

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego  
nr 1, zadanie nr 4

Piotr Chachuła, Cezary Dudkiewicz, Piotr Roszkowski

Warszawa, 2019

# Spis treści

## I. Projekt

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| <b>1. Weryfikacja punktu pracy</b>                  | 3  |
| 1.1. Opis postępowania                              | 3  |
| 1.2. Wyniki                                         | 3  |
| <b>2. Odpowiedzi skokowe</b>                        | 4  |
| 2.1. Wyznaczanie odpowiedzi skokowych               | 4  |
| 2.2. Wyznaczanie charakterystyki statycznej procesu | 4  |
| 2.3. Wzmocnienie statyczne                          | 4  |
| <b>3. Przekształcenie odpowiedzi skokowej</b>       | 7  |
| <b>4. Regulator PID</b>                             | 8  |
| 4.1. Algorytm działania                             | 8  |
| 4.2. Ręczne strojenie regulatora PID                | 9  |
| 4.2.1. Wylczenie wstępnych parametrów regulatora    | 9  |
| 4.2.2. Zmniejszenie przeregulowania                 | 12 |
| 4.2.3. Dalsze zmniejszenie przeregulowania          | 15 |
| 4.2.4. Przyspieszenie regulatora                    | 18 |
| 4.2.5. Człon różniczkujący                          | 21 |

Część I

**Projekt**

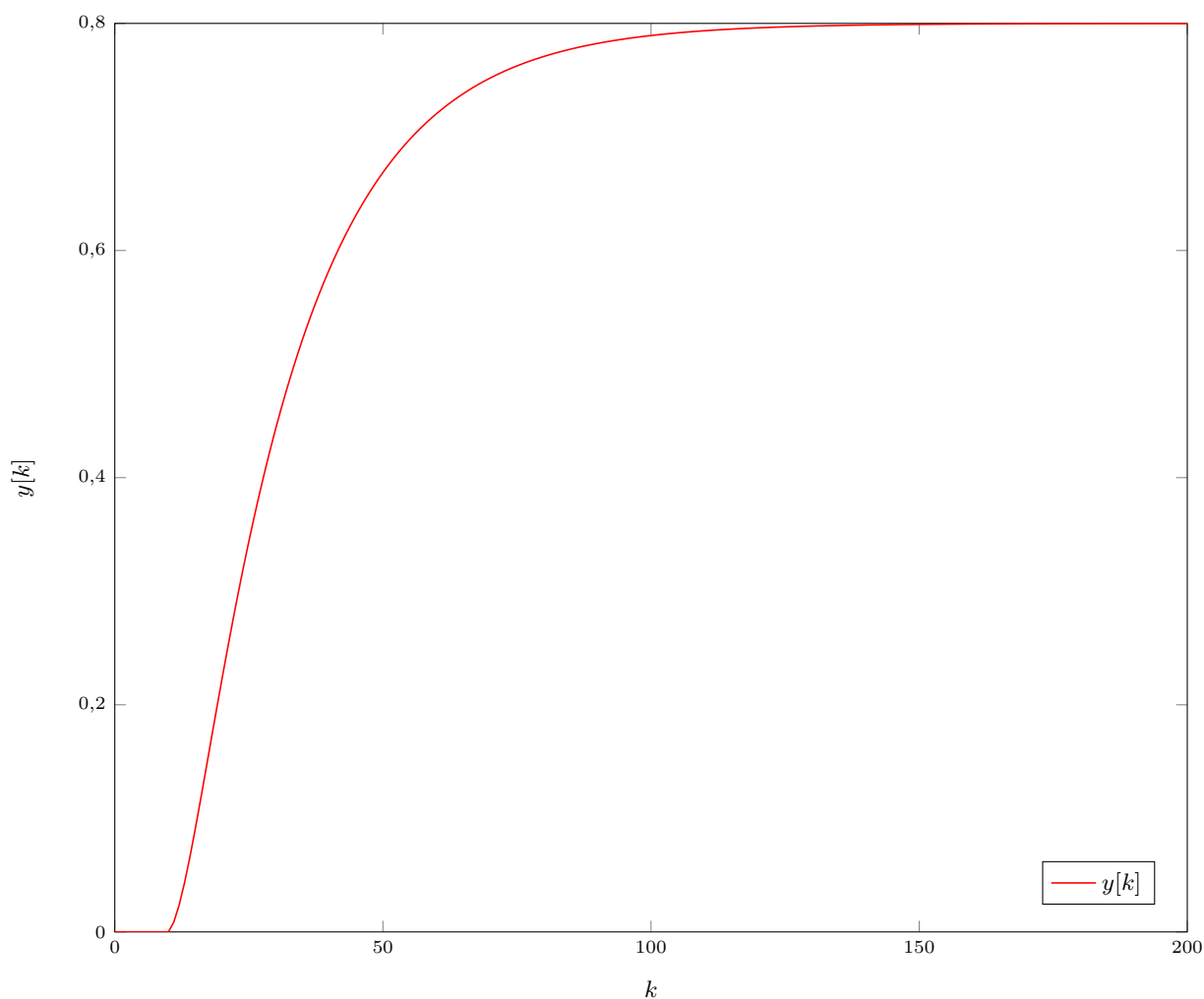
# 1. Weryfikacja punktu pracy

## 1.1. Opis postępowania

W celu sprawdzenia poprawności wartości sygnałów  $U_{pp}$  i  $Y_{pp}$  pobudzono obiekt sterowaniem o wartości  $U_{pp} = 2,0$  i sprawdzaniu czy stabilizuje się on w punkcie pracy  $Y_{pp} = 0,8$ . Do symulacji wyjścia obiektu użyto udostępnionej funkcji `symulacja_obiektu4Y`. Do testów napisano skrypt `PROJ1_1.m`. Wyniki przedstawiono poniżej.

## 1.2. Wyniki

Zgodnie z przewidywaniami wyjście obiektu ustaliło się na wartości  $Y_{pp} = 2,0$ . Punkt pracy ustalony jest więc poprawnie.



Rys. 1.1. Odpowiedź obiektu na sterowaniu  $U_{pp} = 0,8$

## 2. Odpowiedzi skokowe

### 2.1. Wyznaczanie odpowiedzi skokowych

W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowej obiekt, znajdujący się w punkcie pracy (tzn.  $U_{pp} = 2,0, Y_{pp} = 0,8$ ) pobudzoną różną zmianą wartości sterowań. Rysunek 2.1 przedstawia odpowiedź obiektu na jego różne wartości.

### 2.2. Wyznaczanie charakterystyki statycznej procesu

Aby wyznaczyć charakterystykę statyczną procesu przeprowadzono analogiczne działania co w rozdziale 1. Tym razem przy użyciu skryptu `PROJ1_2.m` dla wielu wartości  $U_{pp}$  wyznaczono odpowiadające im  $Y_{pp}$  oraz z ich pomocą utworzono wykres 2.2. Jak widać charakterystyka statyczna obiektu jest liniowa, a co za tym idzie obiekt jest liniowy.

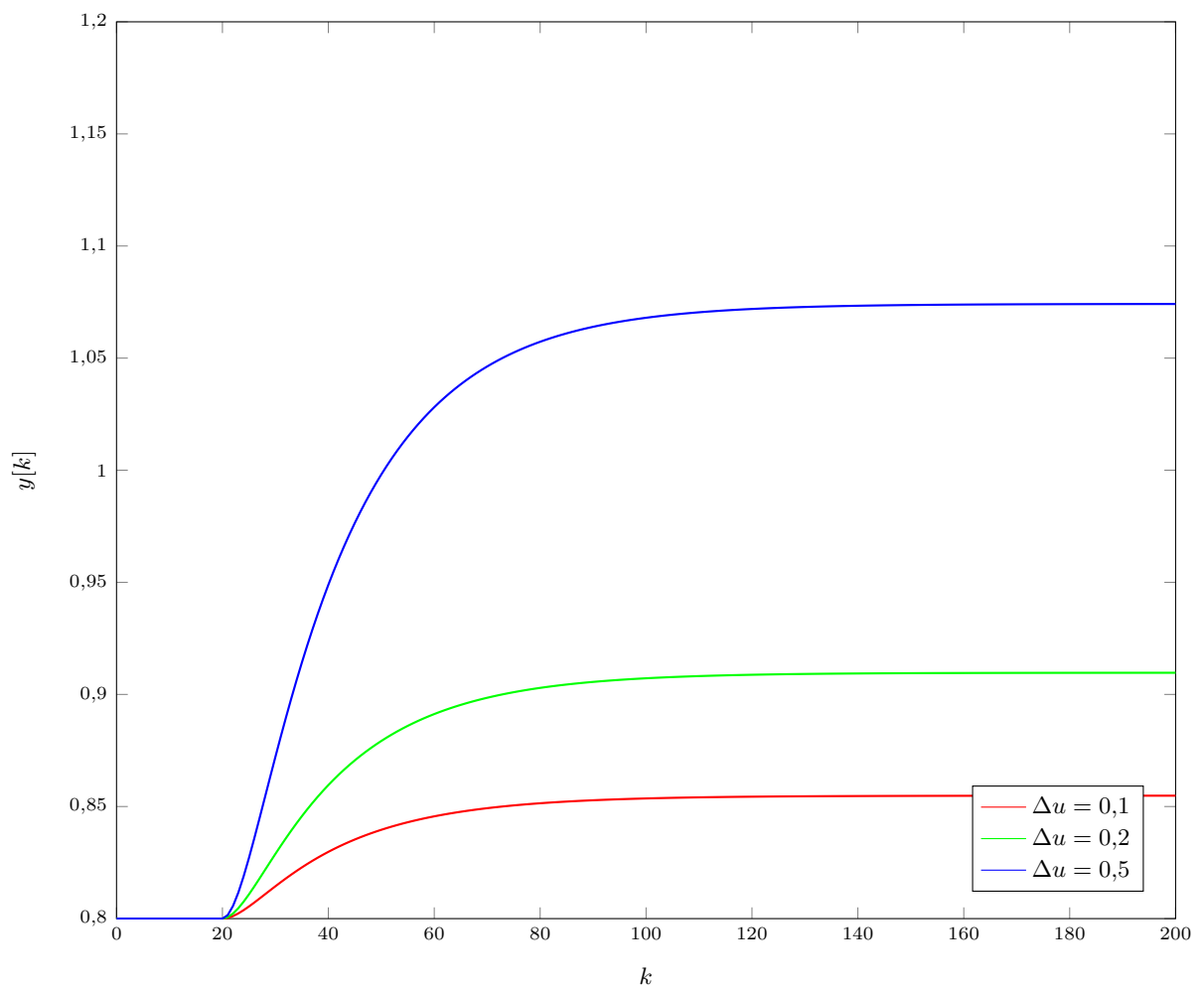
### 2.3. Wzmocnienie statyczne

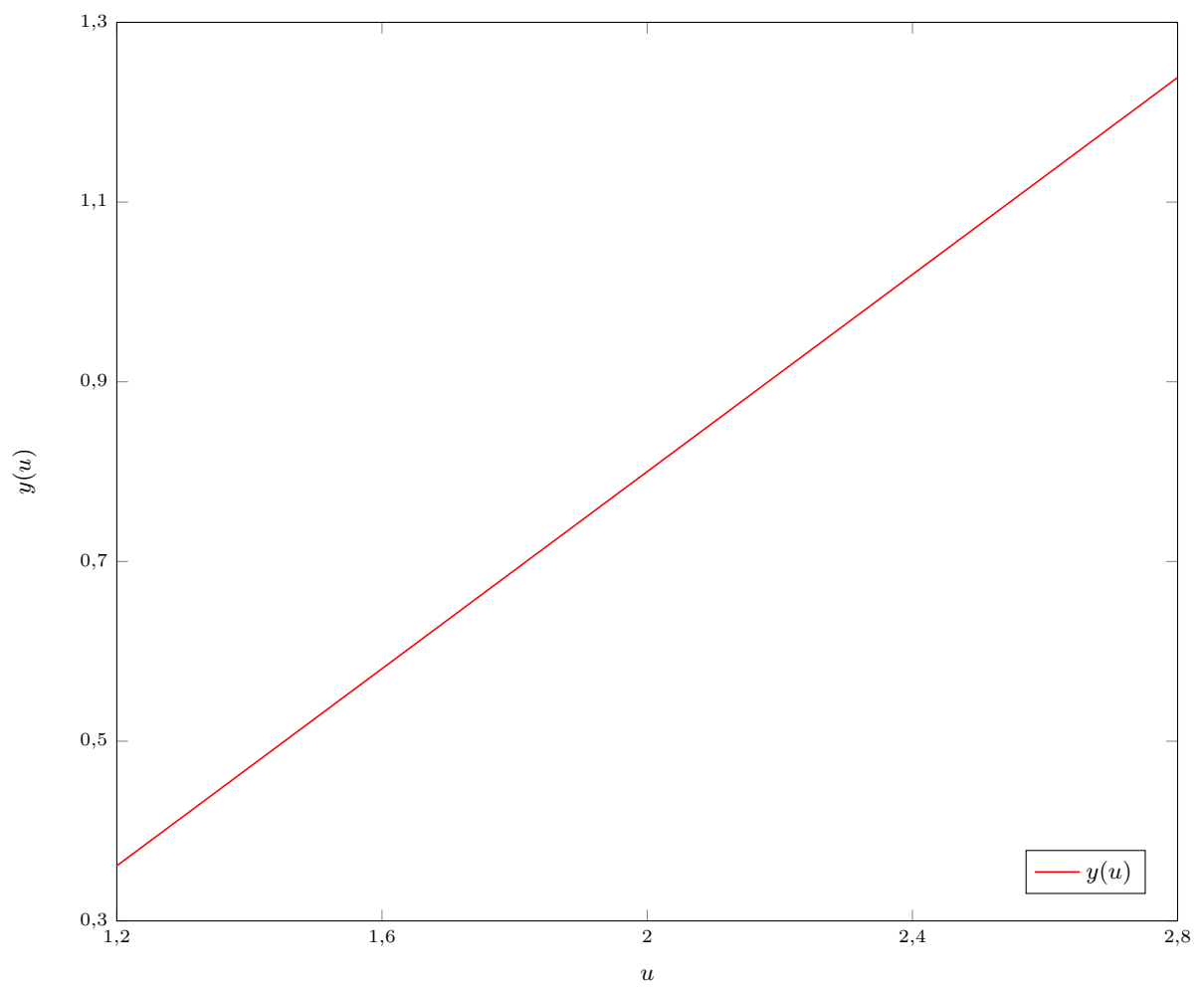
Wzmocnienie statyczne, czyli stosunek pomiędzy zmianą wartości wyjścia i zmianą wartości sterowania w stanie ustalonym. Aby ją wyznaczyć można na przykład znaleźć nachylenie charakterystyki statycznej do osi  $OX$ , czyli np.:

$$K_{\text{stat}} = \frac{y(U_{\text{max}}) - y(U_{\text{min}})}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \quad (2.1)$$

W przypadku tak wykreślonej charakterystyki, wzmocnienie statyczne jest równe tangensowi kąta  $\alpha$  pomiędzy prostą a osią  $OX$ .

$$K_{\text{stat}} = \frac{1,239 - 0,361}{2,8 - 1,2} \approx 0,549 \quad (2.2)$$

Rys. 2.1. Odpowiedzi procesu na skokowe zmiany sterowania w momencie  $k=11$

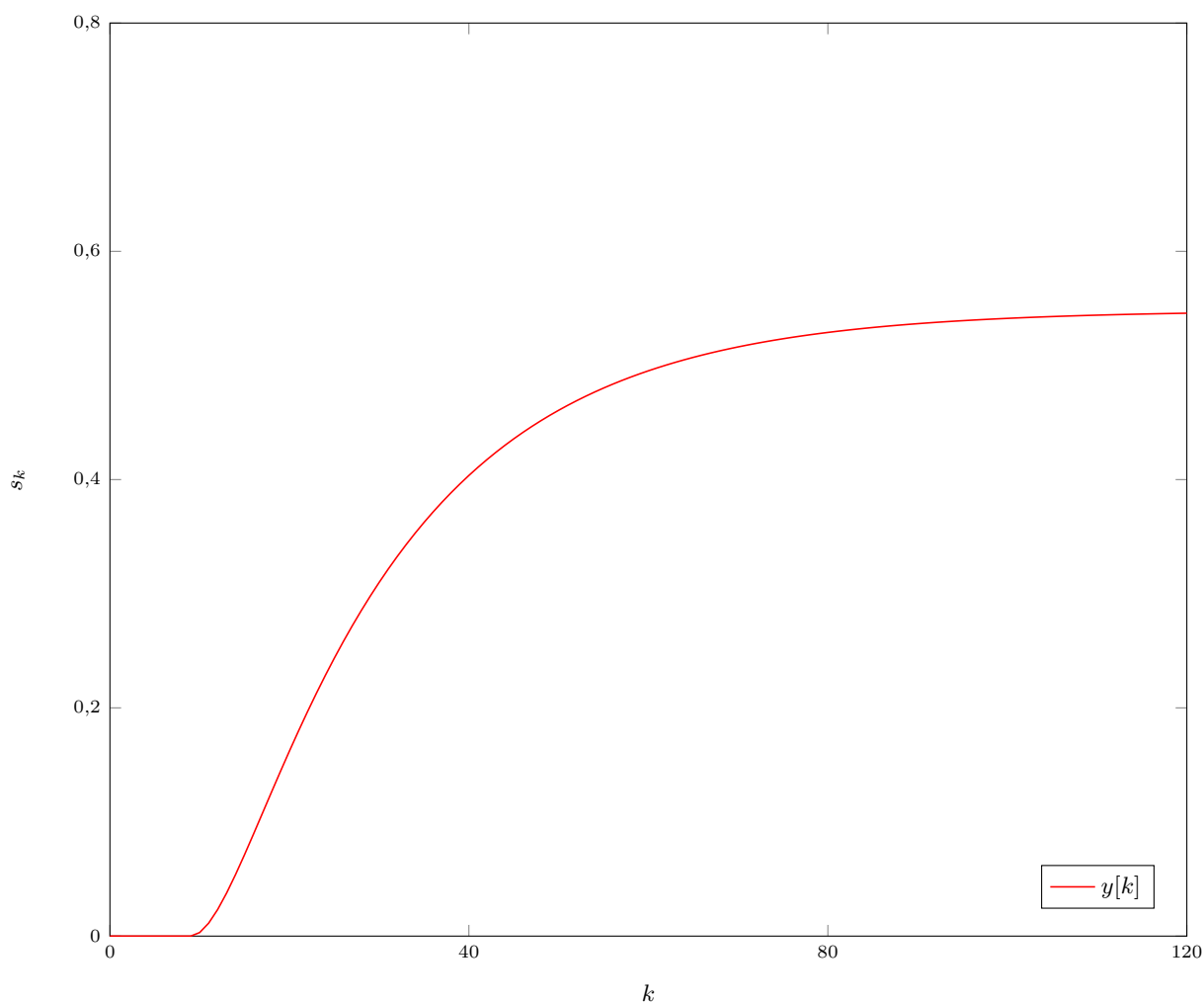
Rys. 2.2. Charakterystyka statyczna  $y(u)$  symulowanego procesu

### 3. Przekształcenie odpowiedzi skokowej

Aby uzyskać znormalizowaną odpowiedź skokową, należy przerzutować ją względem punktu pracy oraz wielkości skoku, a także przesunąć chwilę skoku sterowania do chwili  $k=0$  (z chwili  $k_{skok}$ ). Do tego celu można użyć wzoru:

$$s_i = \frac{s_{i+k_{skok}} - Y_{pp}}{\Delta U} \quad (3.1)$$

Wyznaczono ją przy użyciu skryptu `PROJ1_3.m` (dla odpowiedzi skokowej przy  $\Delta u = 0,5$ ). Następnie przycięto ją do miejsca w którym osiąga 0,995 swojej maksymalnej wartości. Długość tej odpowiedzi jest przyjętym horyzontem dynamiki tego obiektu i jest równy 120. Wynik działania przedstawiony jest na rysunku 3. Odpowiedź ta zostanie użyta do zaprojektowania regulatora DMC.



