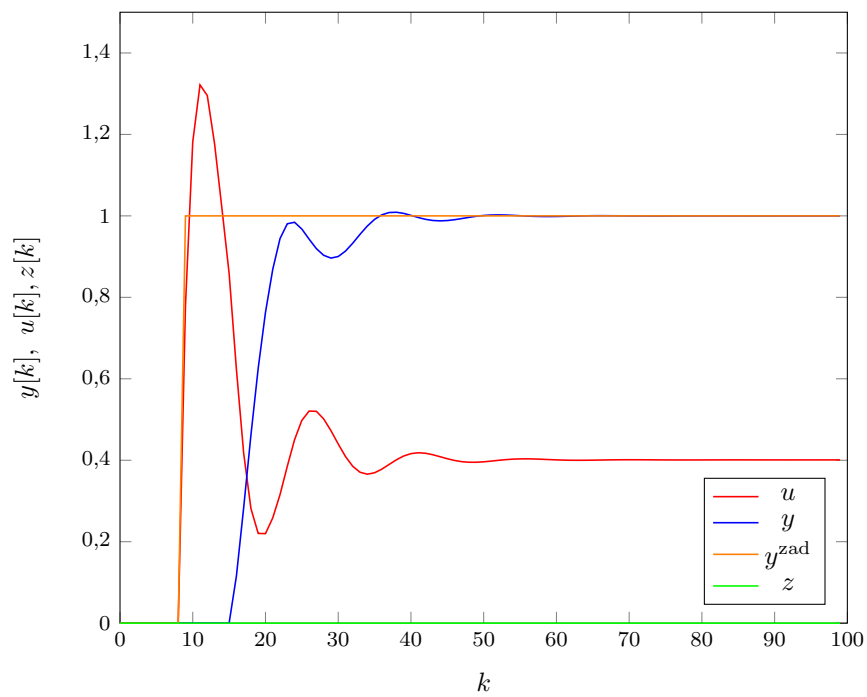
```

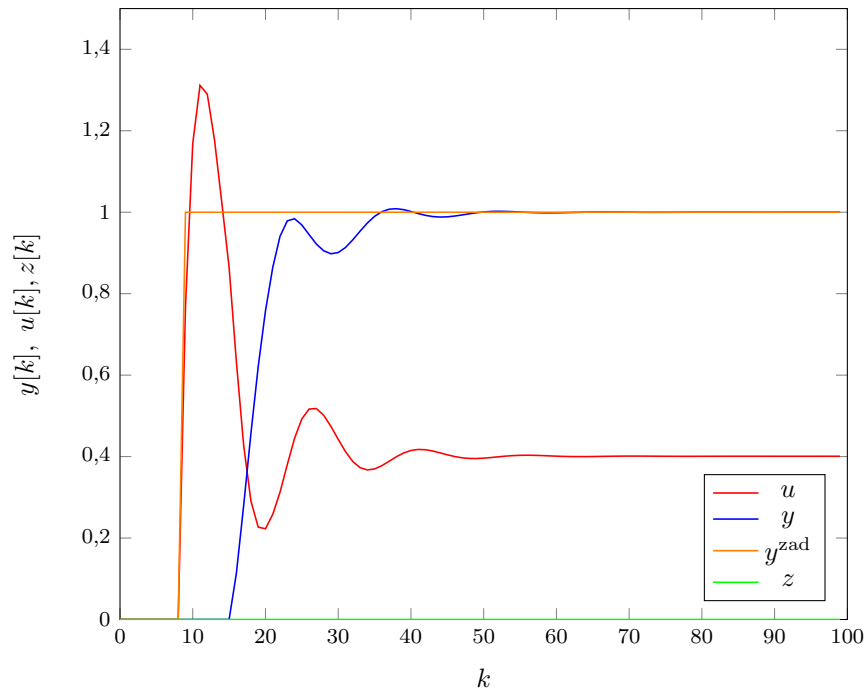
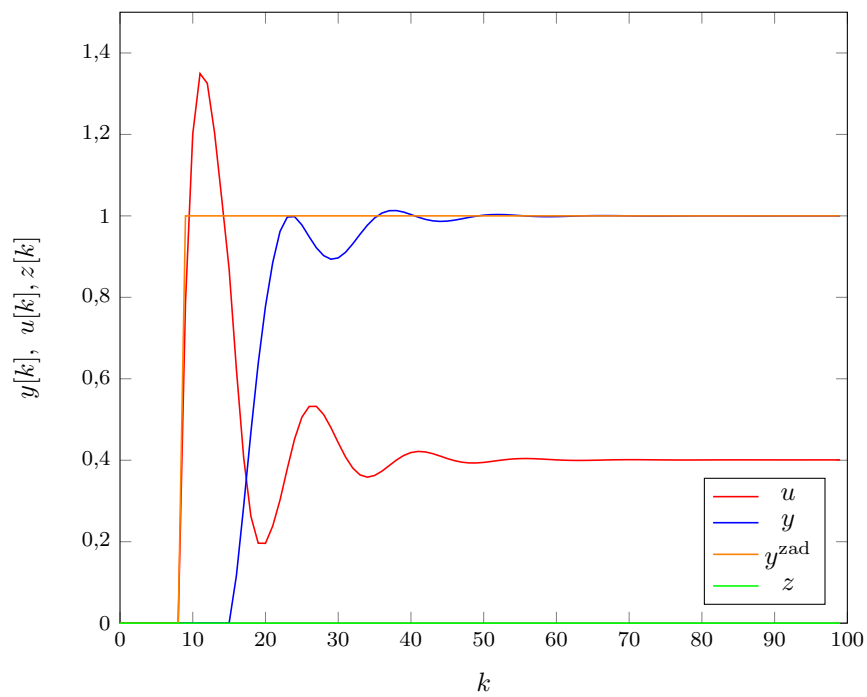
### 3.4.1. Strojenie regulatora DMC

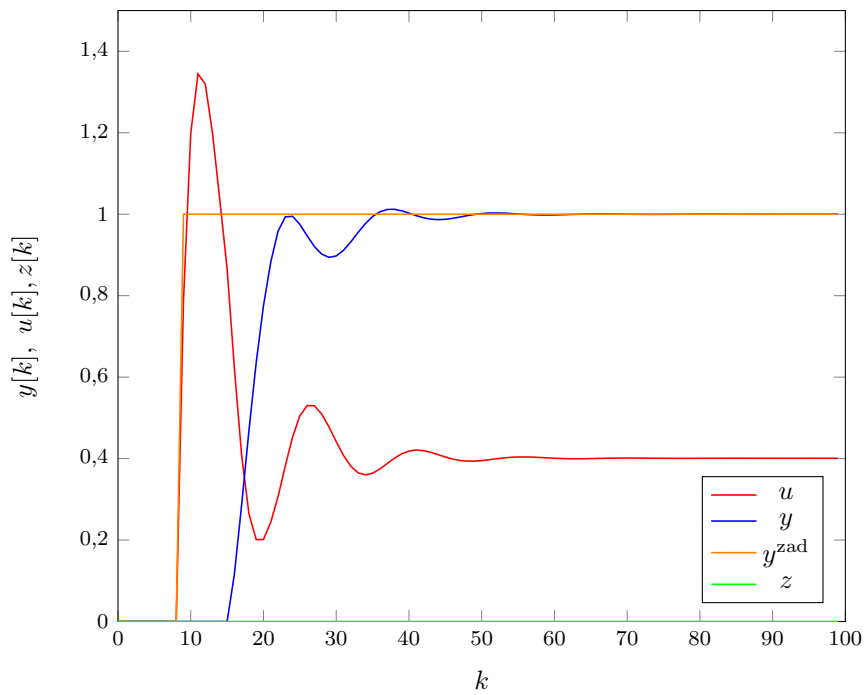
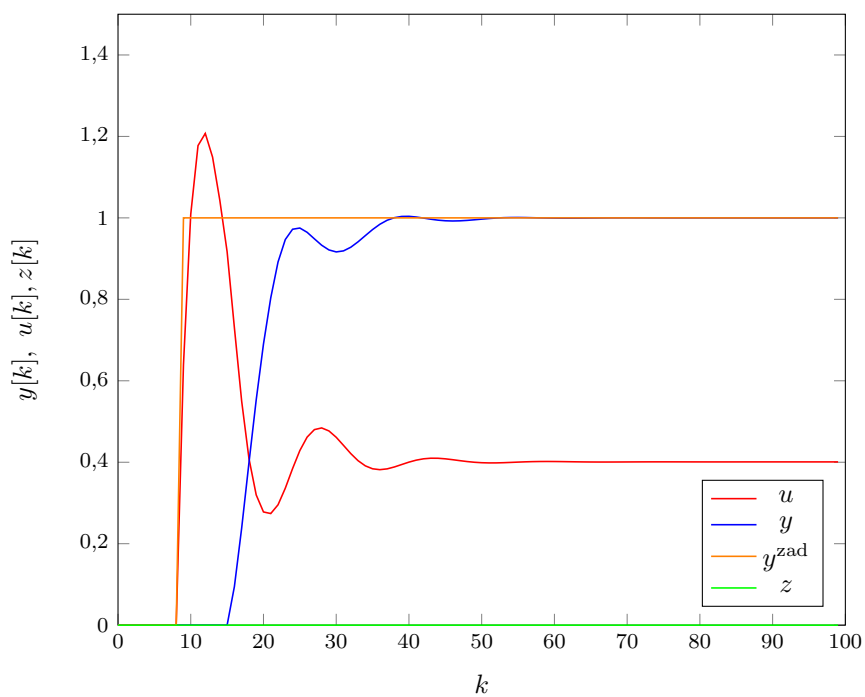
W celu dobrania odpowiednich nastaw regulatora DMC, wykonywaliśmy stały skok wartości zadanej z 0 na 1 w tej samej próbkę czasu podczas każdej symulacji. Przed skokiem układ za każdym razem był w stanie ustalonym. Na tym etapie wartość zakłócenia mierzalnego wynosiła 0 przez cały czas trwania symulacji, 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.