Rys. 3.1. Postać przekształconej odpowiedzi skokowej symulowanego obiektu ze zmianą sterowania w momencie  $k=0$



## 4. Regulator PID

### 4.1. Algorytm działania

Algorytm działania regulatora oraz implementacja została dobrze udokumentowana w pliku `doPID.m`. Listing jego części algorytmicznej przedstawiony jest poniżej:

```
function [ error ] = doPID( paras )    % Tylko dla auto

% Ustawiamy dlugosc symulacji
sim_len=1200;

% Tylko dla auto
K=paras(1);
Ti=paras(2);
Td=paras(3);

% Czas probkowania
T=1;

% Parametry wygodnego, dyskretnego PIDa
r0=K*(1+T/(2*Ti)+Td/T);
r1=K*(T/(2*Ti)-(2*Td/T)-1);
r2=K*Td/T;

% Inicjalizujemy macierze przechowujace zmienne
Y=zeros(sim_len,1);
U=zeros(sim_len,1);
e=zeros(sim_len,1);
y=zeros(sim_len,1);
u=zeros(sim_len,1);
Yzad=zeros(sim_len,1);
kk=linspace(1,sim_len,sim_len)';

% Ustalamy wartosci przed rozpoczeciem symulacji na wartosci w punktu pracy
Ypp=0.8;
Upp=2.0;
Y(1:11)=Ypp;
U(1:11)=Upp;

% Tworzymy horyzont wartosci zadanej
Yzad(1:29)=0.8;
Yzad(30:sim_len/3-1)=1.0;
Yzad(sim_len/3:2*sim_len/3-1)=0.6;
Yzad(2*sim_len/3:sim_len)=0.7;

%Rzutujemy ograniczenia sterowan wzgledem punktu pracy.
Umin=1.2;
Umax=2.8;
deltaumax=0.25;
umin=Umin-Upp;
umax=Umax-Upp;

for k=12:sim_len
    % Symulujemy wyjscie obiektu
    Y(k)=symulacja_obiektu4Y(U(k-10),U(k-11),Y(k-1),Y(k-2));
    % Rzutujemy wartosc wyjscia wzgledem punktu pracy
    y(k)=Y(k)-Ypp;
    % Liczymy uchyb i uaktualniamy wspolczynnik bledu
    e(k)=Yzad(k)-Y(k);
    error=error+e(k)^2;
    % Liczymy wartosc sterowania
    u_wyliczone=r2*e(k-2)+r1*e(k-1)+r0*e(k)+u(k-1);

    % Rzutowanie ograniczen na wartosc sterowania
    if u_wyliczone<umin
        u_wyliczone=umin;
    elseif u_wyliczone>umax
        u_wyliczone=umax;
    end
end
```

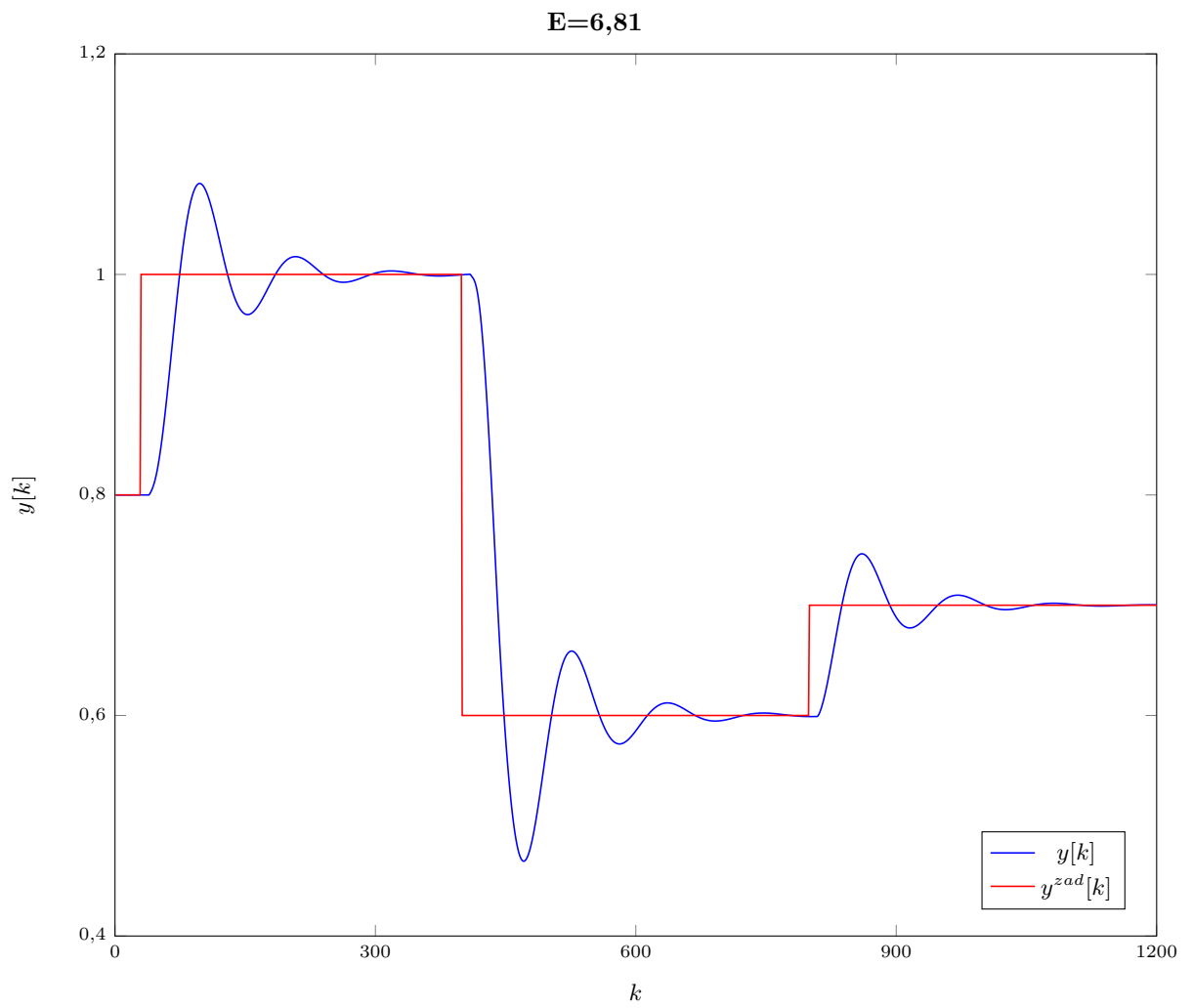
```
% Rzutowanie ograniczen na wartosc zmiany sterowania
if u_wyliczone-u(k-1)<=-deltaumax
    u_wyliczone=u(k-1)-deltaumax;
elseif u_wyliczone-u(k-1)>deltaumax
    u_wyliczone=u(k-1)+deltaumax;
end
% Rzutowanie sterowania wzgledem punktu pracy
u(k)=u_wyliczone;
U(k)=u_wyliczone+Upp;
end
```

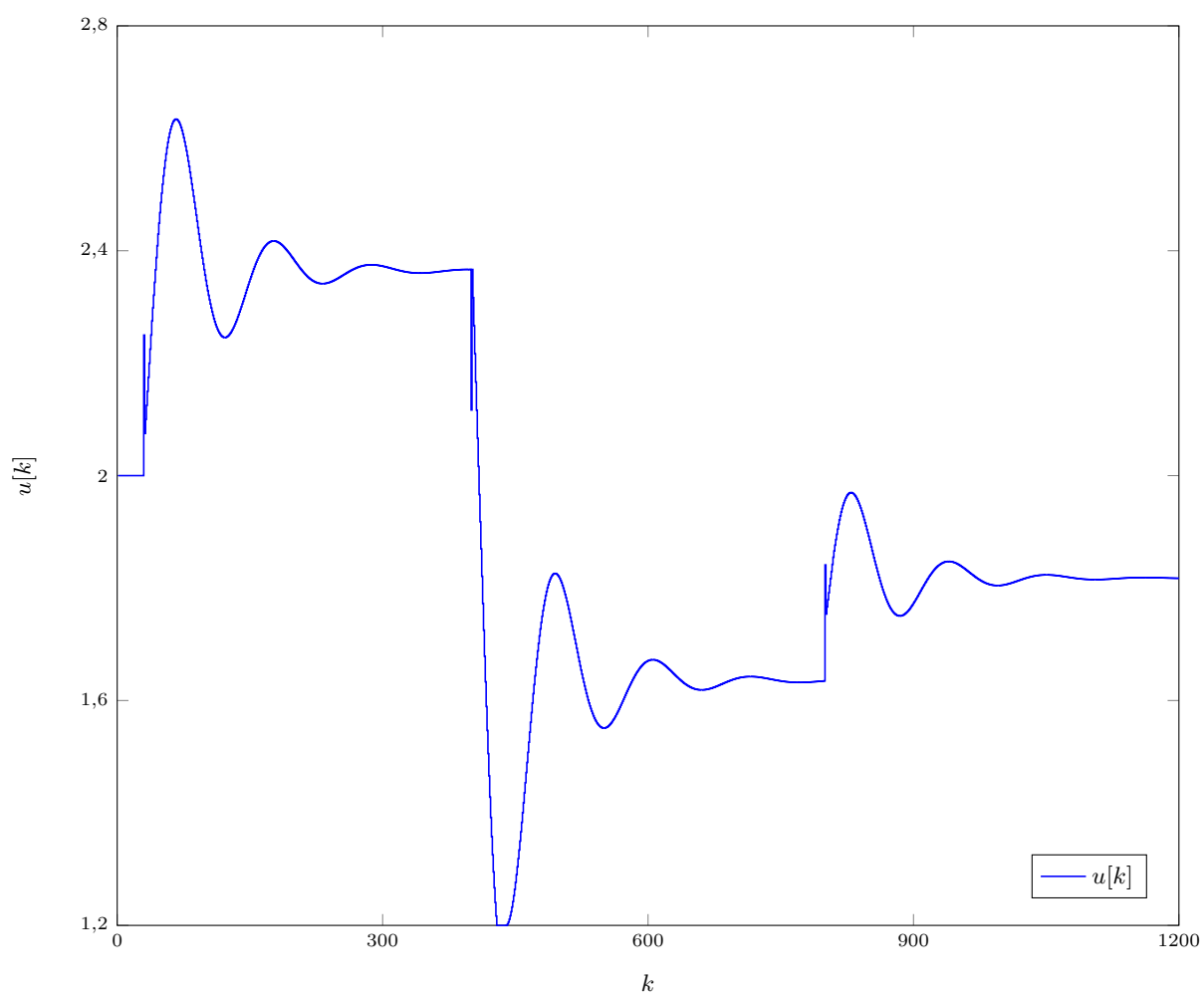
Listing 4.1. Implementacja regulatora PID

## 4.2. Ręczne strojenie regulatora PID

### 4.2.1. Wyliczenie wstępnych parametrów regulatora

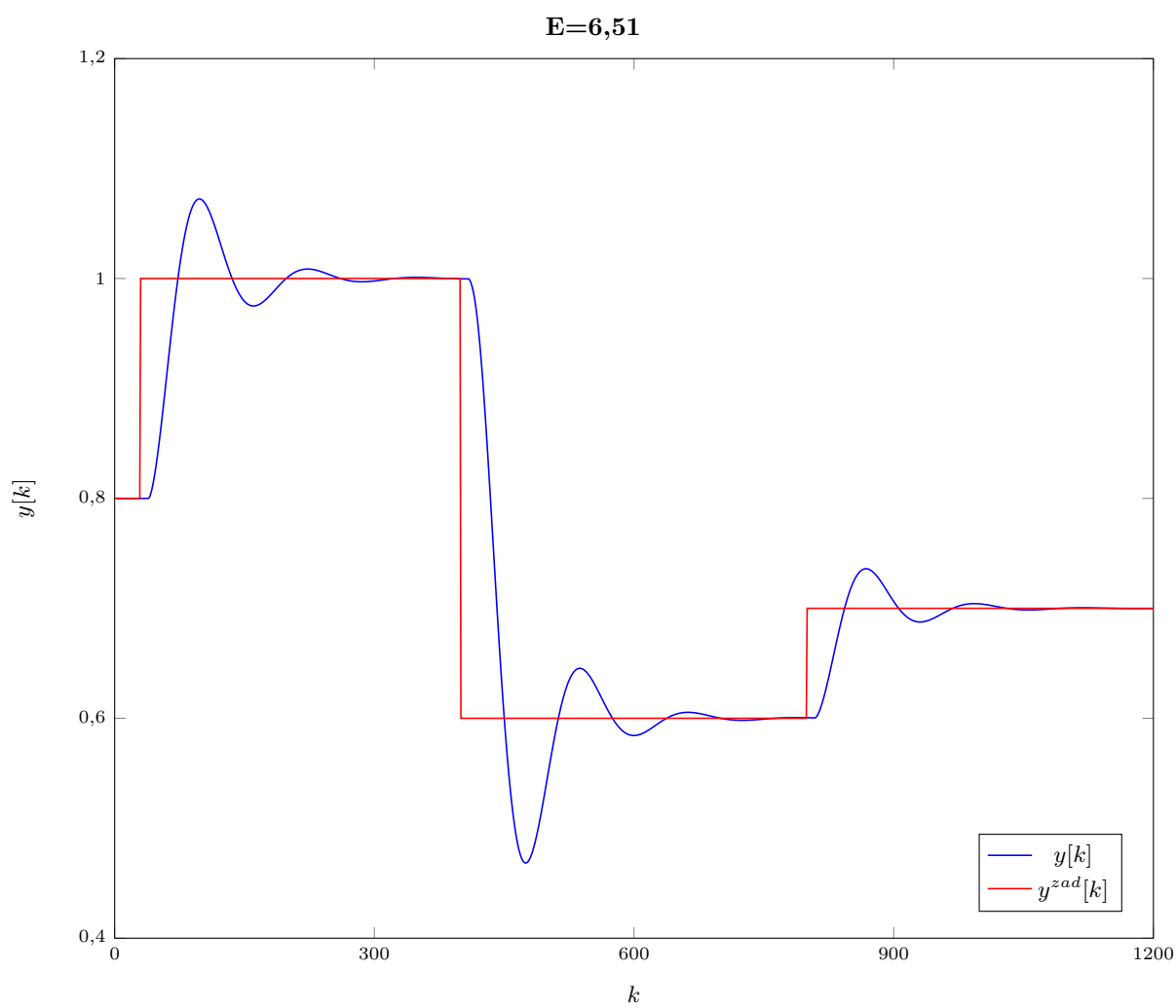
W celu doboru wstępnych parametrów regulatora PID użyto metody eksperymentalnej; przeprowadzono dużą ilość symulacji dla arbitralnych wartości  $K_r$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ . Spośród ponad 100 symulacji, wybrano te parametry, których wskaźnik jakości był najlepszy. Stało się to dla regulatora przedstawionego na rysunku 4.2.

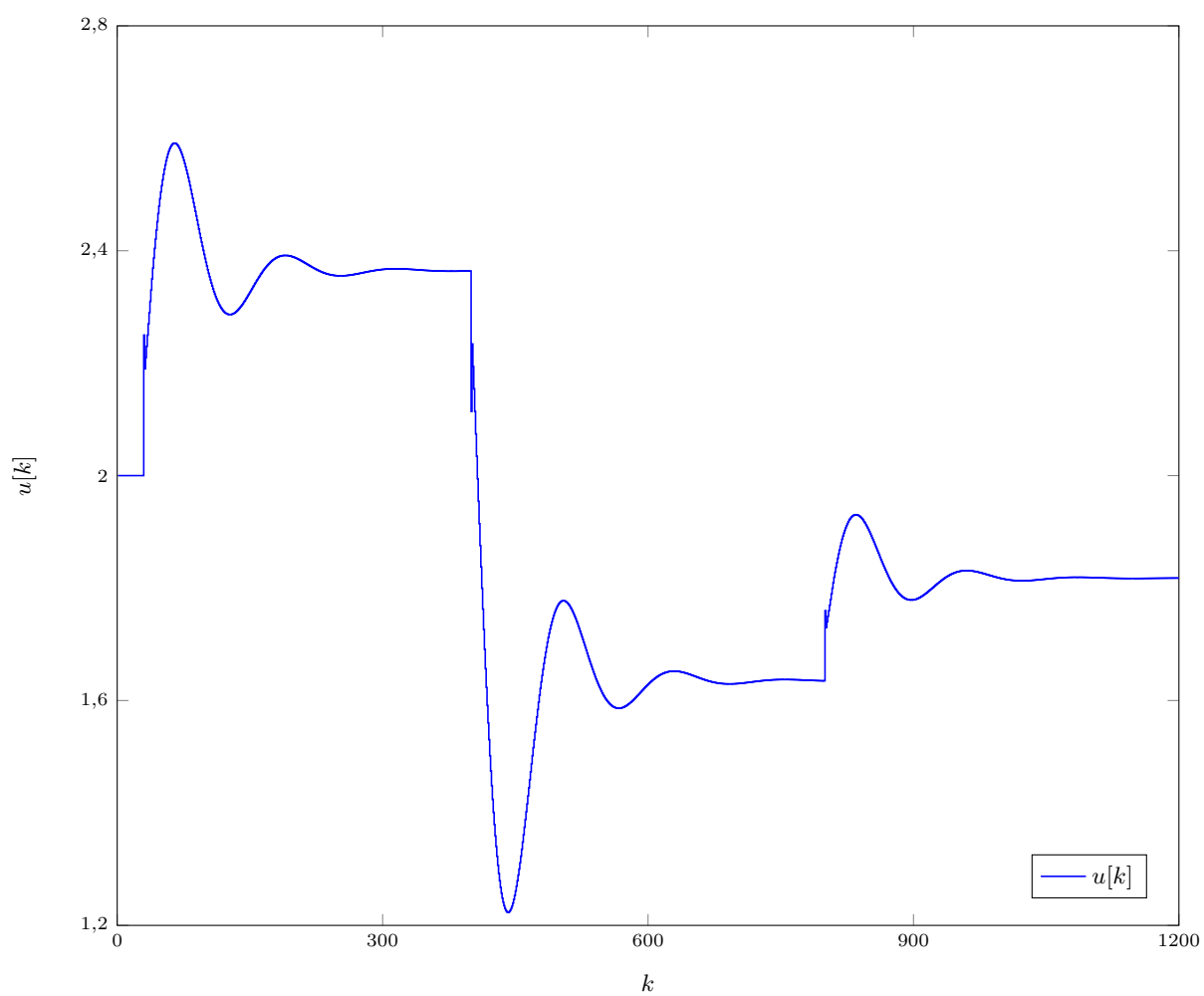
Rys. 4.1. Wyjście dla  $K_r=1$ ,  $T_i=4$ ,  $T_d=0,5$

Rys. 4.2. Sterowanie dla  $K_r=1$ ,  $T_i=4$ ,  $T_d=0,5$

**4.2.2. Zmniejszenie przeregulowania**

W celu zmniejszenia znacznego przeregulowania występującego w regulatorze zmniejszono jego wzmocnienie do  $K_r=0,8$  oraz dodatkowo zmieniono parametr członu różniczkującego do  $T_d=0,25$ . Wyniki symulacji dla zmienionego regulatora przedstawone zostały na rysunku 4.4.

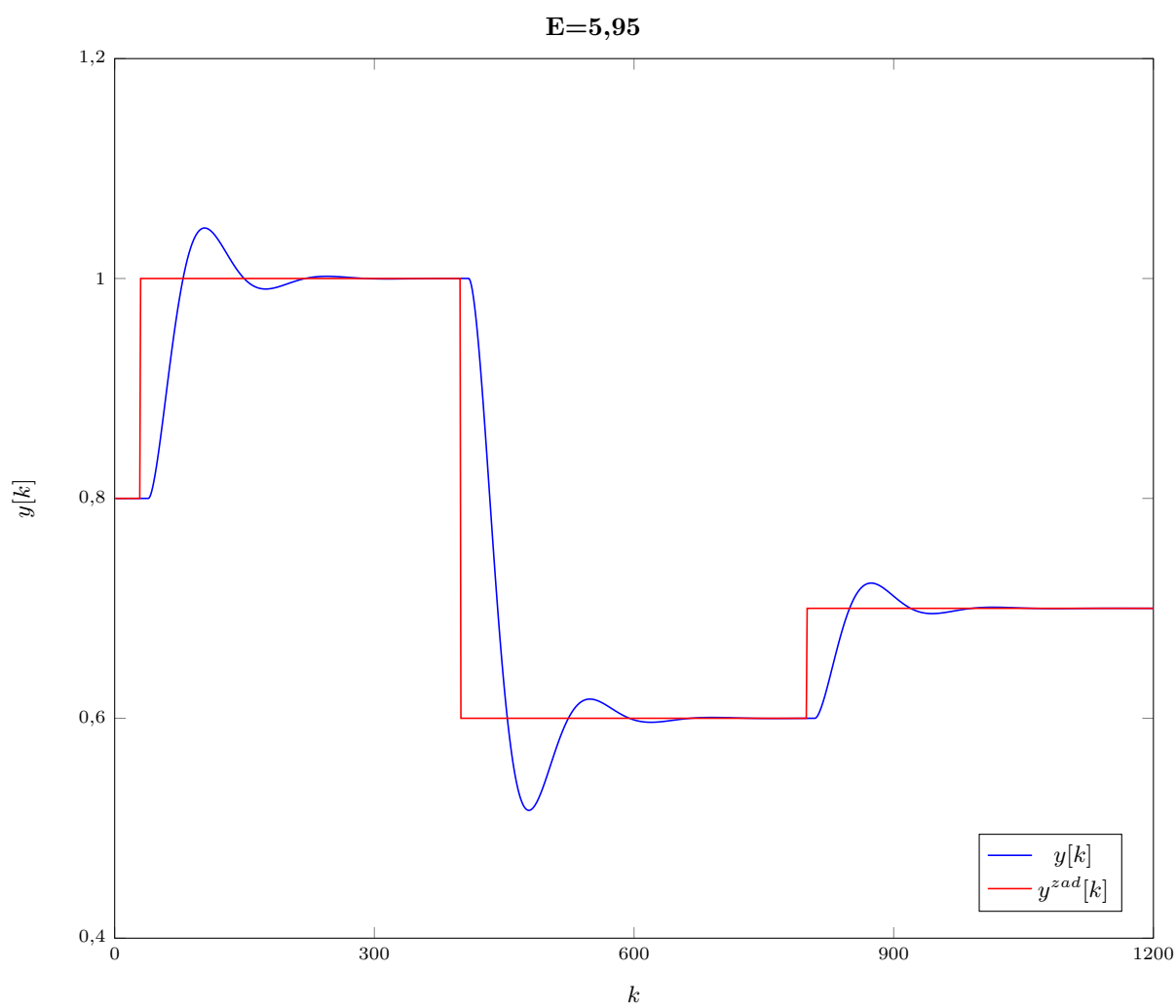
Rys. 4.3. Wyjście dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=4$ ,  $T_d=0,25$

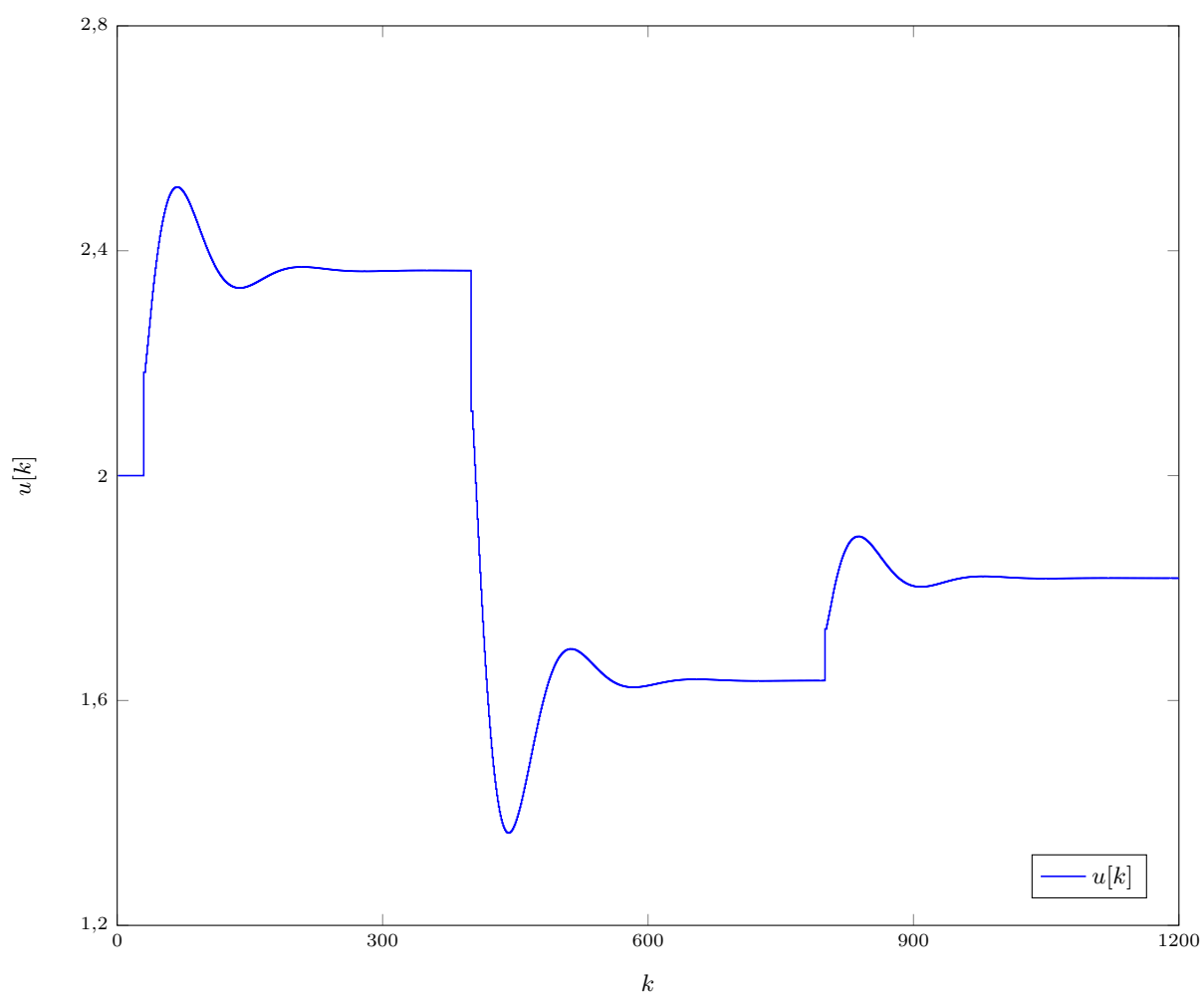
Rys. 4.4. Sterowanie dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=4$ ,  $T_d=0,25$

#### 4.2.3. Dalsze zmniejszenie przeregulowania

Przeregulowanie ciągle występuje w dość znacznym stopniu, dlatego w następnym kroku zmniejszono całkowanie do  $T_i=5$  oraz dodatkowo zmniejszono różniczkowanie do  $T_d=0,05$ . Wyniki symulacji dla zmienionego regulatora przedstawione zostały na rysunku 4.6.

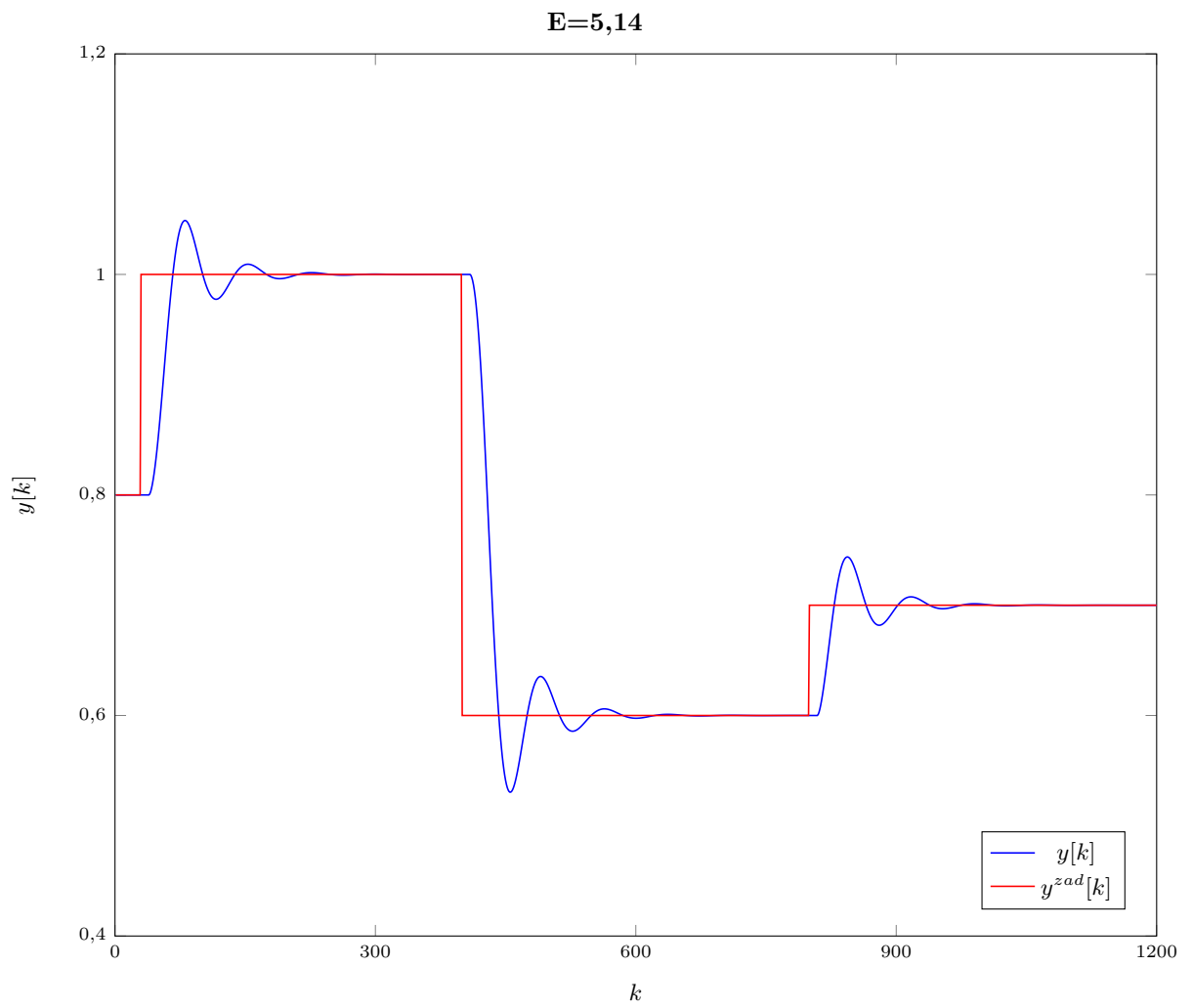


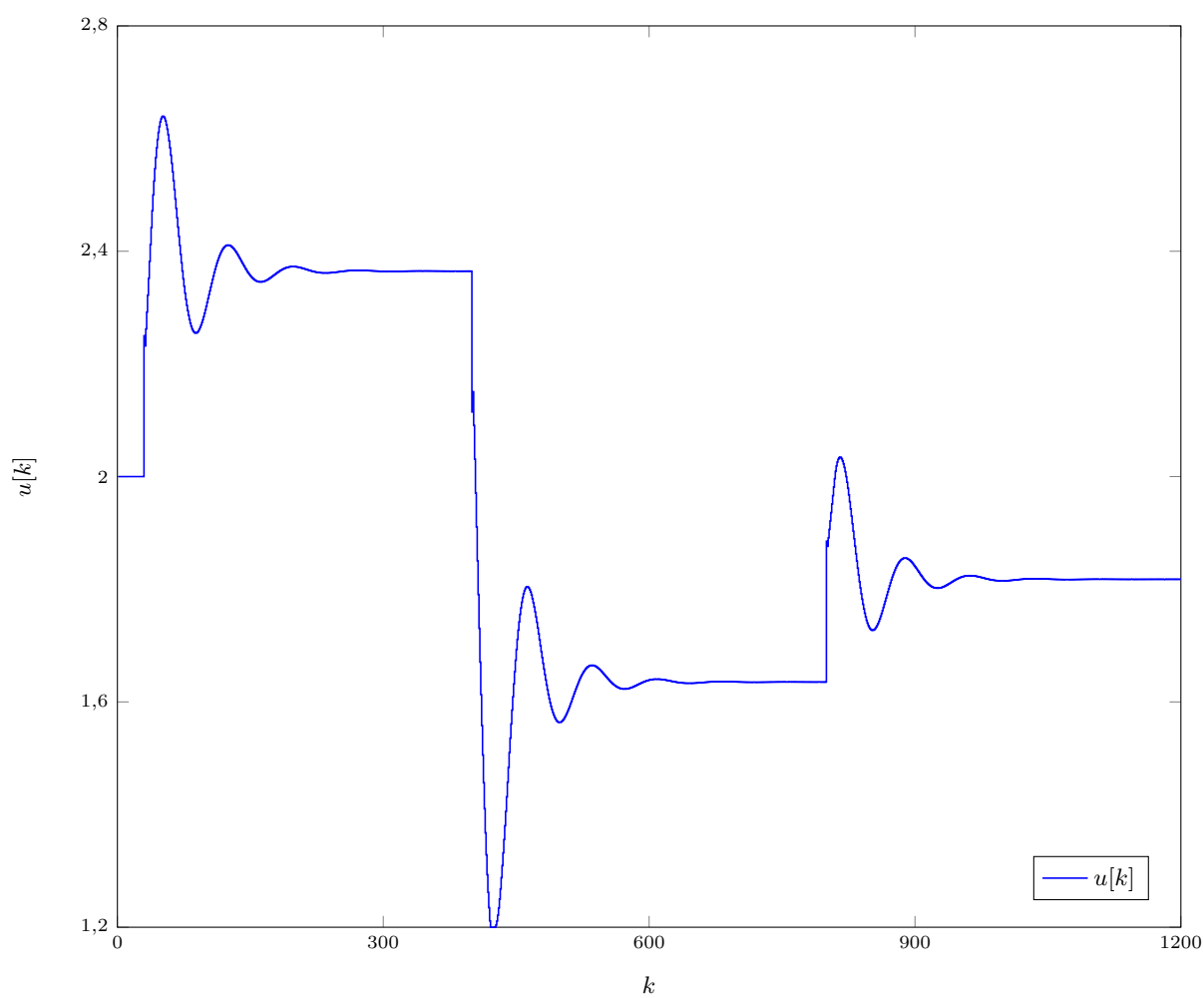
Rys. 4.5. Wyjście dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=5$ ,  $T_d=0,05$

Rys. 4.6. Sterowanie dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=5$ ,  $T_d=0,95$

**4.2.4. Przyspieszenie regulatora**

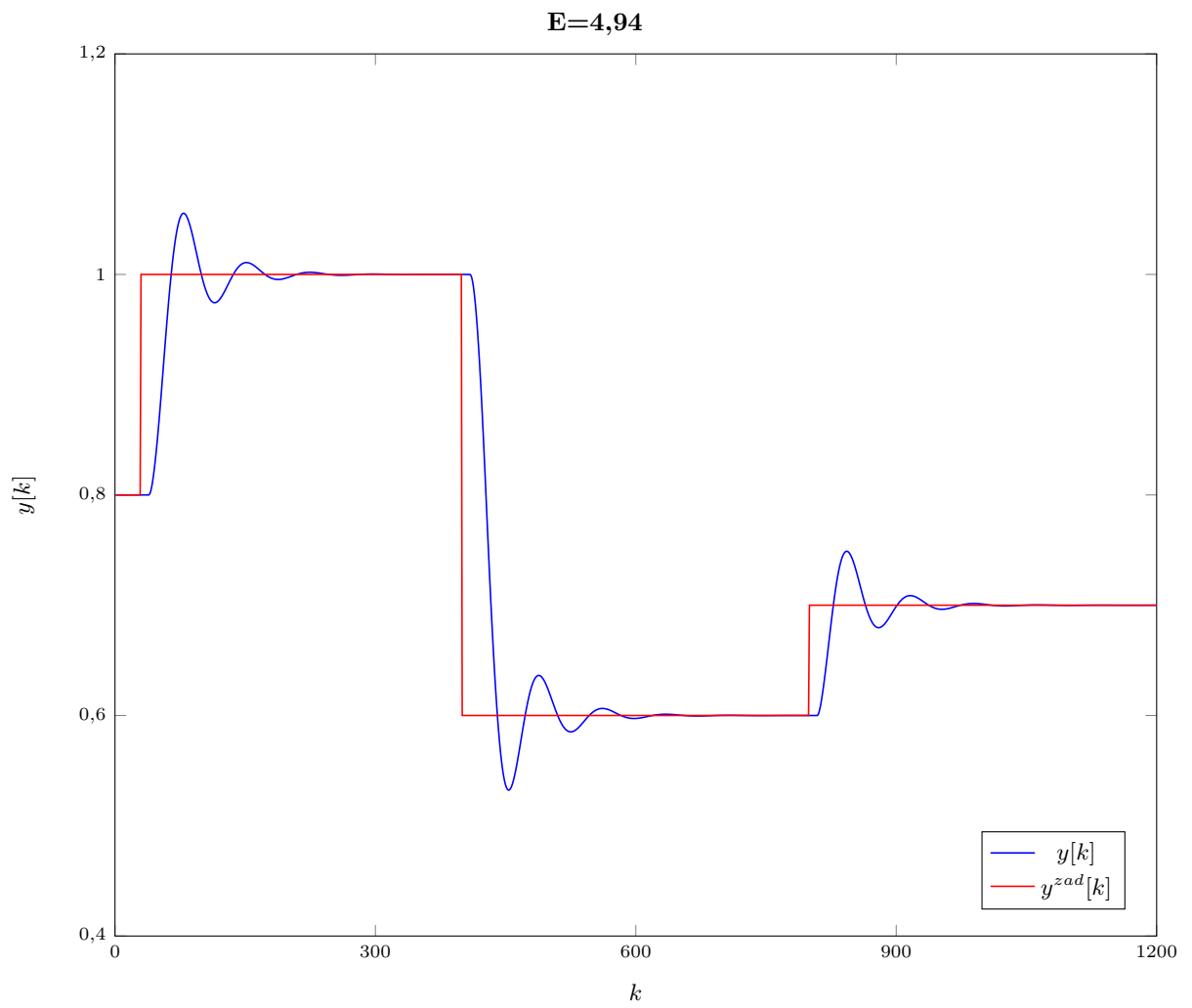
W celu zwiększenia szybkości regulatora zwiększono jego wzmocnienie do  $K_r=2,4$  oraz w ramach kompensacji zmniejszono całkowanie do  $T_i=8$ . Wyniki symulacji dla zmienionego regulatora przedstawione zostały na rysunku 4.8.

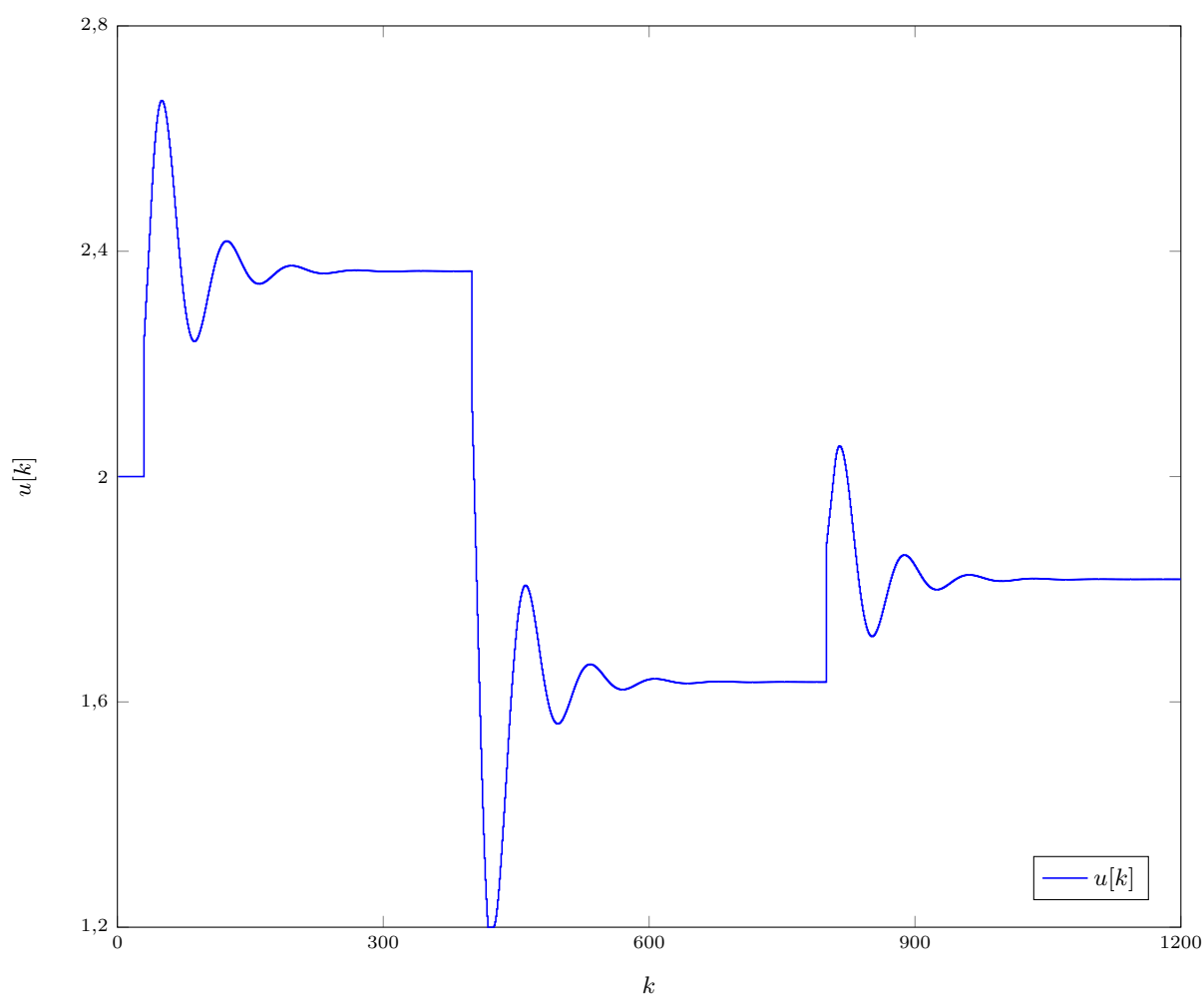
Rys. 4.7. Wyjście dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=5$ ,  $T_d=0,05$