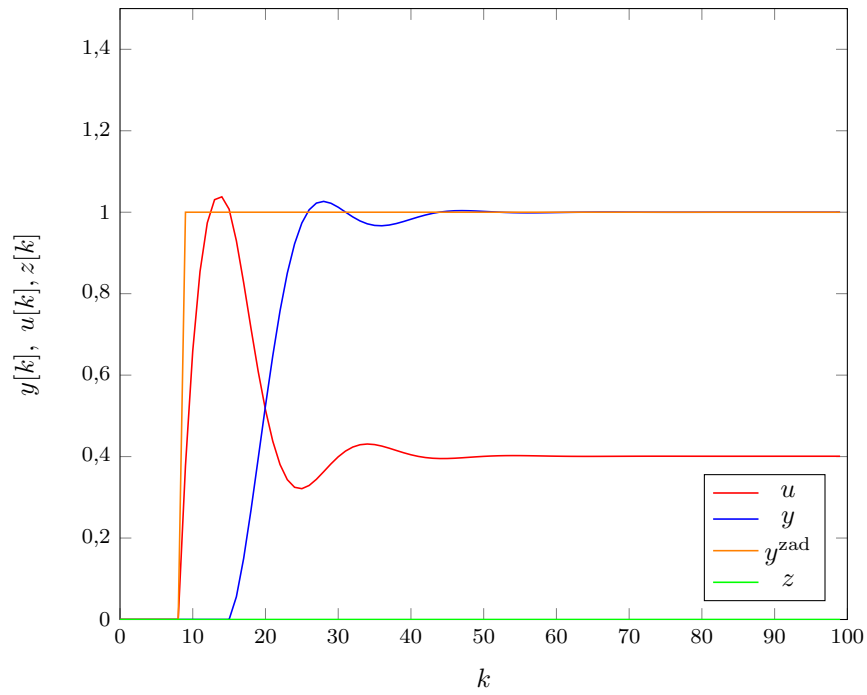
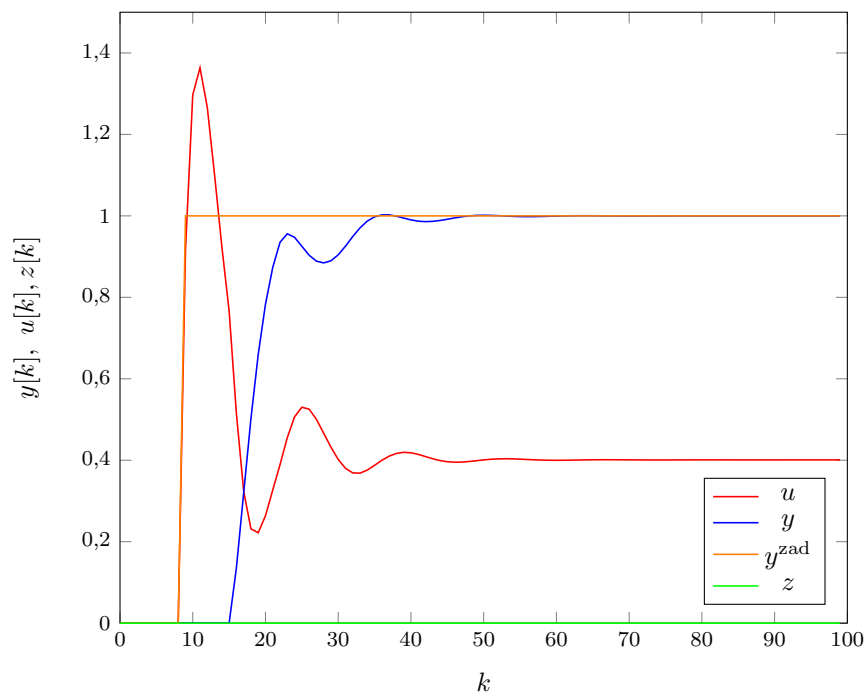
Parametr  $D$  ustawiliśmy na 175 (długość odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy). Pierwszym krokiem strojenia było przypisanie  $N_u = N$ ,  $\lambda = 1$  i stopniowe zmniejszanie parametru  $N$  zaczynając od wielkości  $D$  (Rys. 3.9). Regulator zaczął działać minimalnie gorzej dla  $N = 13$  (Rys. 3.12). 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. 3.13). 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. 3.14–Rys. 3.17). Przyjęliśmy zatem  $\lambda = 1$  jako optymalną wartość parametru (Rys. 3.18).