Rys. 4.8. Sterowanie dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=5$ ,  $T_d=0,05$

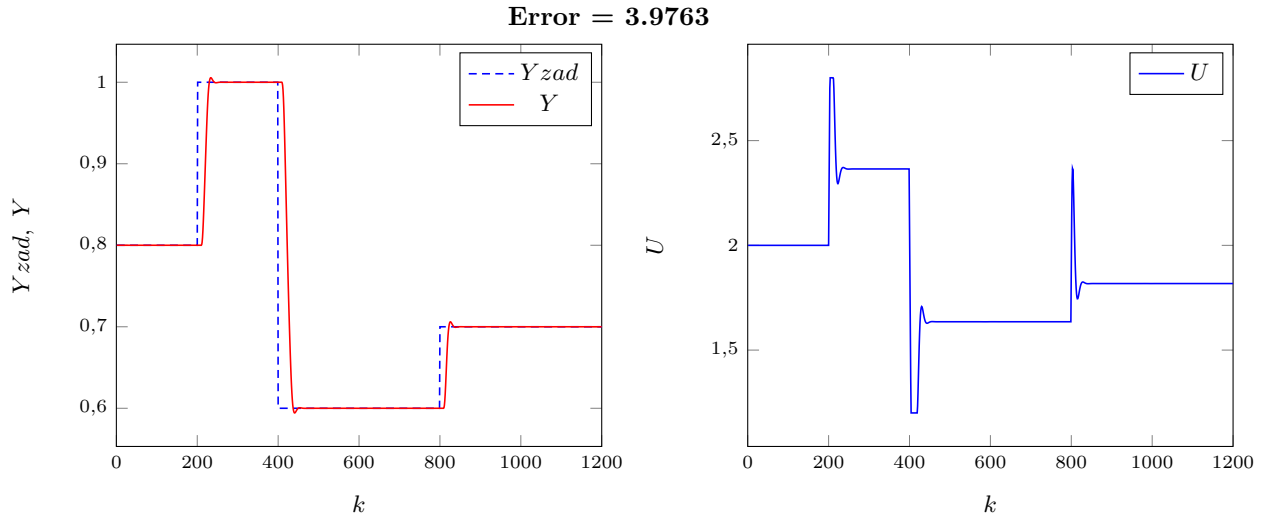
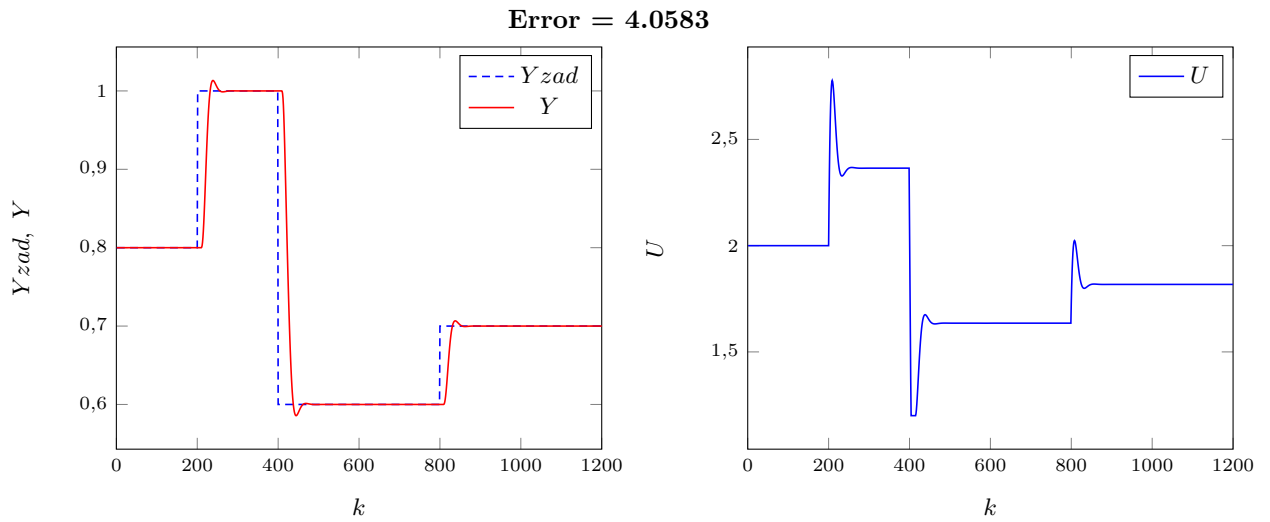
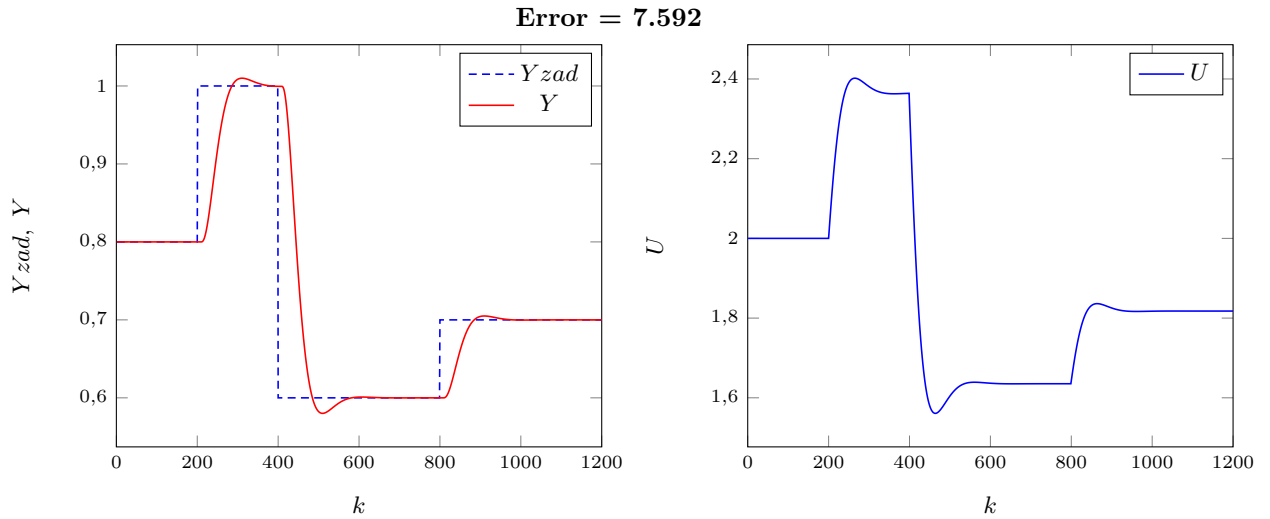
#### 4.2.5. Człon różniczkujący

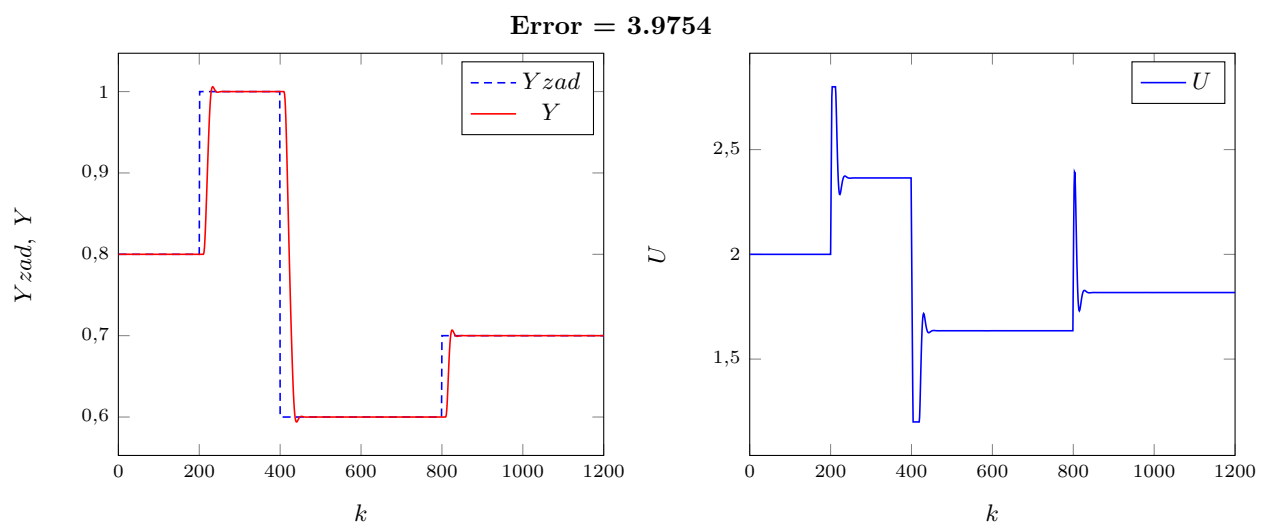
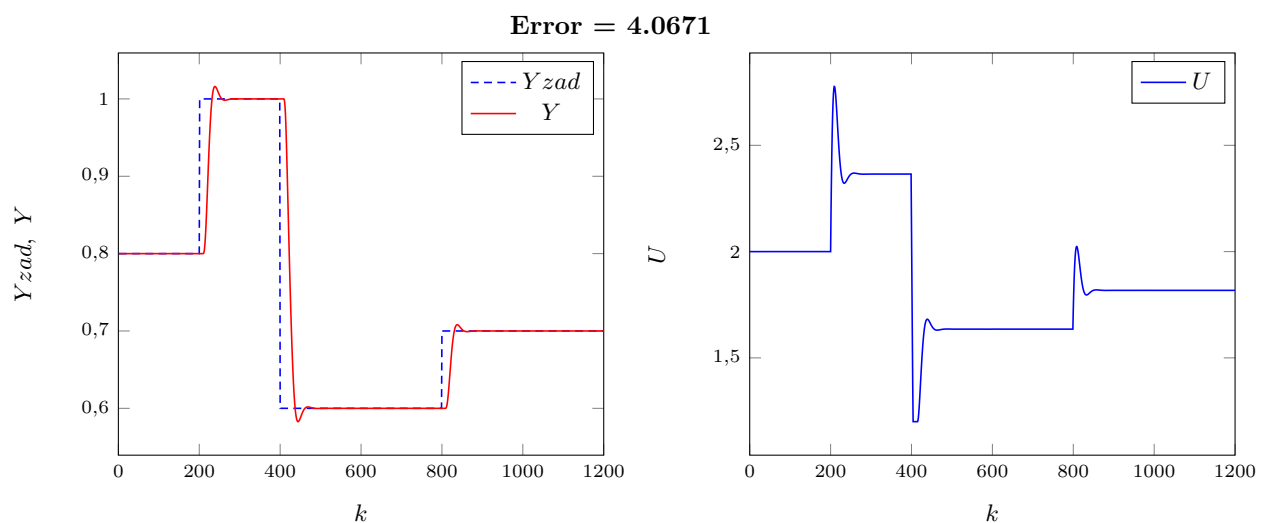
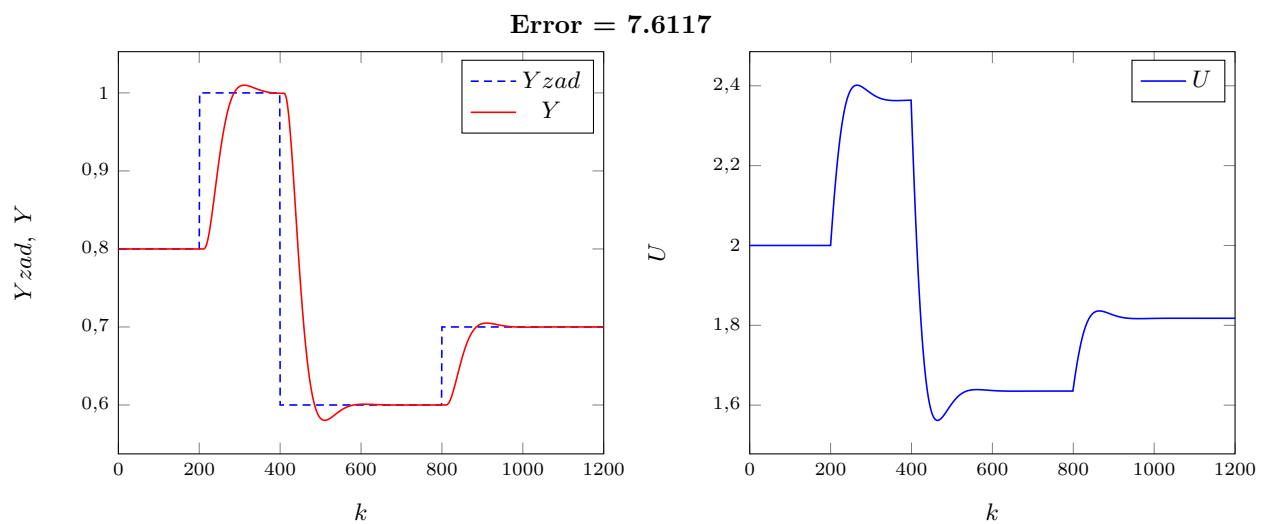
Podczas wczesniejszego strojenia zauważono fakt, iż zmniejszenie członu różniczkującego pozytywnie wpływa na jakość regulacji. Postanowiono więc znacznie go zmniejszyć, do wartości  $T_d=0,0005$ . Wyniki symulacji dla zmienionego regulatora przedstawione zostały na rysunku 4.10.

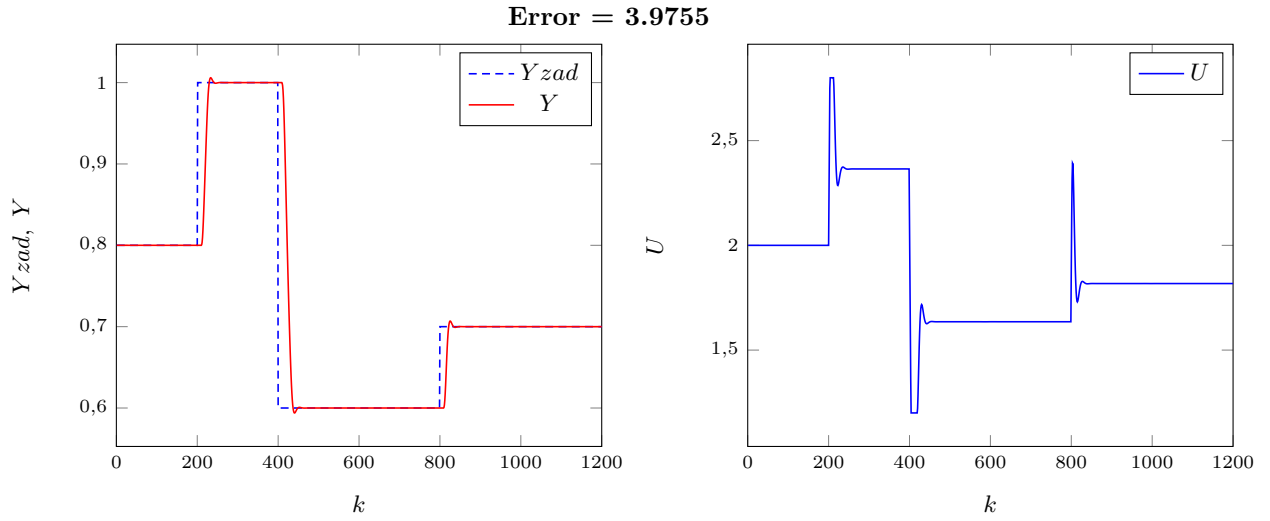
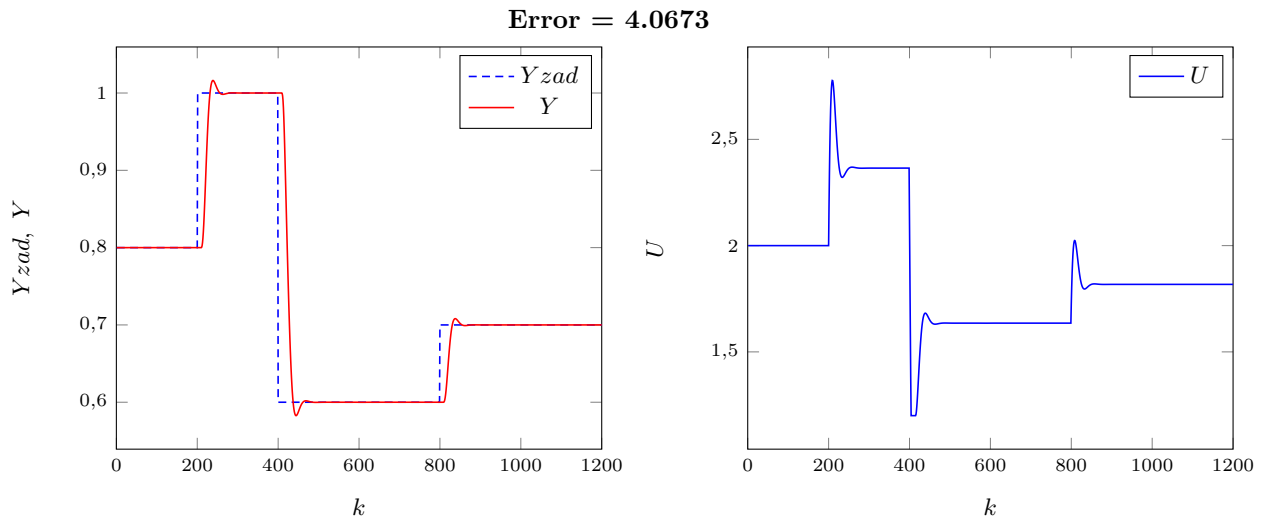
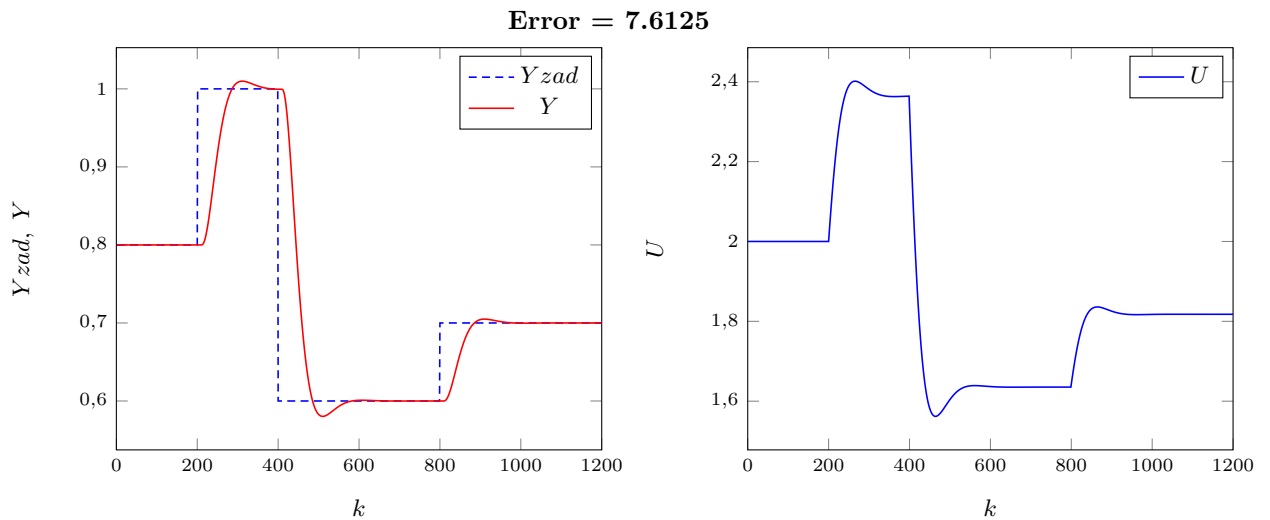
Rys. 4.9. Wyjście dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=5$ ,  $T_d=0,05$

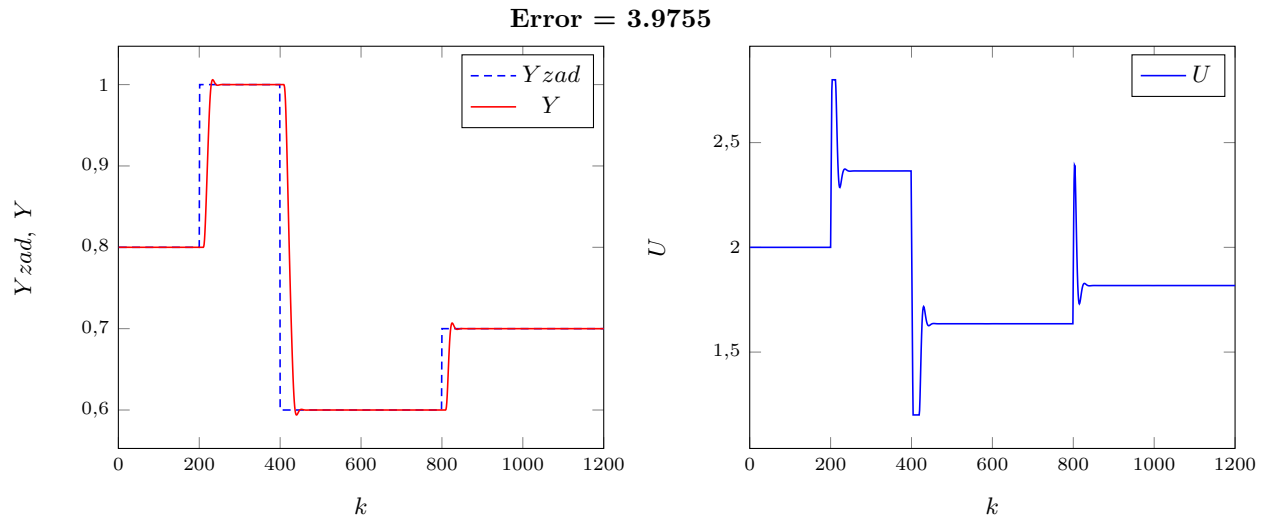
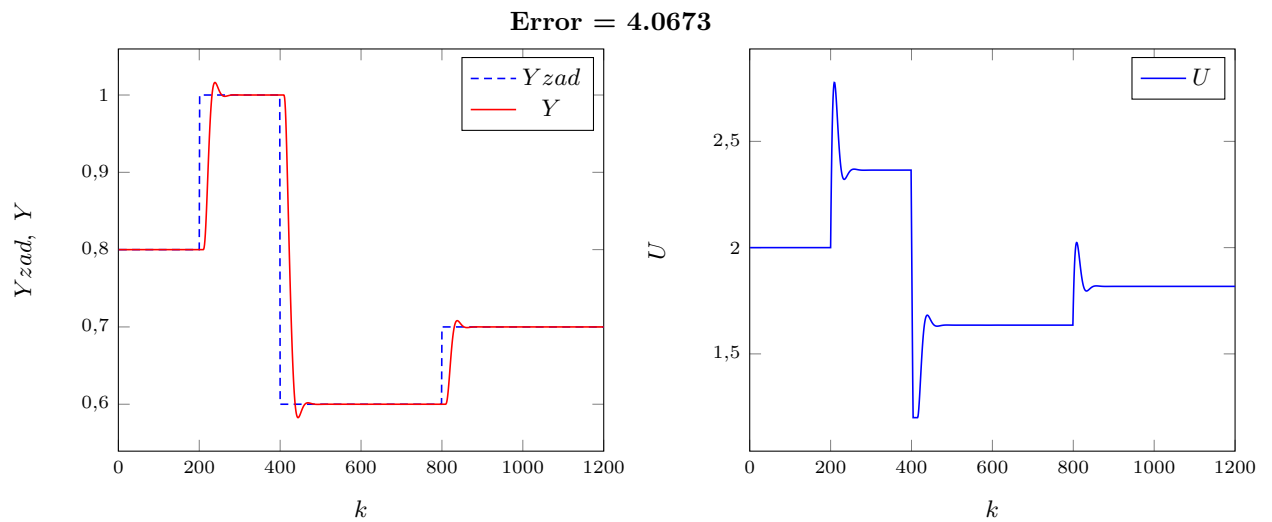
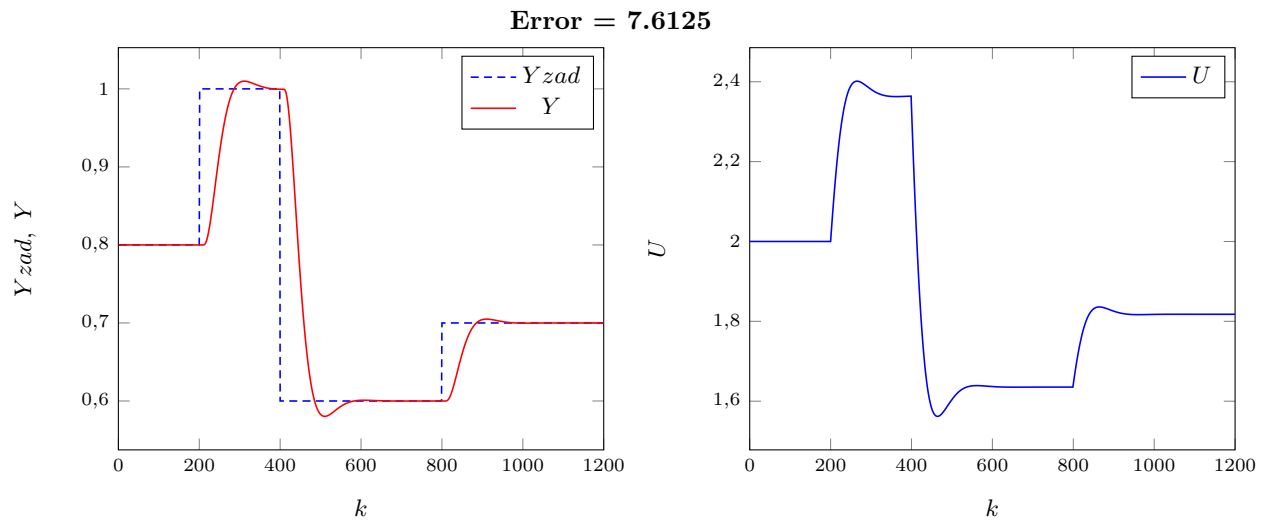
Rys. 4.10. Sterowanie dla  $K_r=0,8$ ,  $T_i=5$ ,  $T_d=0,05$

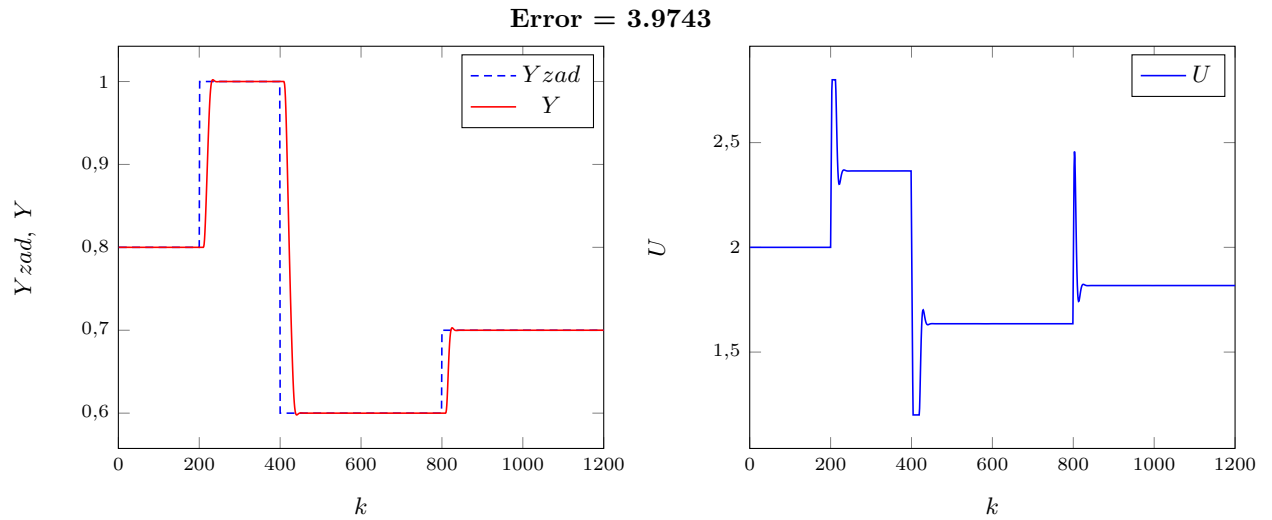
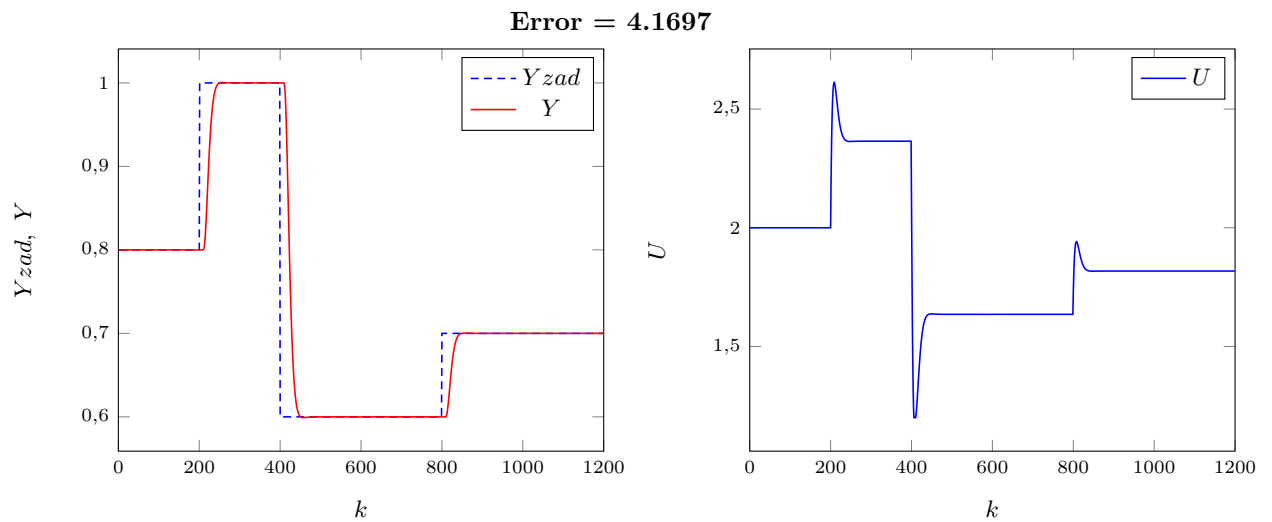
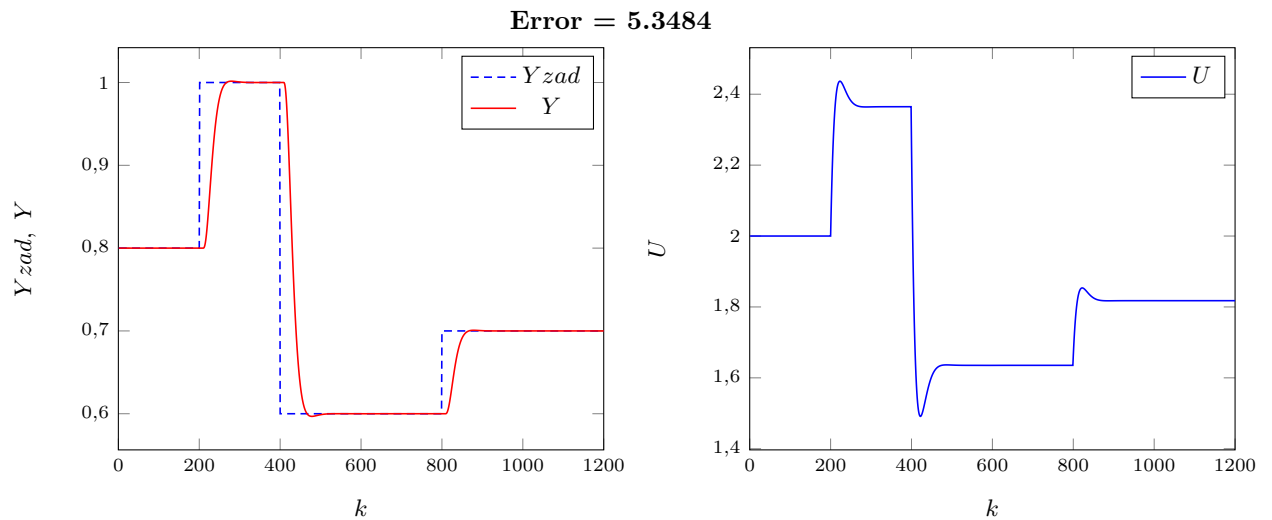


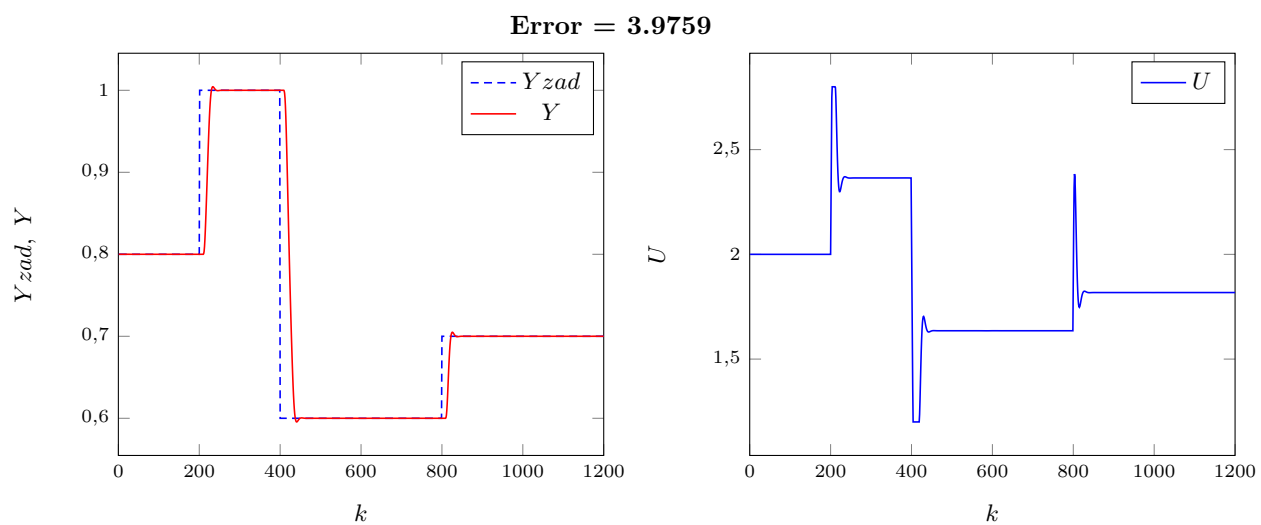
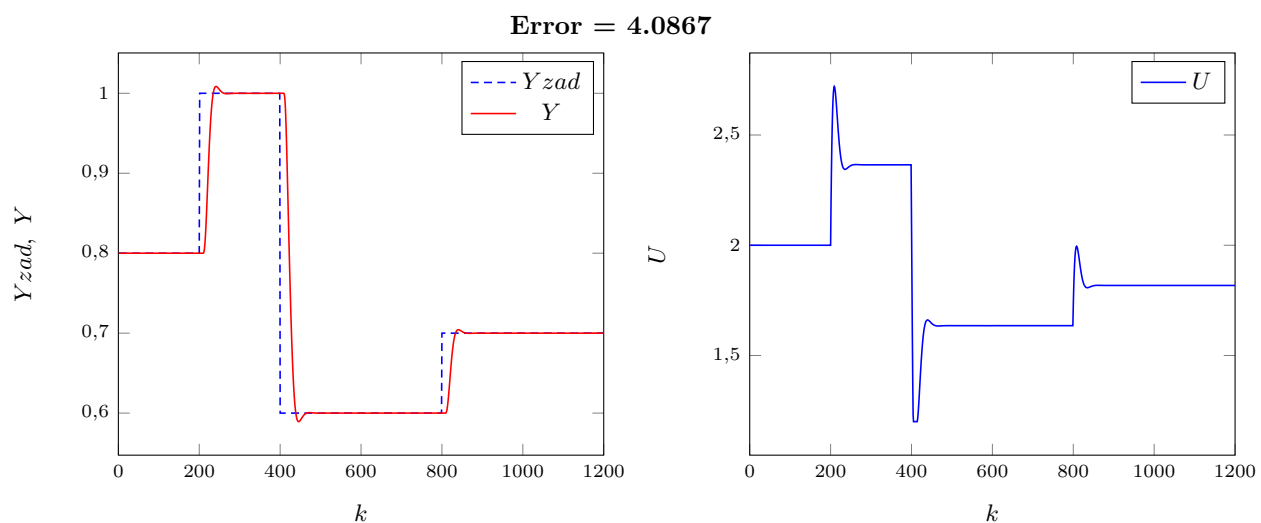
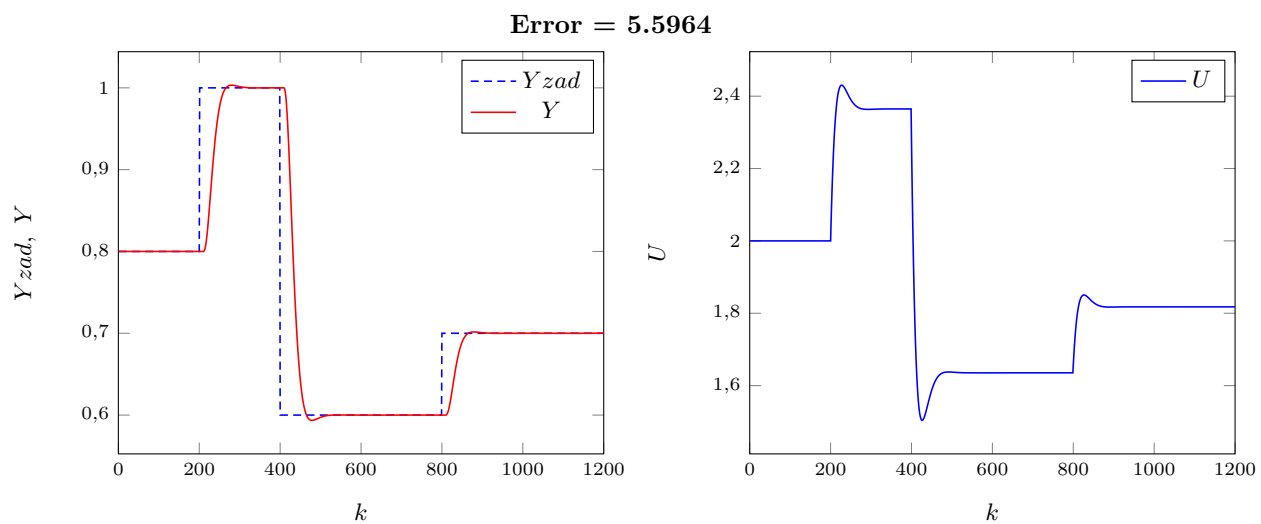
Rys. 4.11. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.12. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.13. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 5$