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. 3.19). 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. 3.9 - Rys. 3.15.

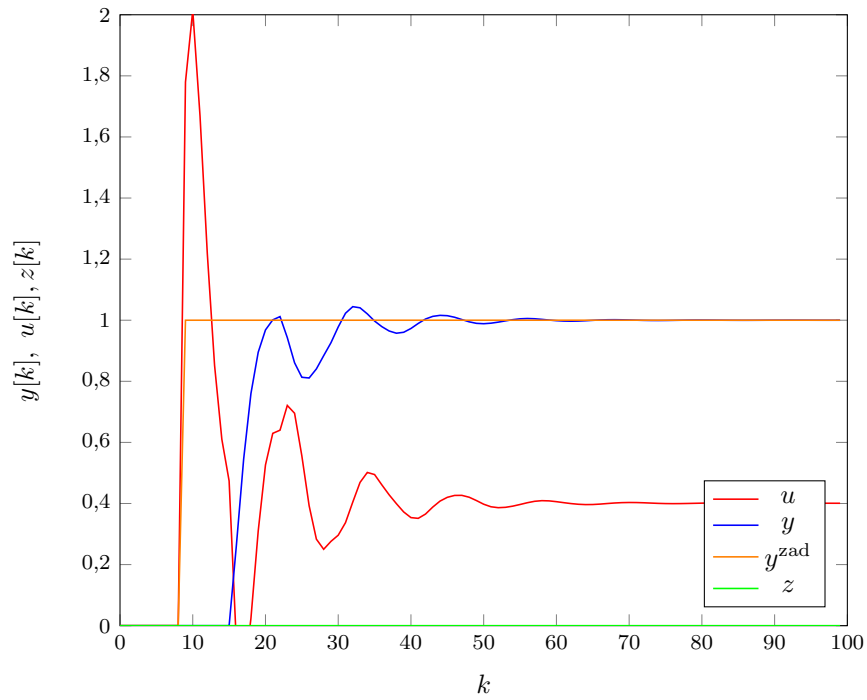
Rys. 3.9. Regulator DMC:  $D = 175, N = 175, N_u = 175, \lambda = 1, E = 8,8594$ Rys. 3.10. Regulator DMC:  $D = 175, N = 25, N_u = 25, \lambda = 1, E = 8,8594$

Rys. 3.11. Regulator DMC:  $D = 175, N = 17, N_u = 17, \lambda = 1, E = 8,8792$ Rys. 3.12. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 13, \lambda = 1, E = 8,8229$

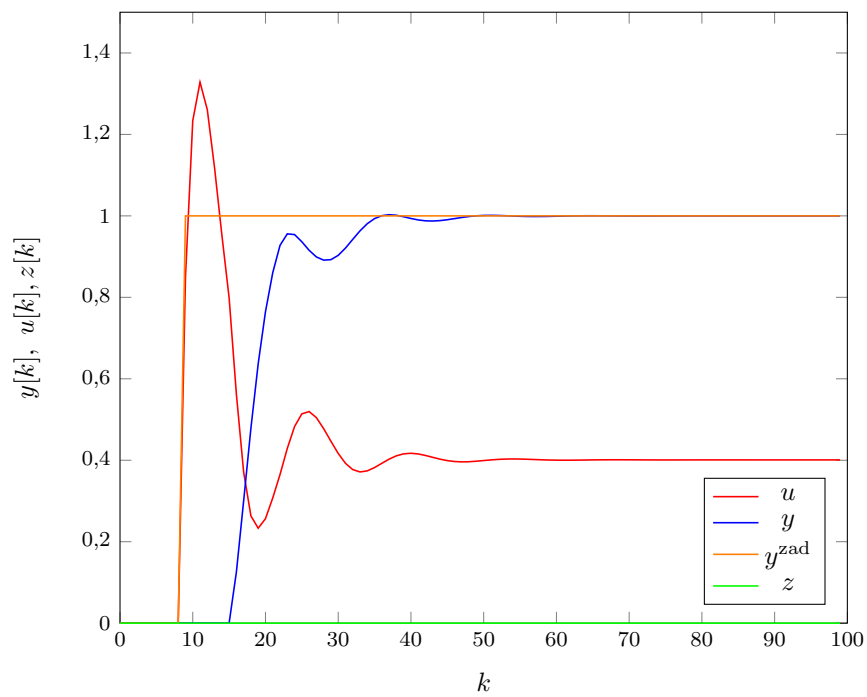
Rys. 3.13. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 4, \lambda = 1, E = 8,8275$ Rys. 3.14. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 2, E = 9,1525$

Rys. 3.15. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 5, E = 9,962$ Rys. 3.16. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 0,8, E = 8,7189$

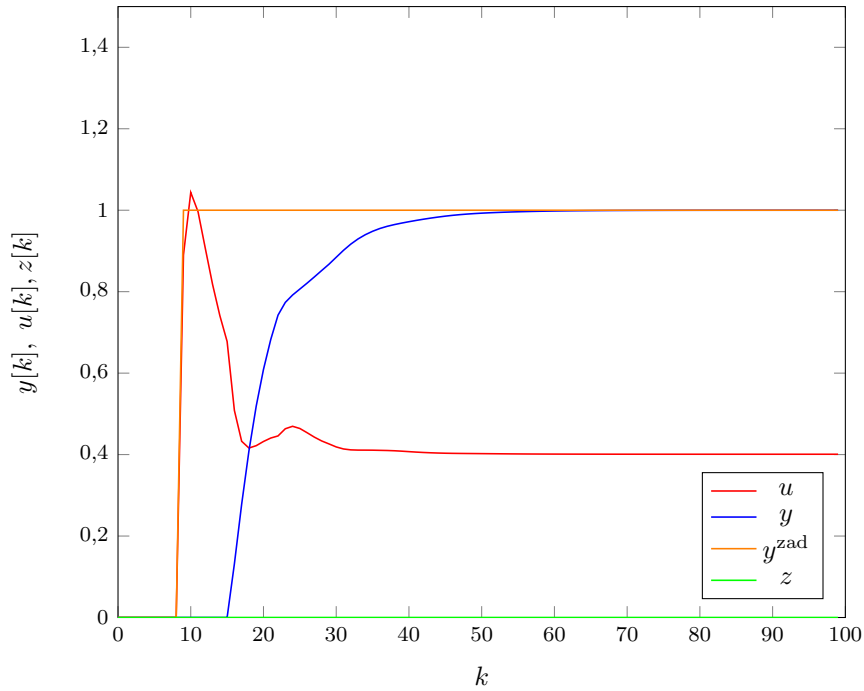




Rys. 3.17. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 0,1, E = 7,9691$



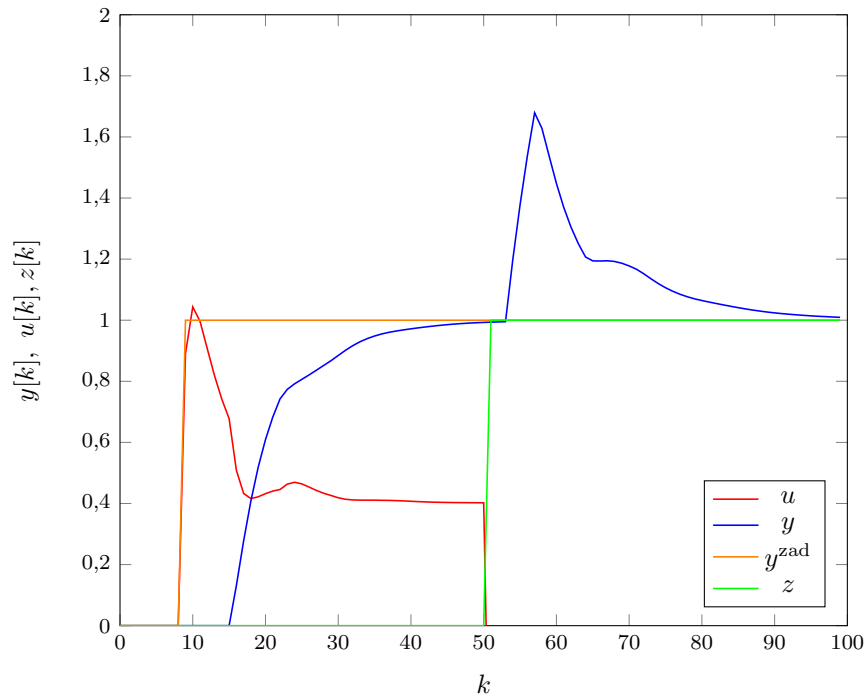
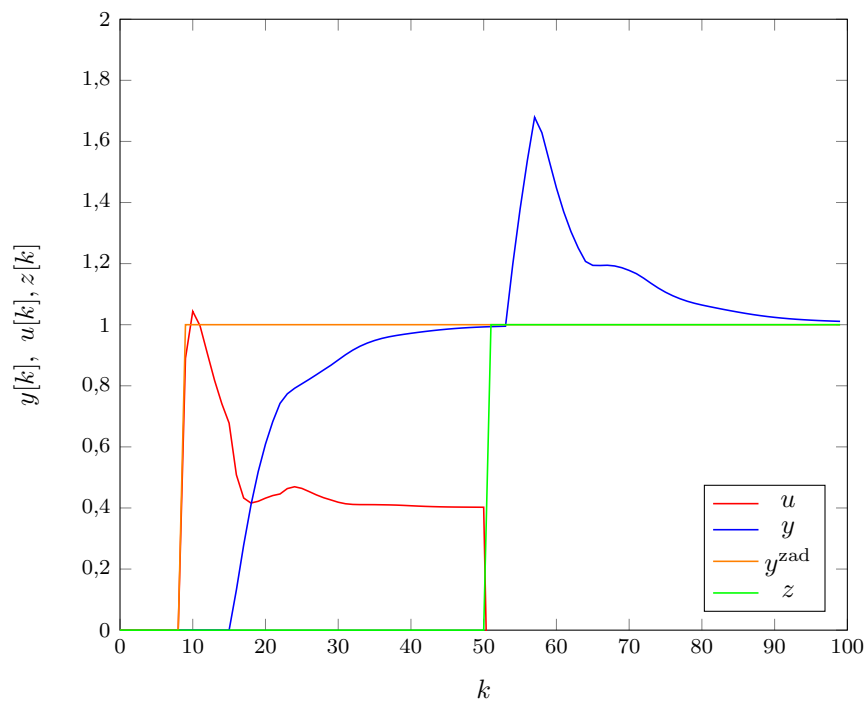
Rys. 3.18. Regulator DMC:  $D = 175, N = 13, N_u = 2, \lambda = 1, E = 8,8069$

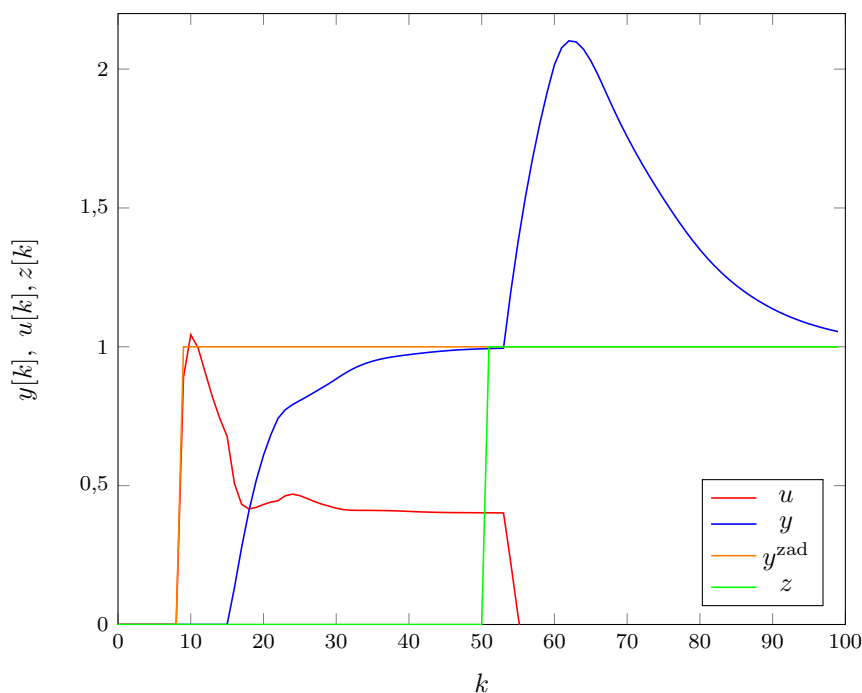


Rys. 3.19. Regulator DMC:  $D = 175, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 9,4566$

### 3.5. Zadanie 5

Najlepszy regulator z poprzedniego zadania ( $N = 17, N_u = 1, \lambda = 2$ ) przetestowaliśmy z włączonym członem uwzględniającym pomiar zakłócenia mierzanego. 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 skok jednostkowy zakłócenia - Rys. 3.20). 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. 3.21). Porównaliśmy również działanie regulatora uwzględniającego pomiar zakłócenia z regulatorem z zadania 4 z wyłączonym członem reagującym na zmianę zakłócenia (Rys. 3.22). 