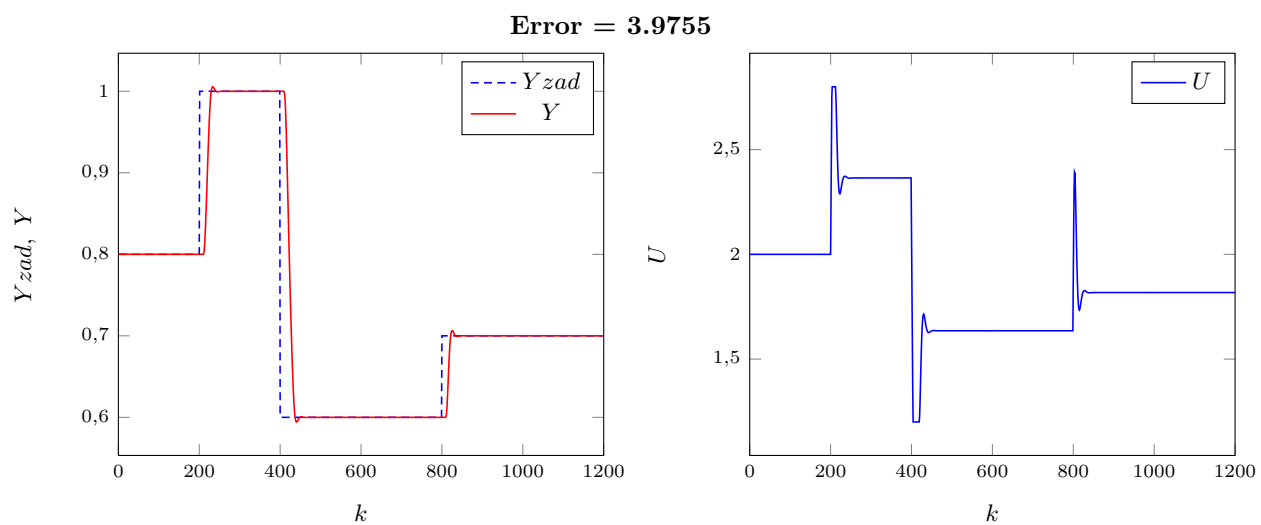
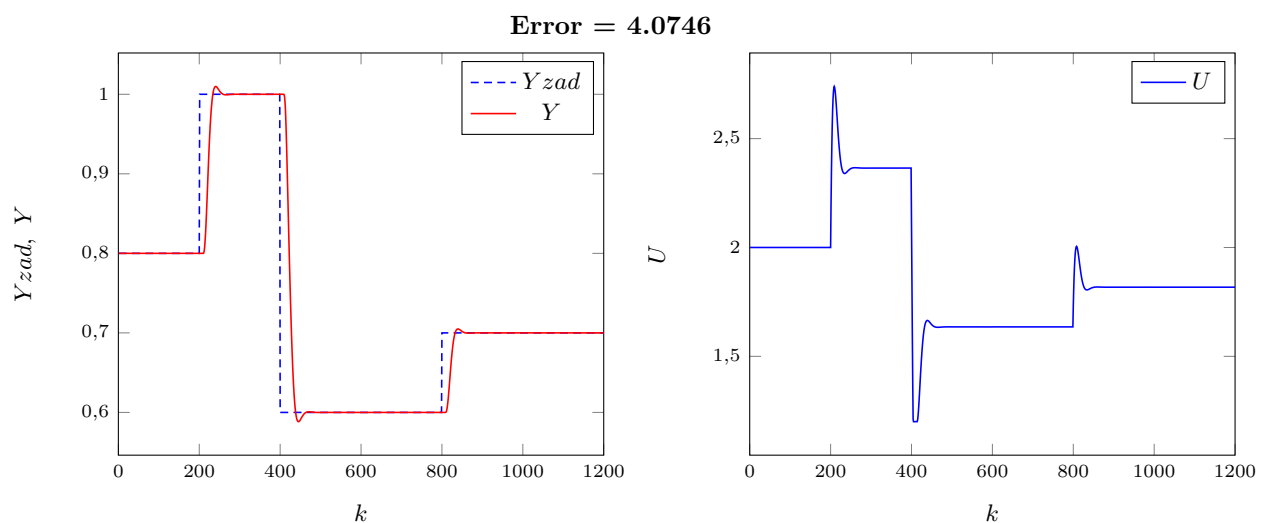
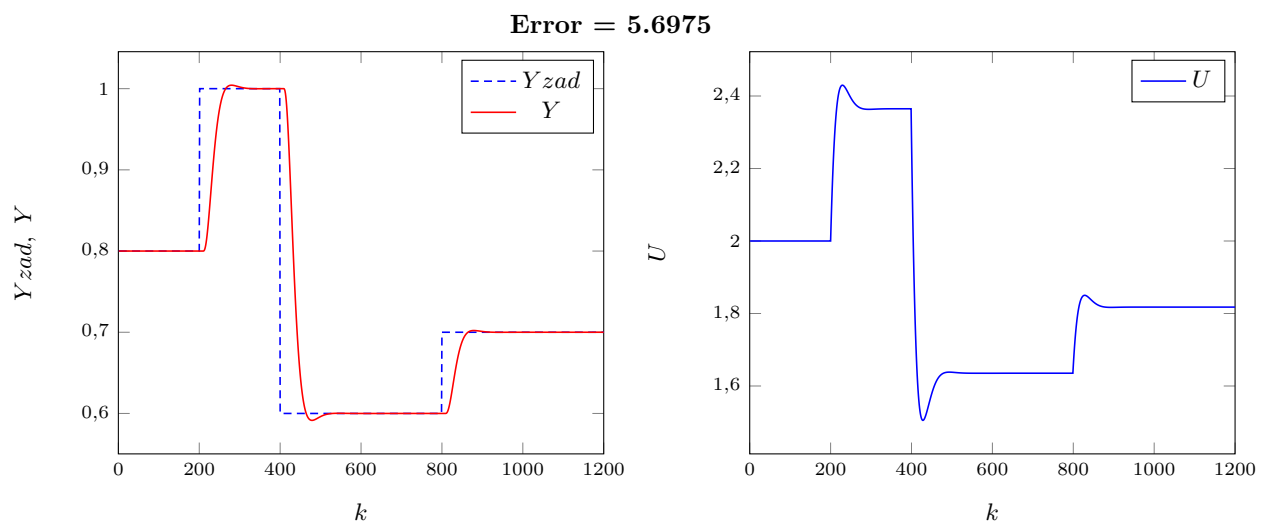
Rys. 4.14. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.15. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.16. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 5$

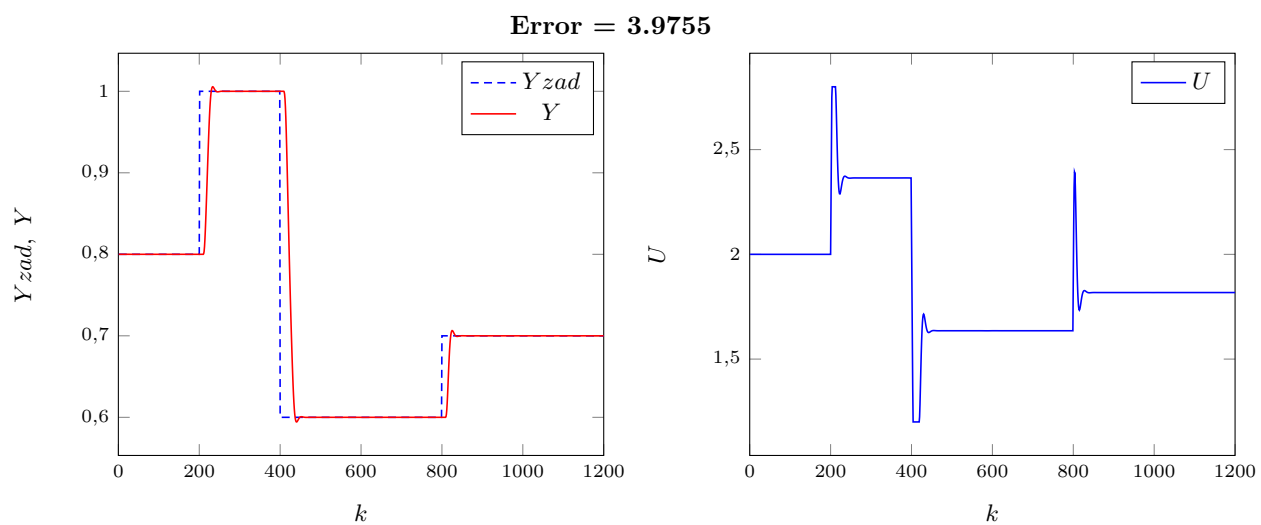
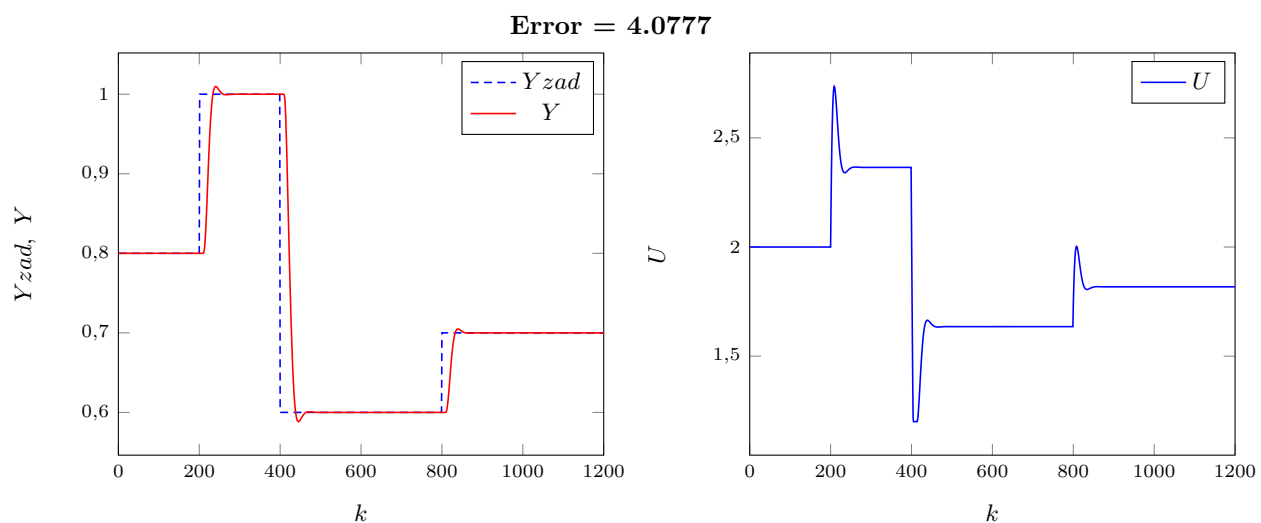
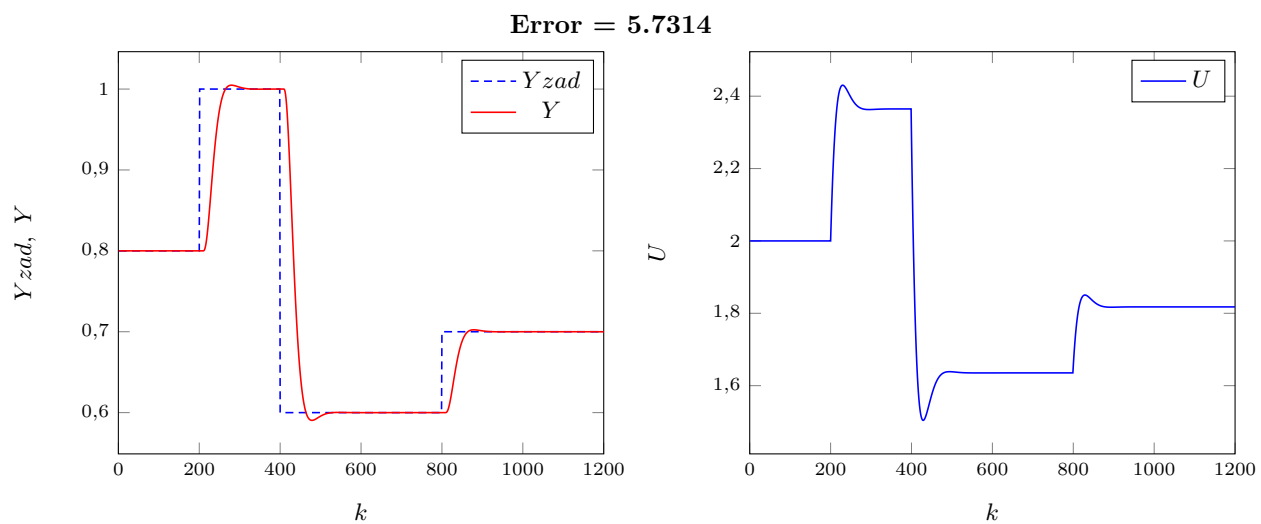
Rys. 4.17. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.18. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.19. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 5$

Rys. 4.20. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.21. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.22. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 25$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 5$

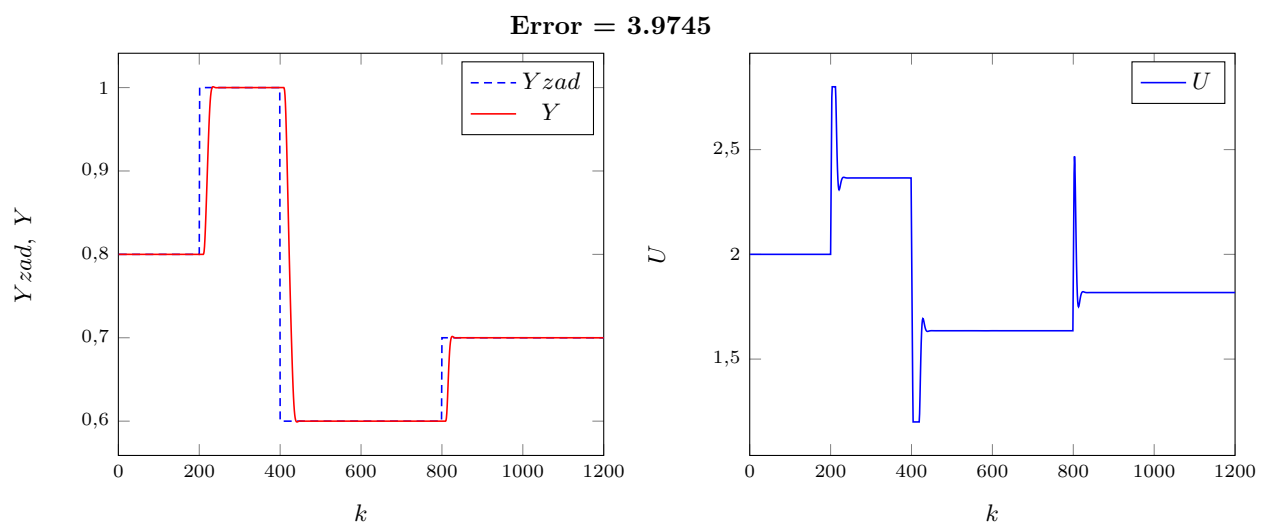
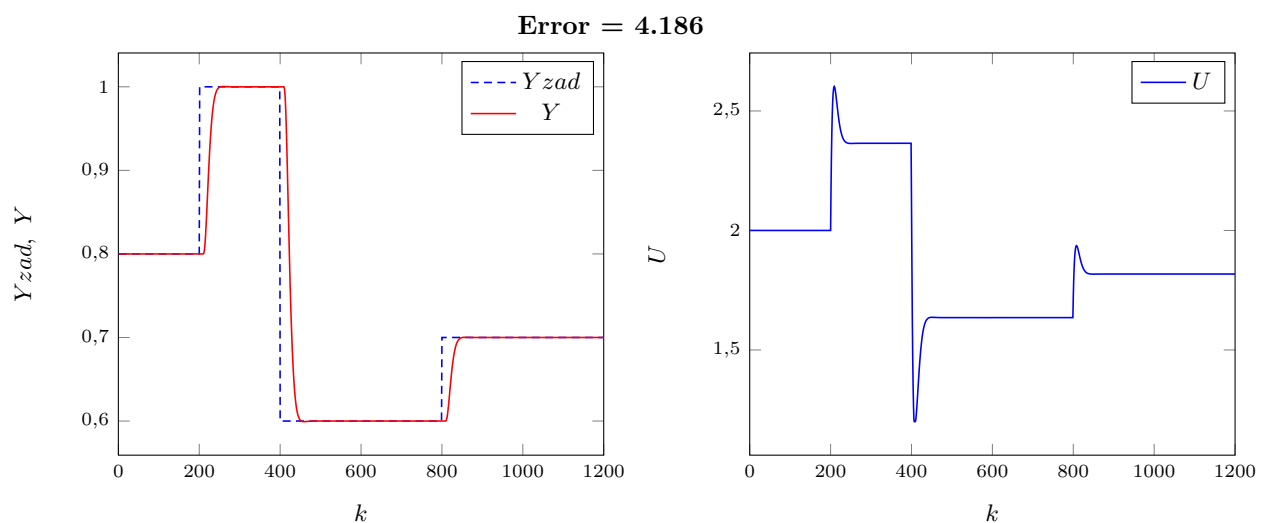
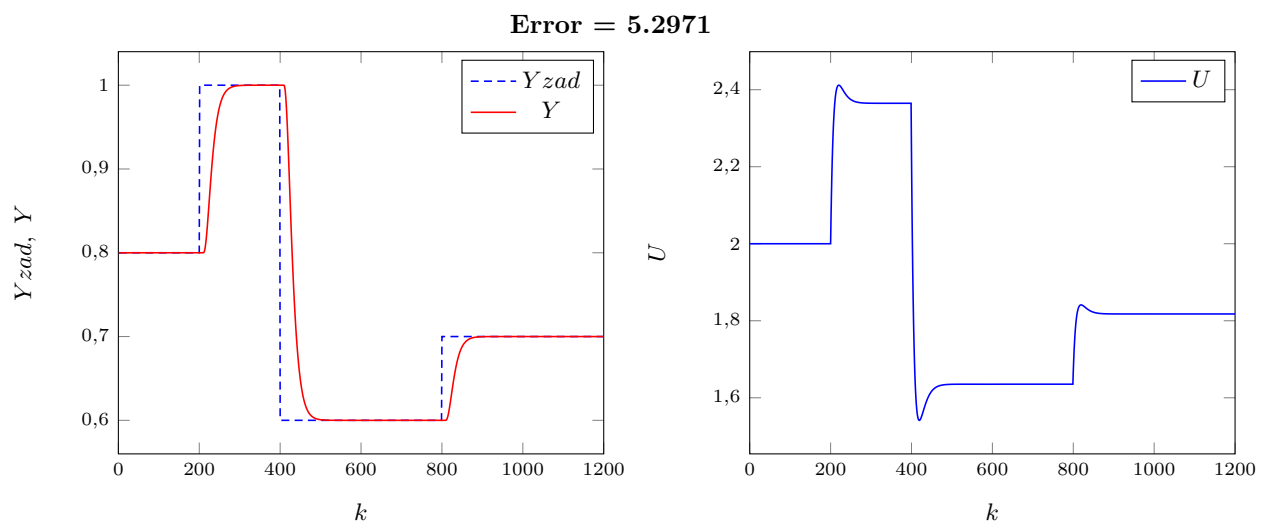
Rys. 4.23. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.24. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.25. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 5$

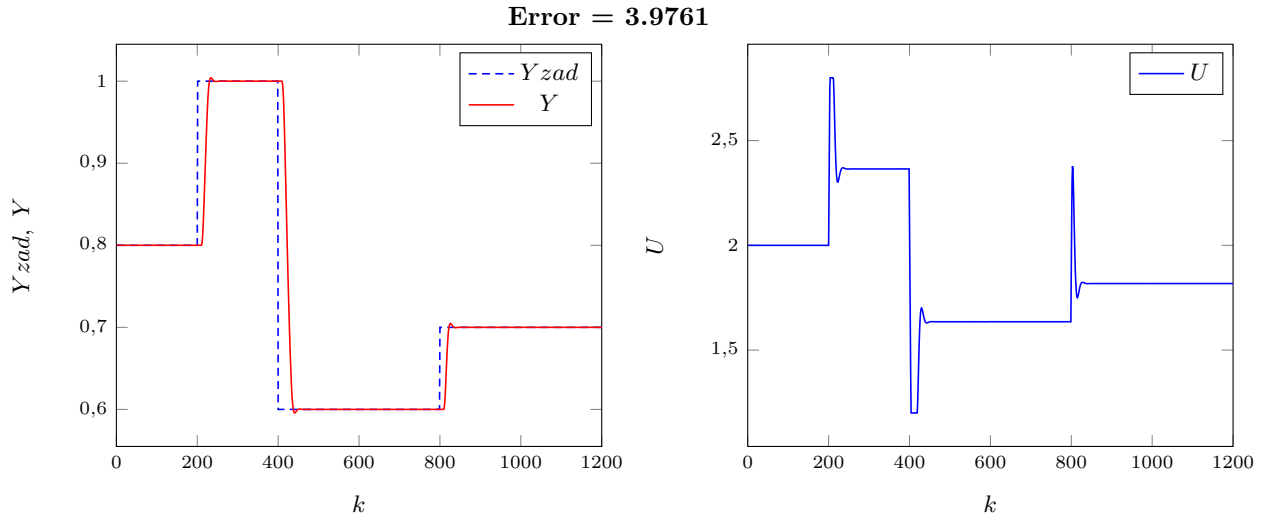
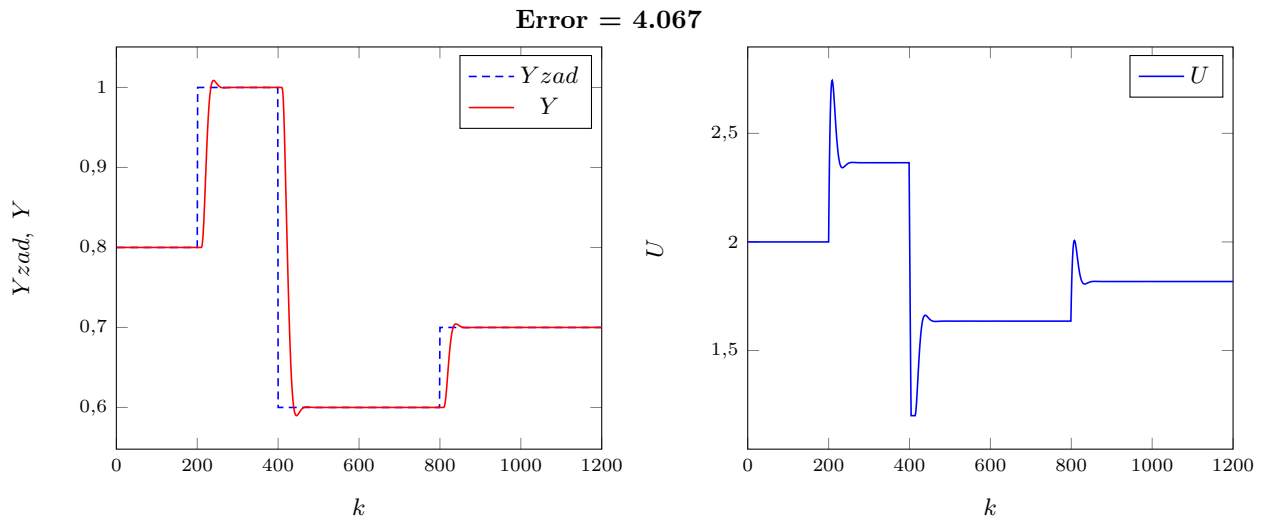
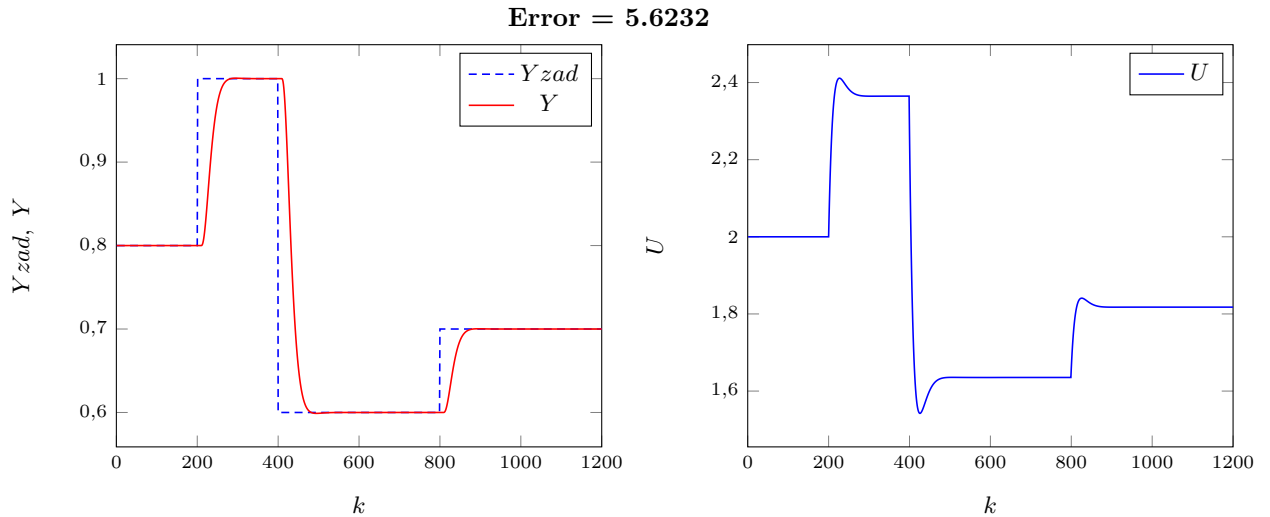
Rys. 4.26. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.27. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.28. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 5$