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. 3.20. Regulator DMC:  $D = 175, D^z = 83, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 11,9702$ Rys. 3.21. Regulator DMC:  $D = 175, D^z = 50, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 11,9704$

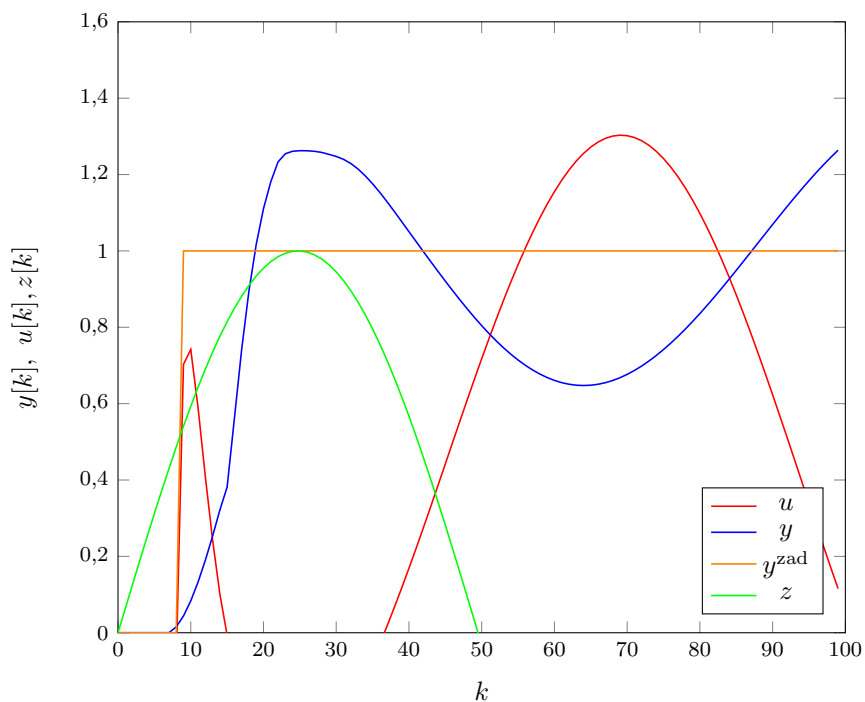


Rys. 3.22. Regulator DMC:  $D = 175, N = 17, N_u = 1, \lambda = 2, E = 25,8762$

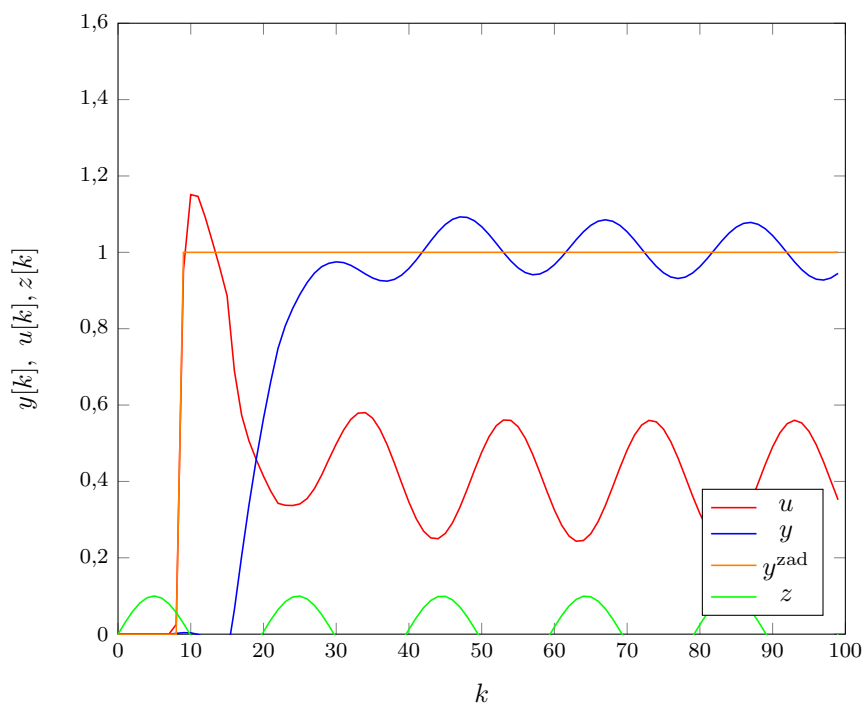
### 3.6. Zadanie 6

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. 3.23 – Rys. 3.25). Pomimo pomiaru zakłóceń, układ wpada w niekończące się 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. 3.26 – Rys. 3.28).

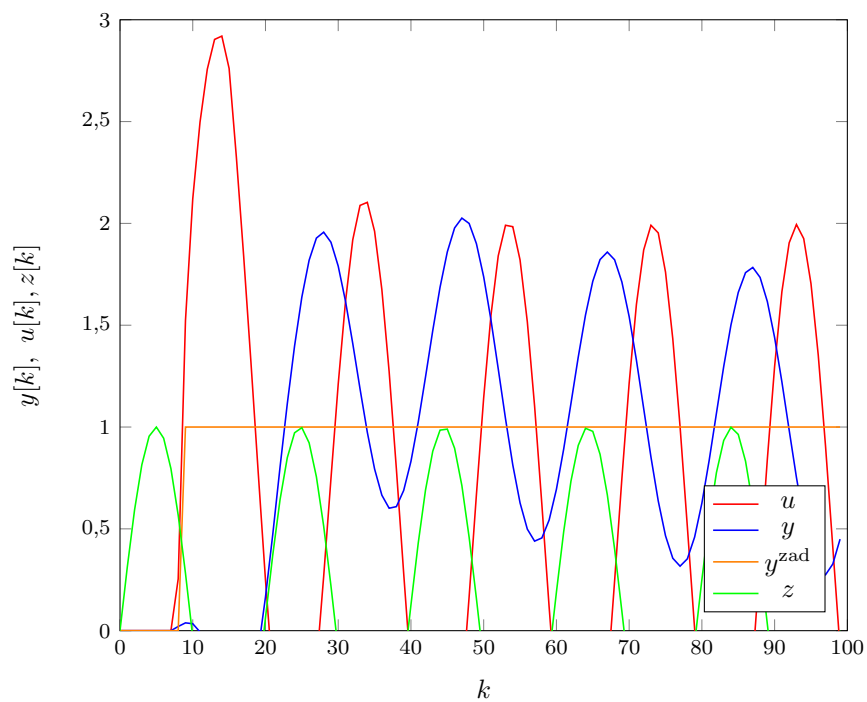
Podsumowując: nawet regulator uwzględniający zakłócenia nie jest w stanie zniwelować sinusoidalnego sygnału zakłóceń, chyba że byłby to sygnał o bardzo małym okresie.



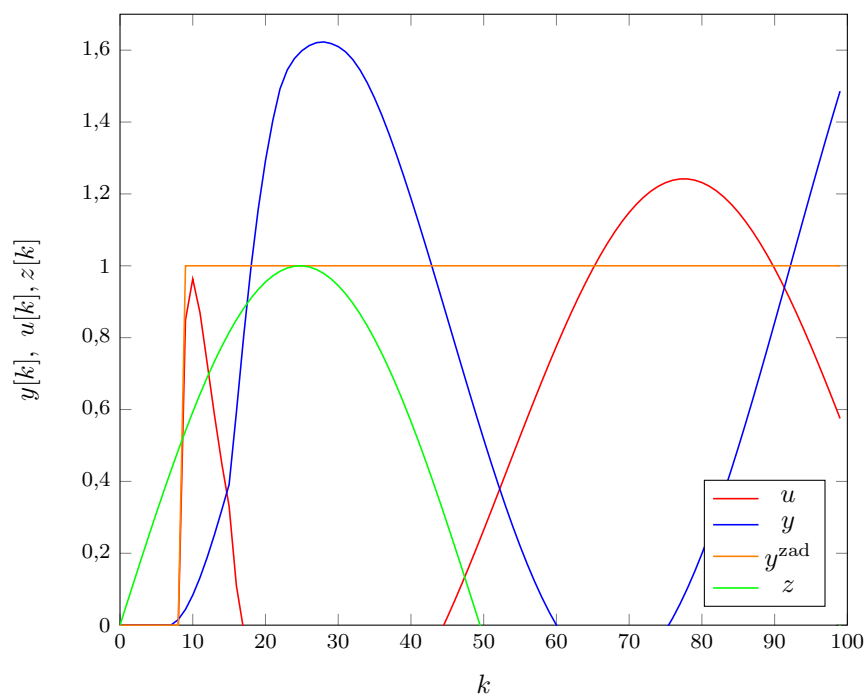
Rys. 3.23. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń:  $f = 6,2832, K = 1, E = 8,9114$



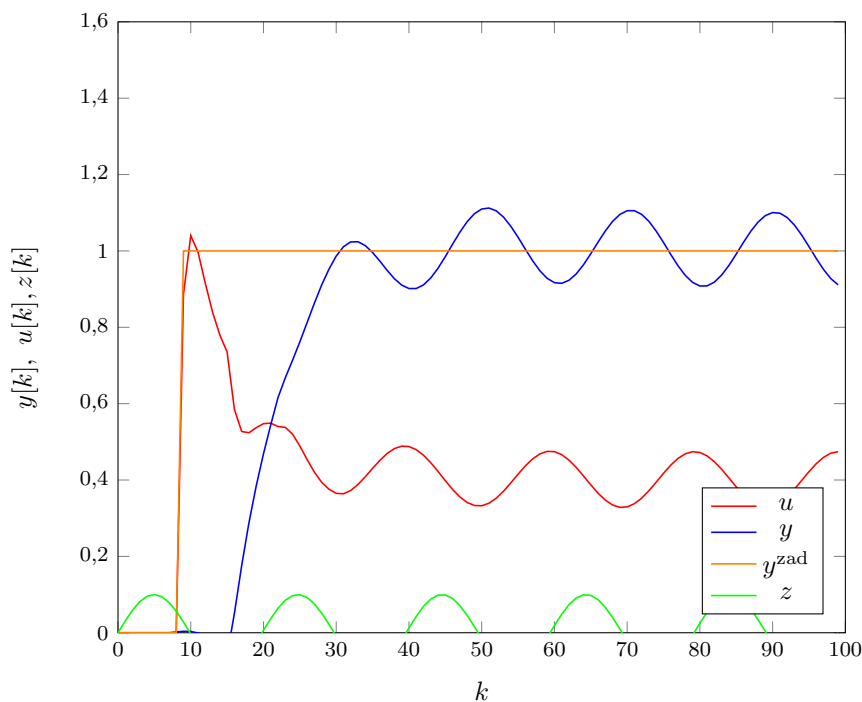
Rys. 3.24. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń:  $f = 31,4159, K = 0,1, E = 10,1471$



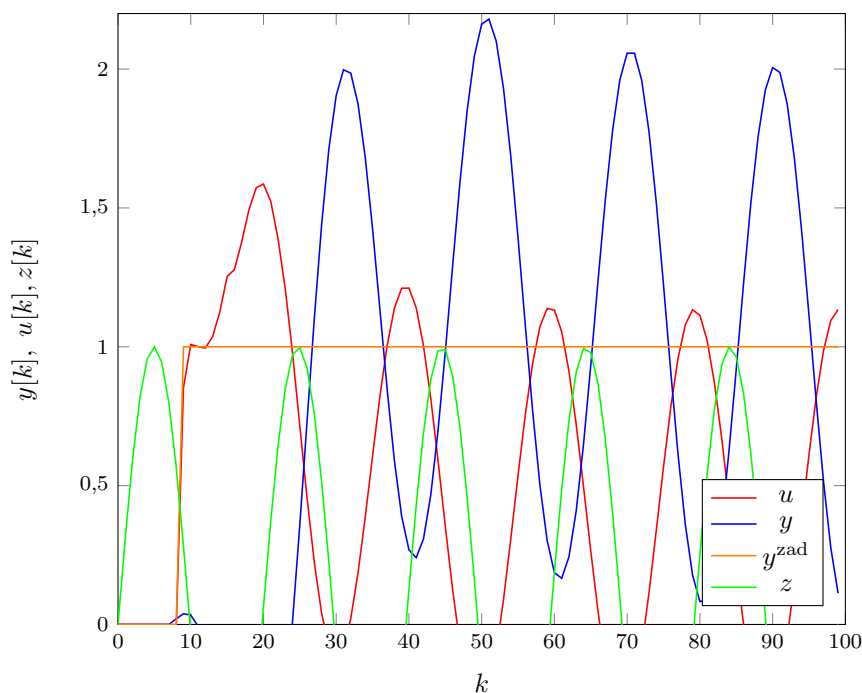
Rys. 3.25. Regulator DMC z pomiarem zakłóceń:  $f = 6,2832$ ,  $K = 1$ ,  $E = 8,9114$



Rys. 3.26. Regulator DMC bez pomiaru zakłóceń:  $f = 6,2832$ ,  $K = 1$ ,  $E = 42,4819$



Rys. 3.27. Regulator DMC bez pomiaru zakłóceń:  $f = 31,4159$ ,  $K = 0,1$ ,  $E = 10,9901$

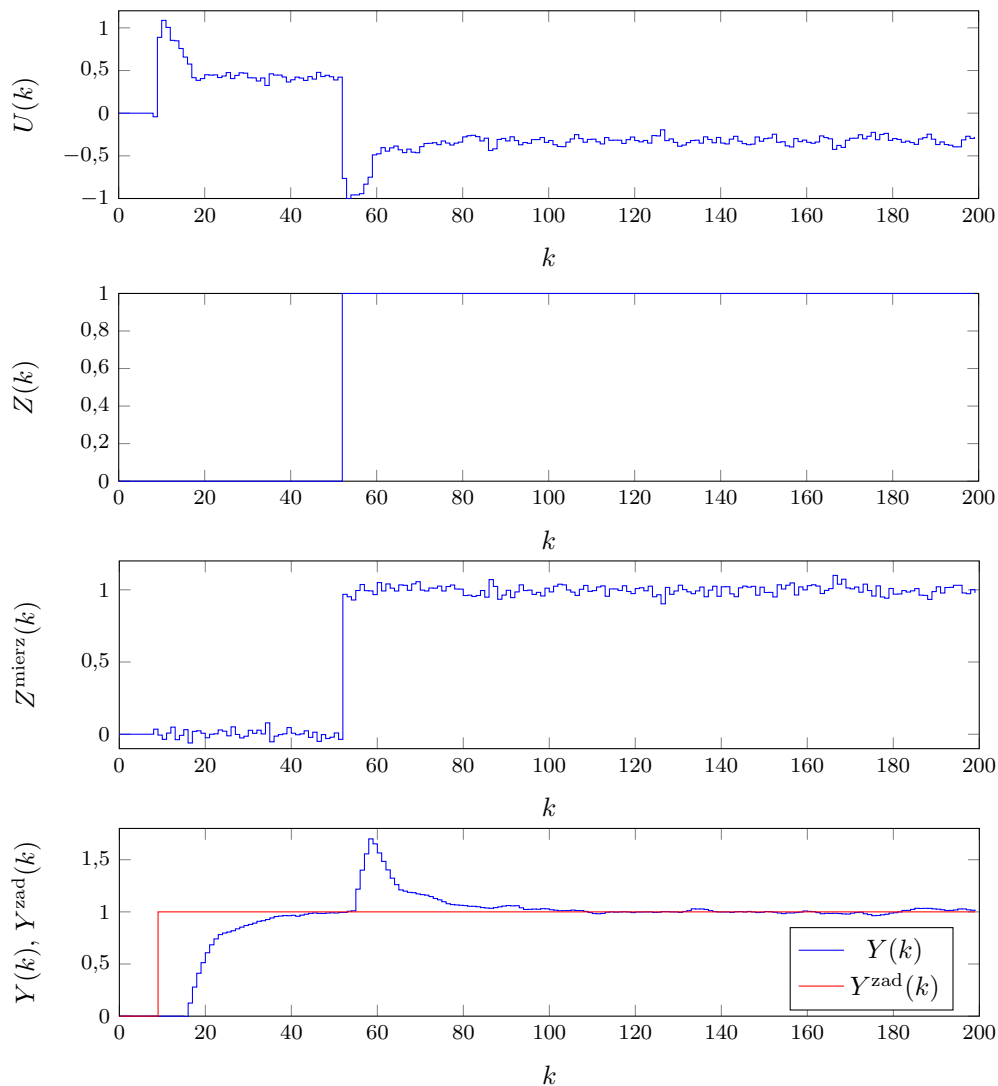


Rys. 3.28. Regulator DMC bez pomiaru zakłóceń:  $f = 31,4159$ ,  $K = 1$ ,  $E = 69,1634$