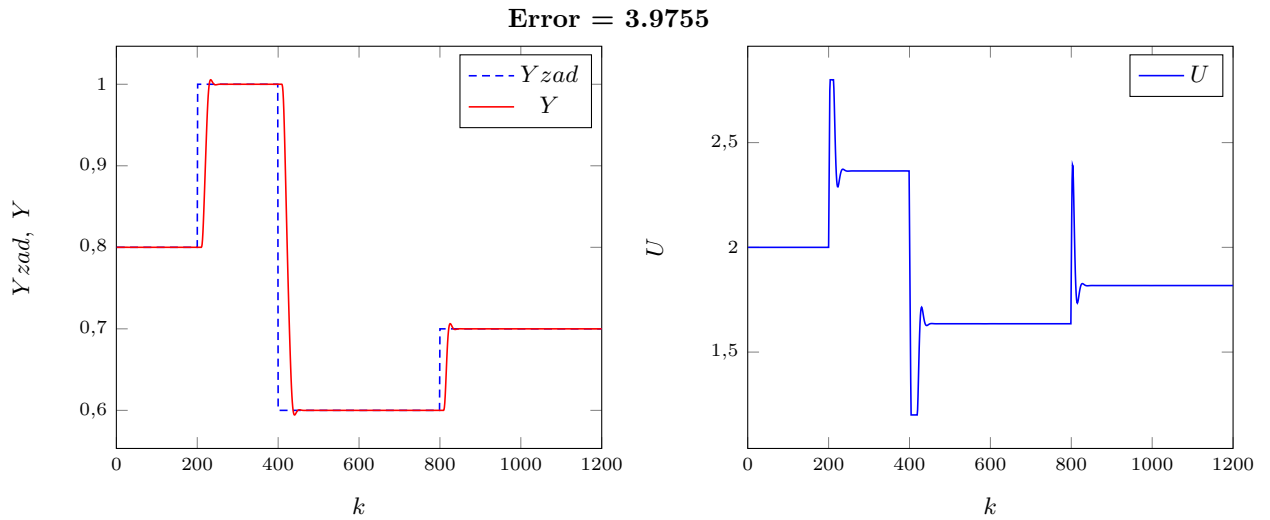
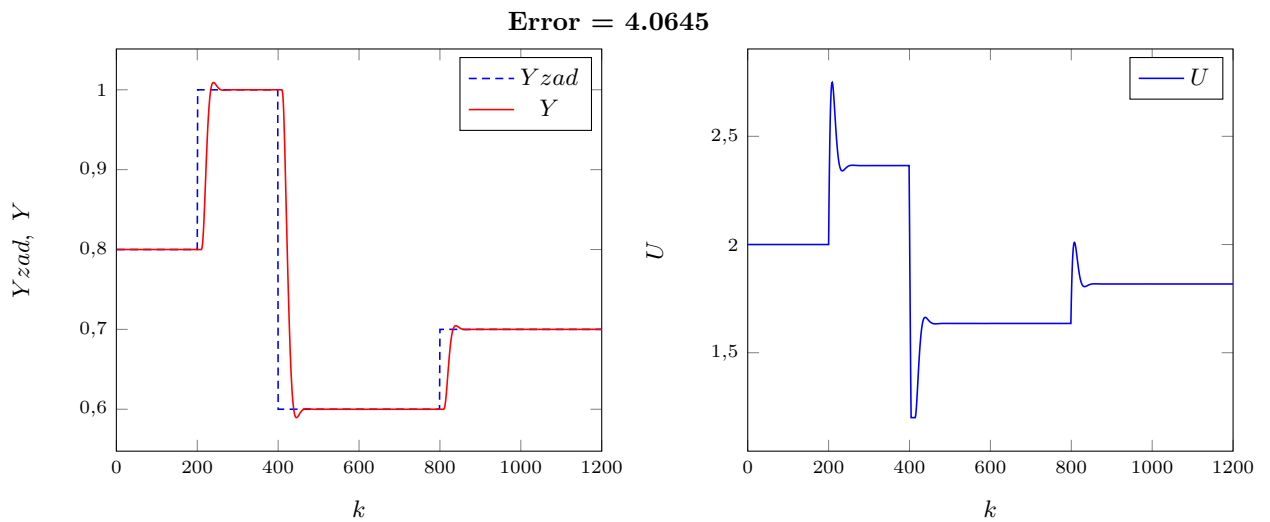
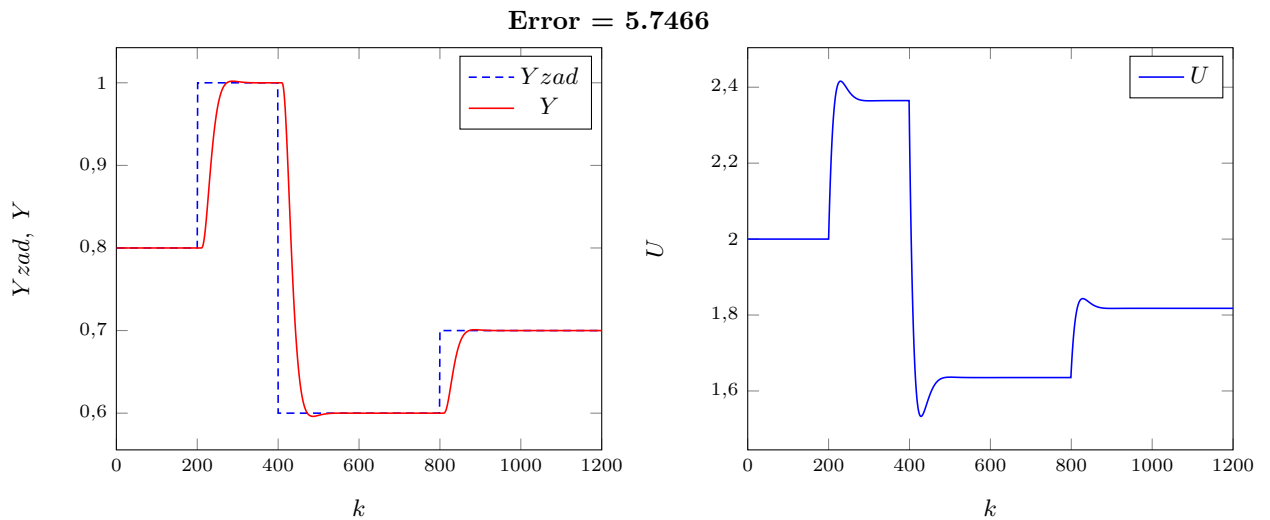
Rys. 4.29. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.30. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.31. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 5$

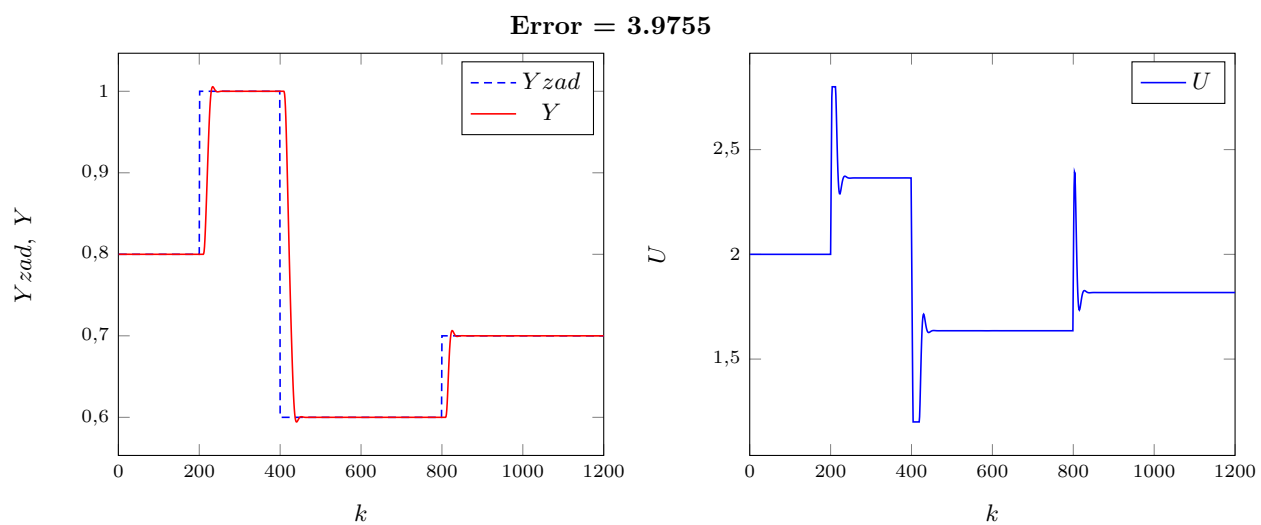
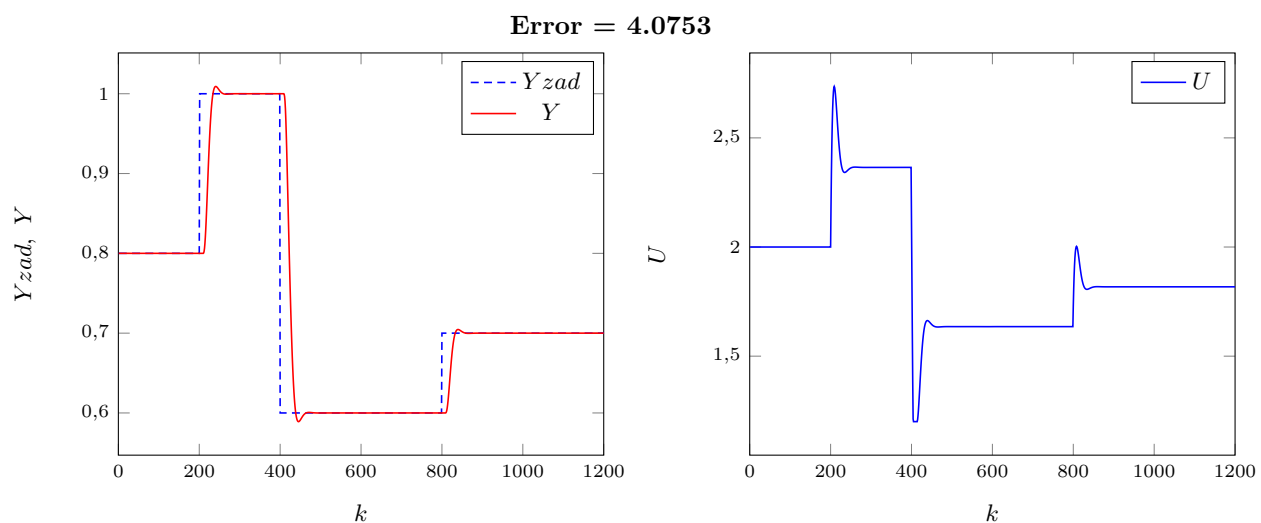
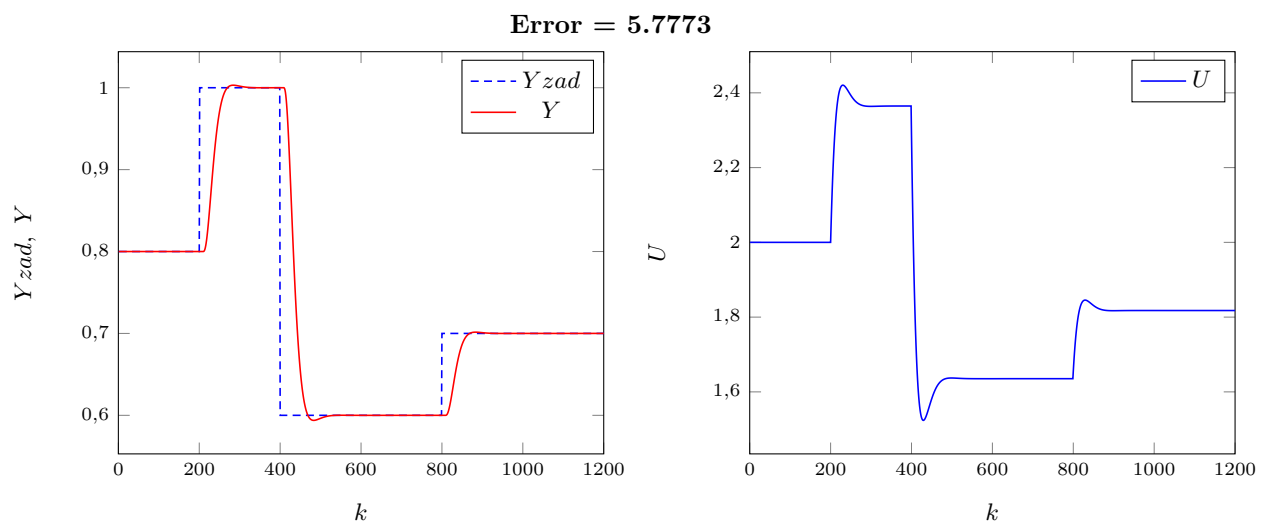
Rys. 4.32. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.33. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.34. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 50$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 5$

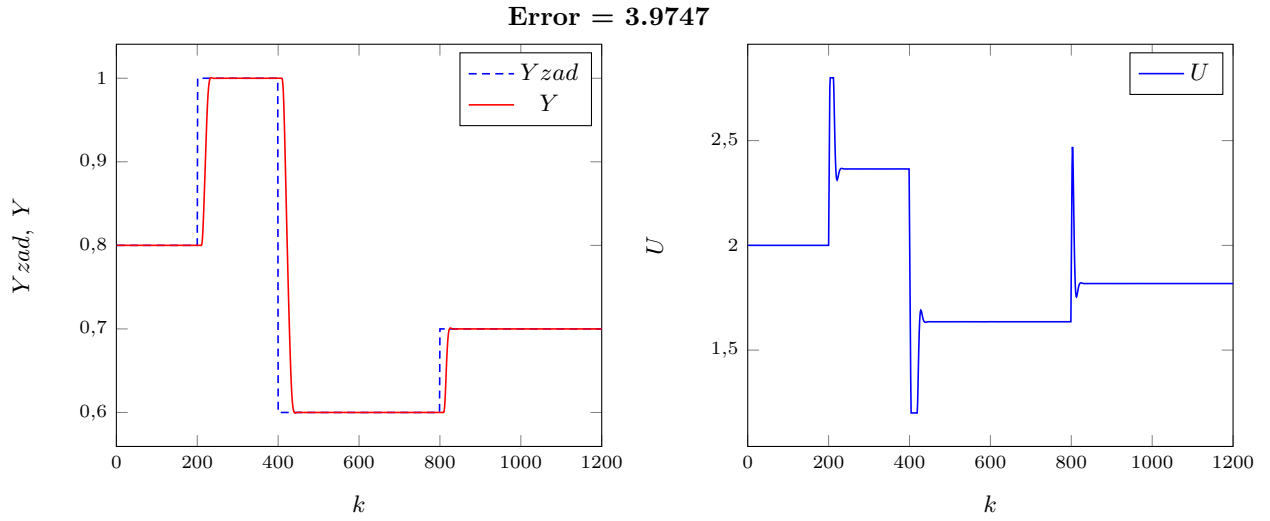
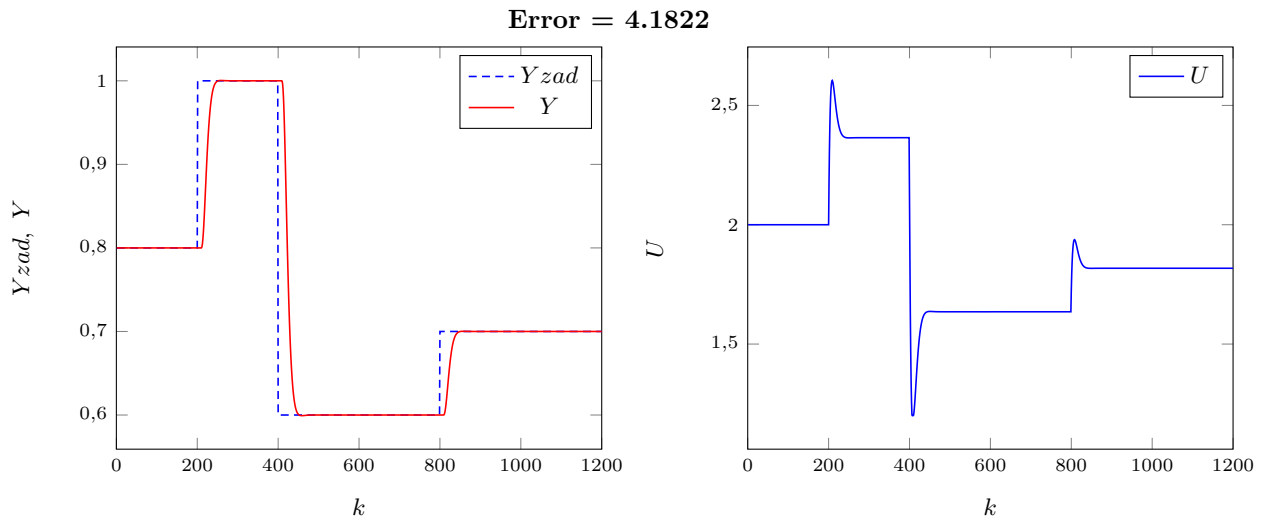
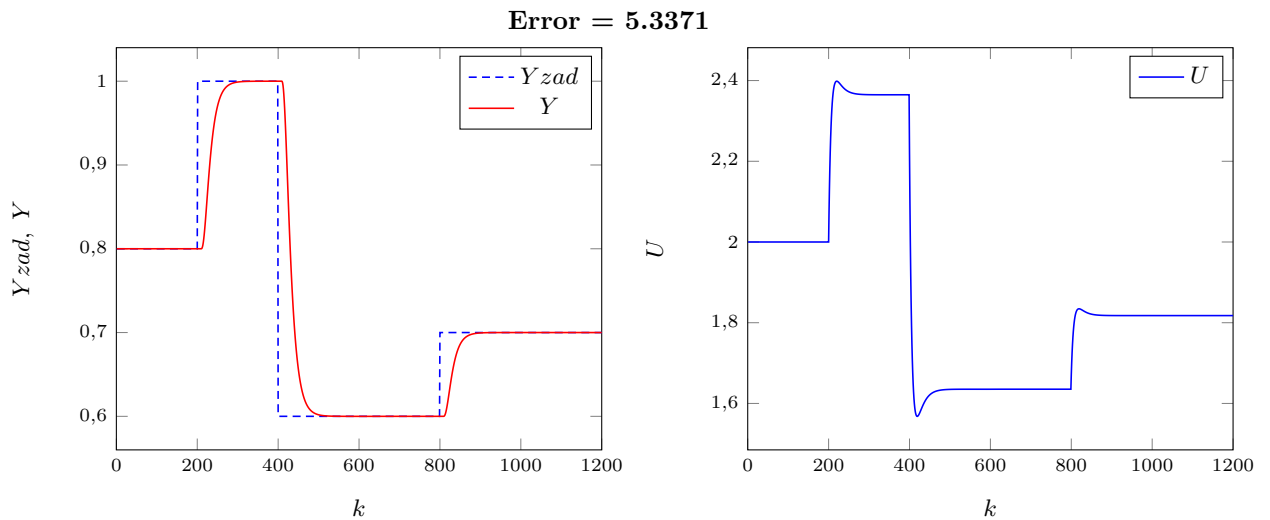