### 3.7. Zadanie 7

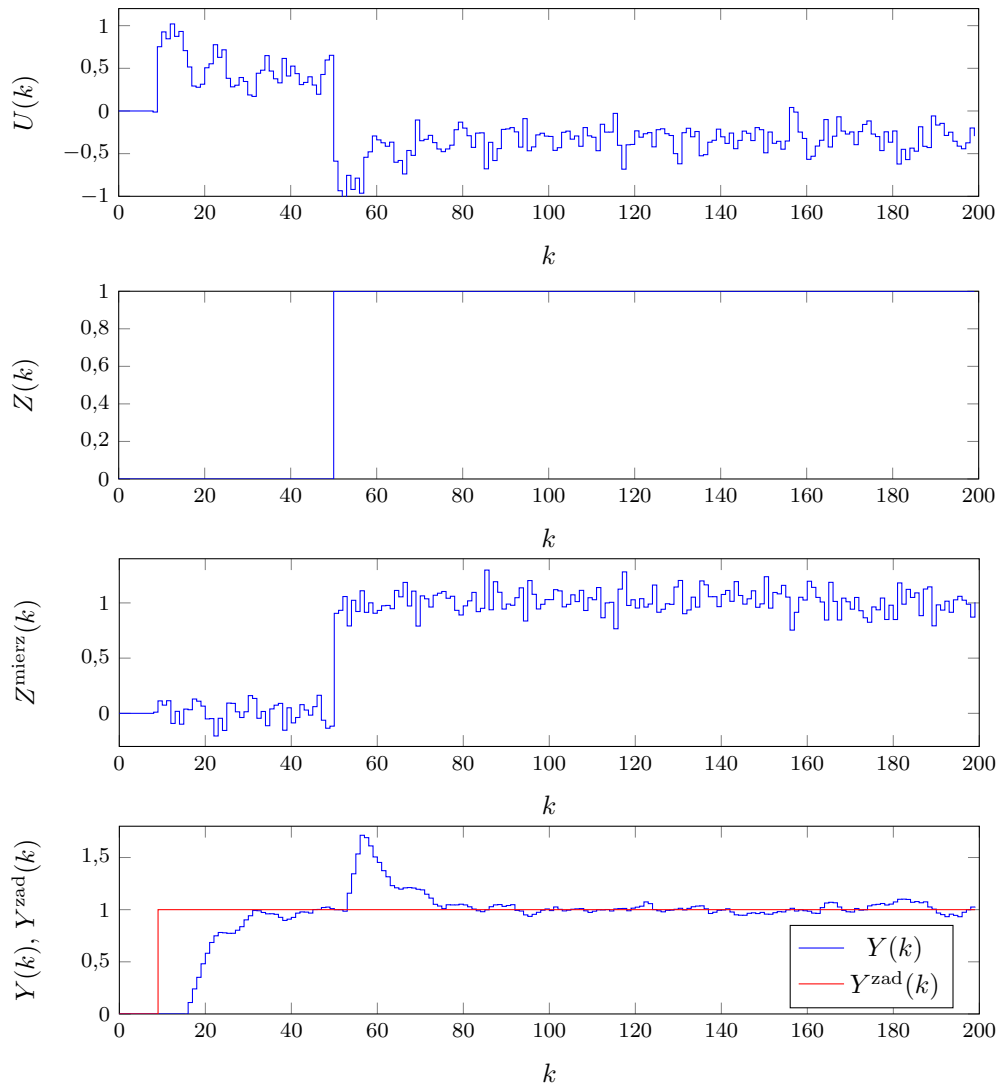
Na koniec sprawdziliśmy jak regulator uwzględniający pomiar zakłóceń radzi sobie z błędnym pomiarem tego właśnie sygnału, czyli zbadaliśmy wpływ szumu pomiarowego na jakość regulacji układu. Szum wygenerowaliśmy za pomocą funkcji `wgn` z pakietu Matlaba. Wygenerowaną wartość szumu dodawaliśmy do mierzonego sygnału zakłóceń. Skok zakłócenia podobnie jak w

zadaniu 5 występował od 0 do 1. Symulowany obiekt otrzymywał wartość zakłócenia bez szumu, z kolei do regulatora wpływała wartość z szumem pomiarowym. Dokonaliśmy regulacji dla trzech poziomów szumu: mały, średni i duży. Z małym szumem (amplituda maksymalna około 0,1) regulator radził sobie całkiem