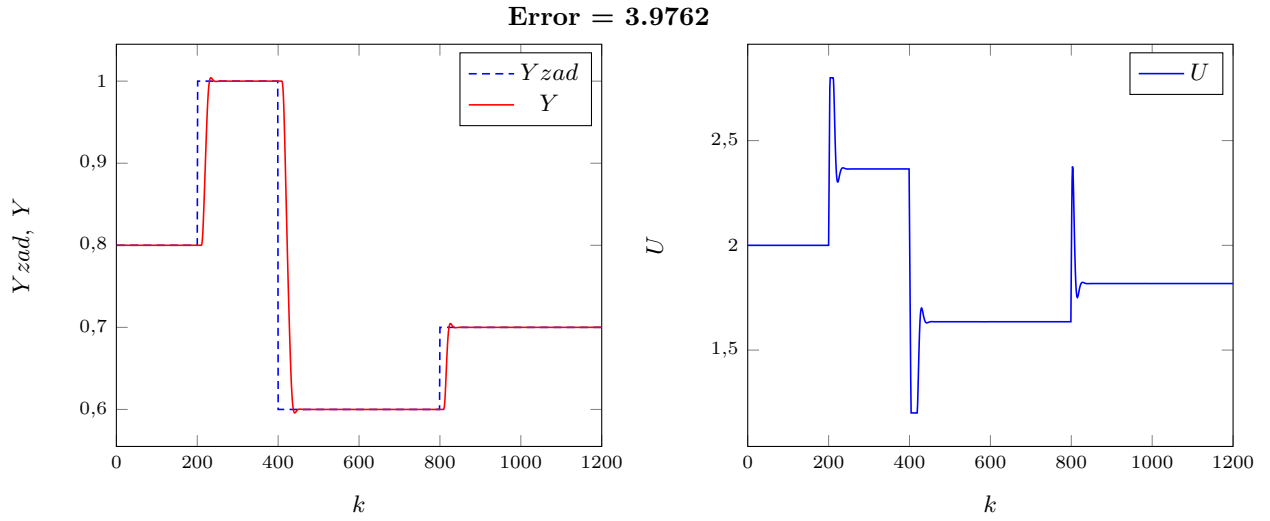
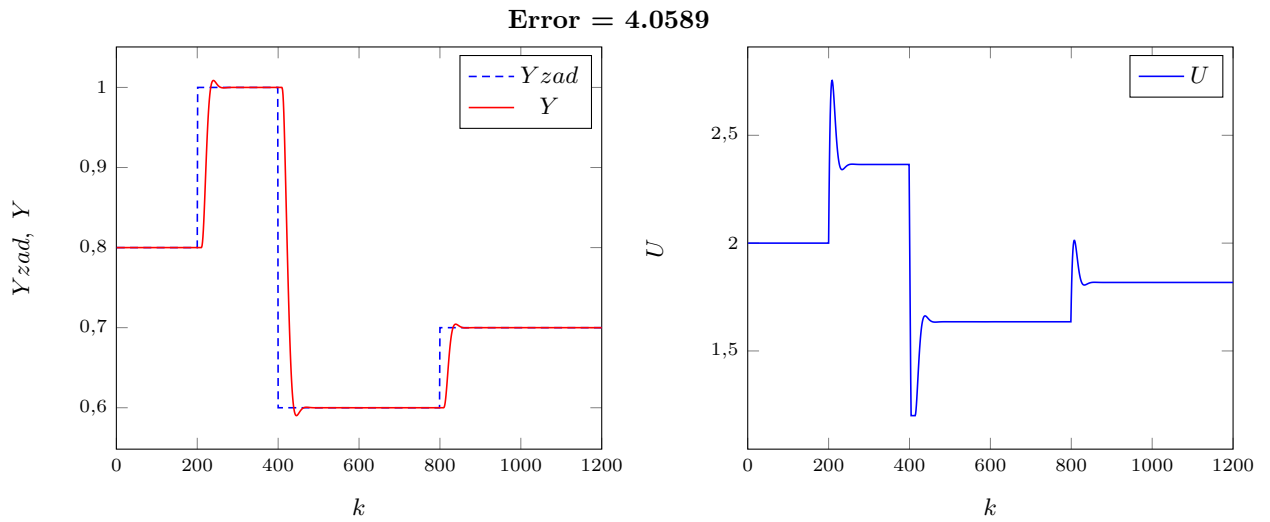
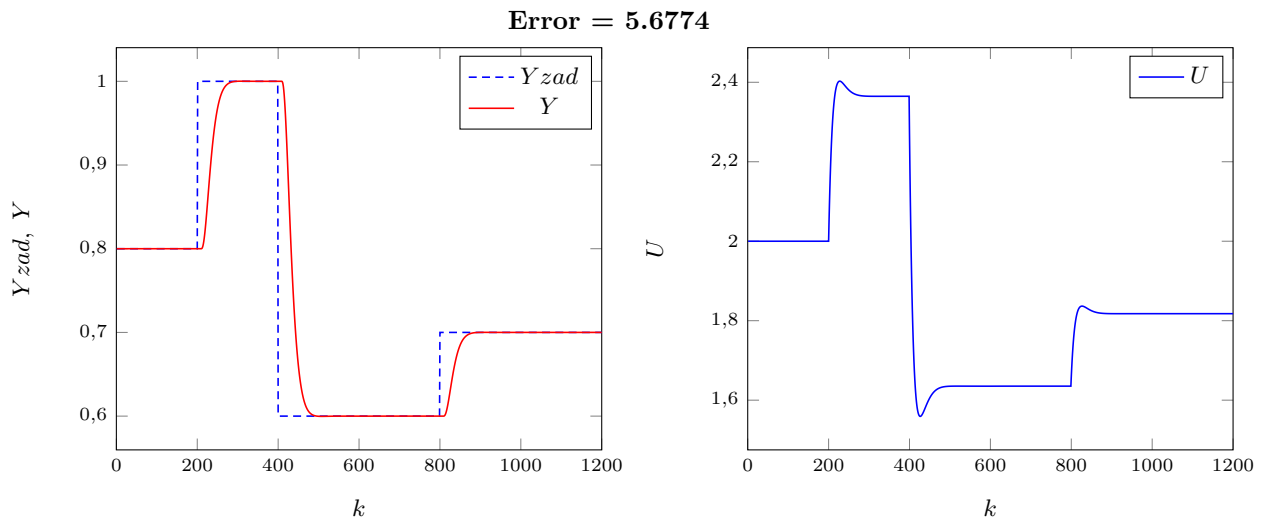
Rys. 4.35. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.36. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.37. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 5$

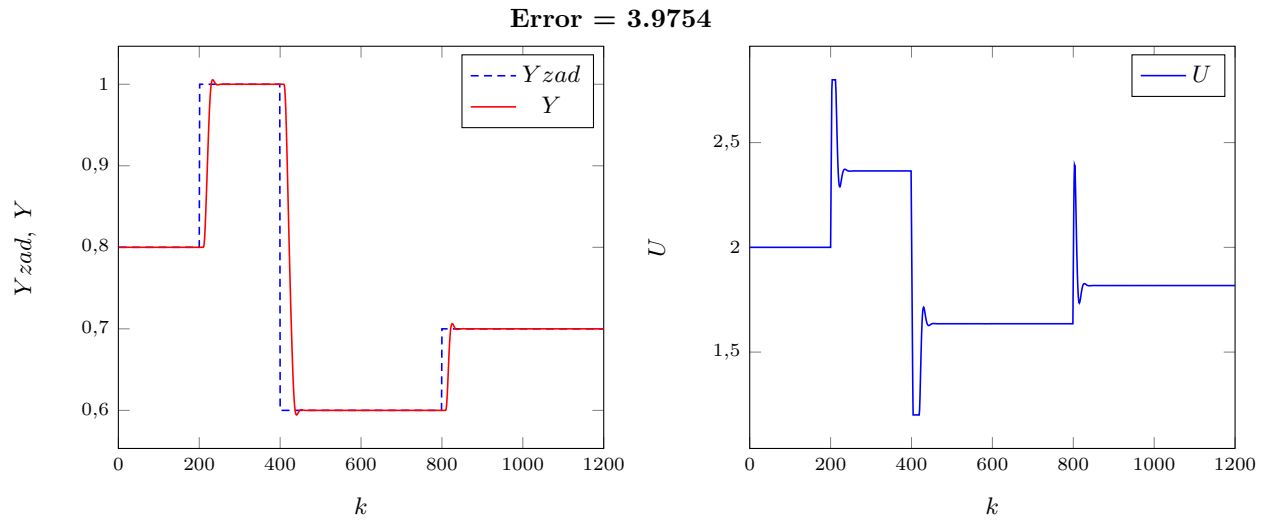
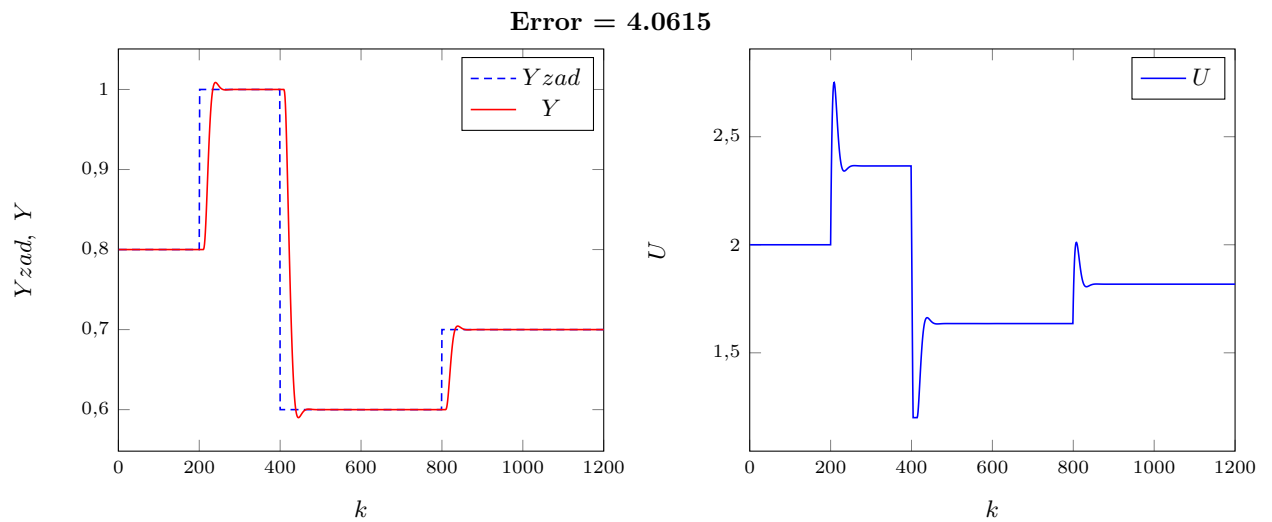
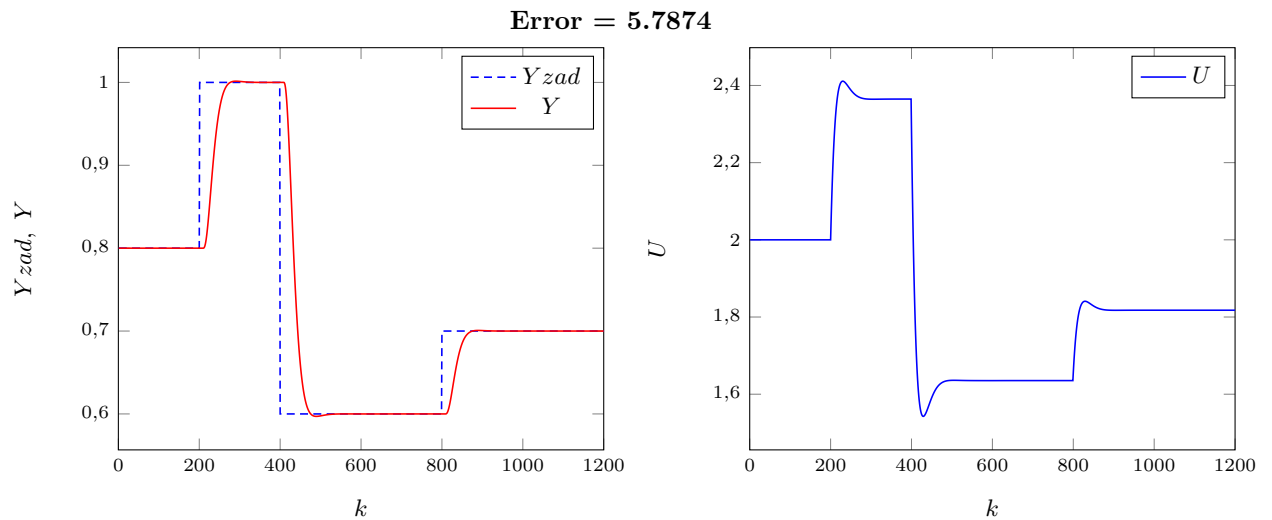
Rys. 4.38. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.39. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.40. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 5$

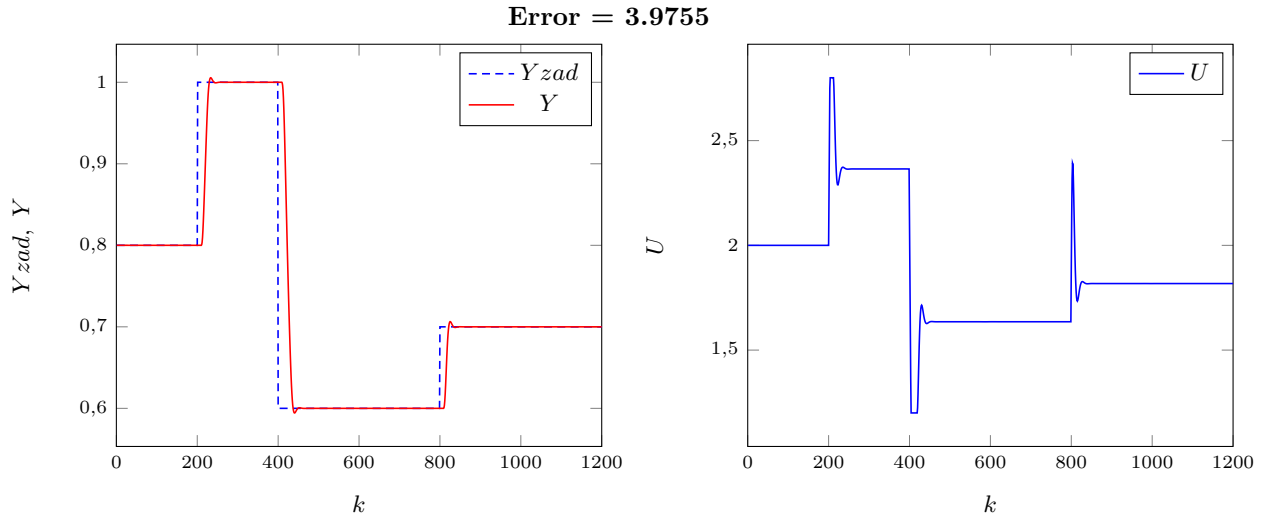
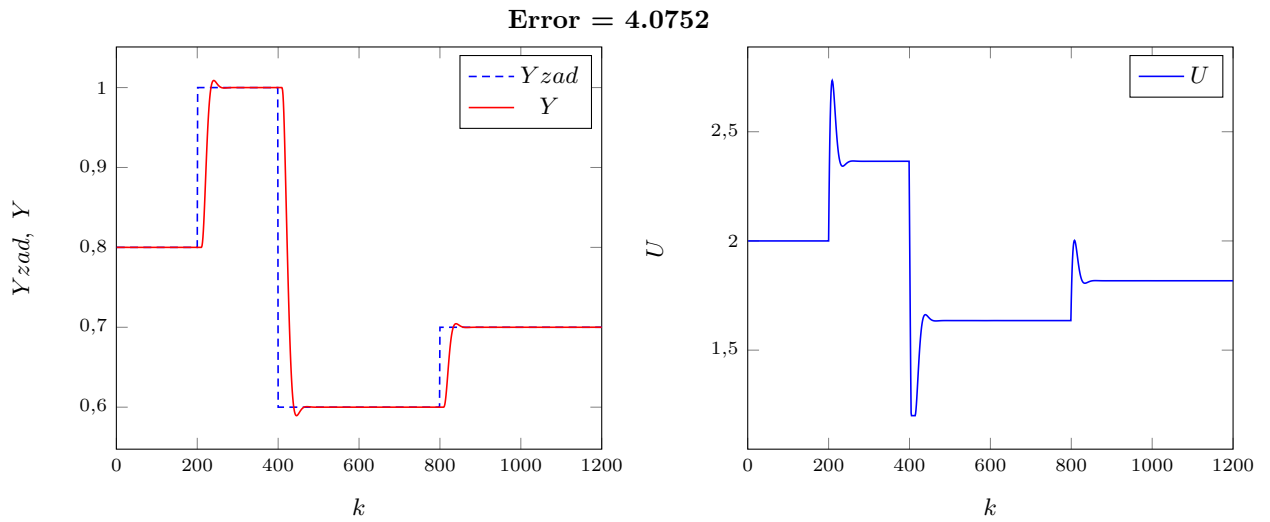
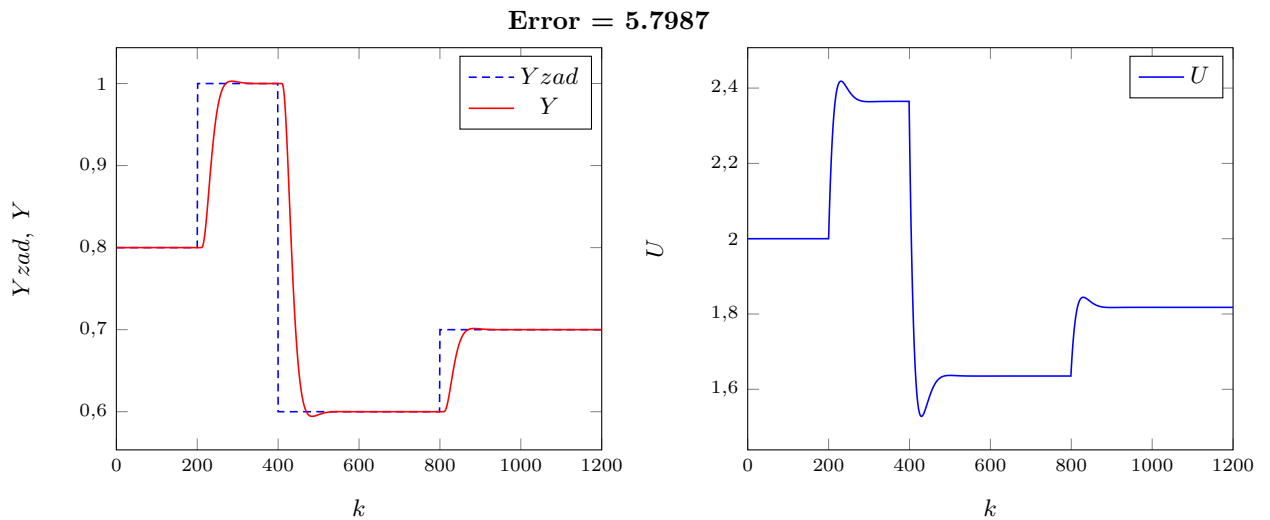
Rys. 4.41. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.42. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.43. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 5$

Rys. 4.44. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.45. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.46. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 75$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 5$

Rys. 4.47. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.48. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.49. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 5$ ,  $\lambda = 5$

Rys. 4.50. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.51. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.52. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 10$ ,  $\lambda = 5$

Rys. 4.53. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.54. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.55. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 15$ ,  $\lambda = 5$

Rys. 4.56. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 0.2$ Rys. 4.57. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 1$ Rys. 4.58. Przebieg oraz sterowanie dla parametrów  $N = 100$ ,  $Nu = 20$ ,  $\lambda = 5$