nieźle, zaobserwowaliśmy minimalne drgania wartości wyjściowej (Rys. 3.29). Dla szumu średniego (amplituda maksymalna około 0,23) rezultaty okazały się już nieco gorsze (Rys. 3.30), a w przypadku najmocniejszego wzmocnienia szumu (amplituda maksymalna prawie 1) regulator działał już bardzo słabo (Rys. 3.31). W stanie ustalonym wartość wyjściowa skakała chaotycznie wokół wartości zadanej, tak że w najgorszym wypadku uchyb  $e(k)$  wynosił prawie 0,5.

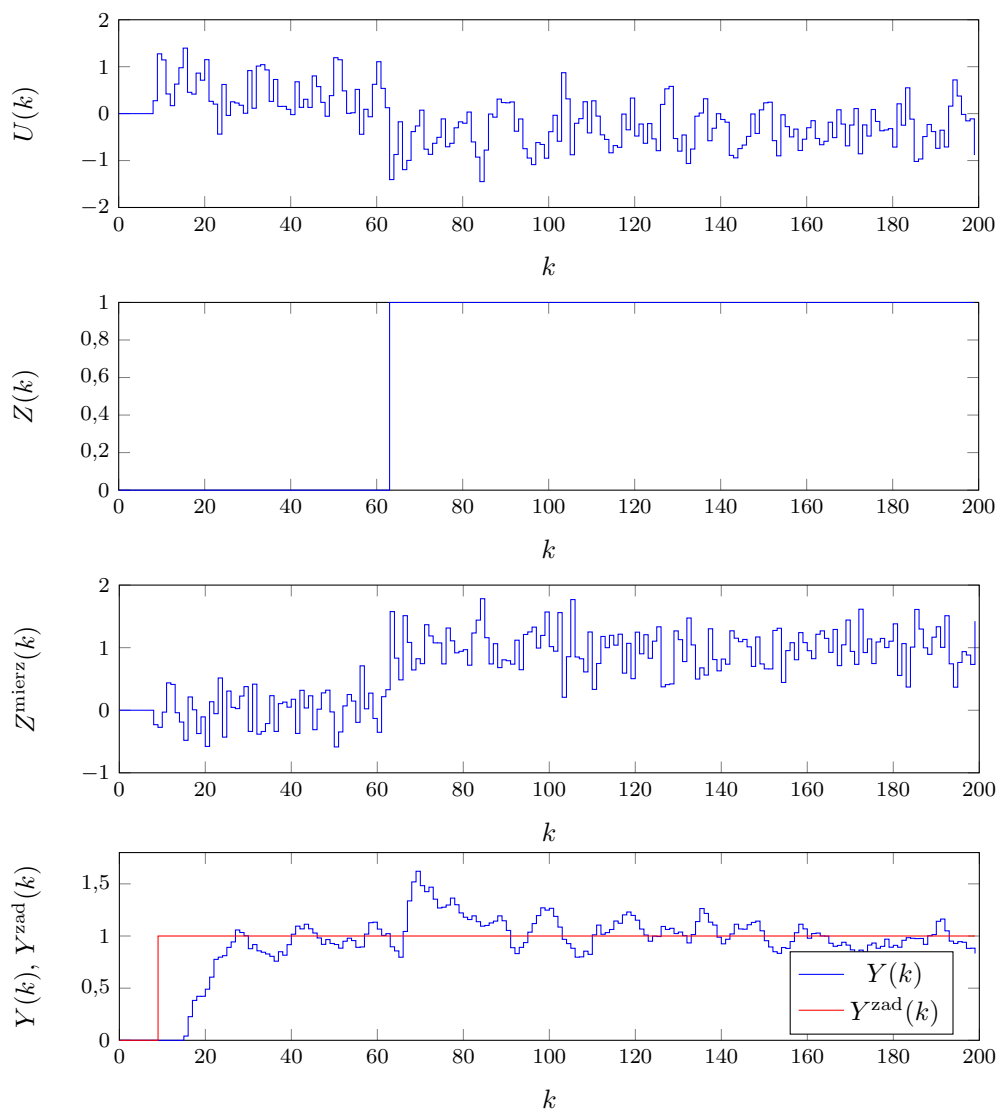


Rys. 3.29. Zachowanie układu regulacji dla małego poziomu szumu,  $E = 12,1858$





Rys. 3.30. Zachowanie układu regulacji dla średniego poziomego szumu,  $E = 12,7668$



Rys. 3.31. Zachowanie układu regulacji dla dużego poziomu szumu,  $E = 13,283$