

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)**

**Sprawozdanie z projektu nr 5, zadanie nr 3**

**Sobolewski Konrad, Róžański Antoni, Giełdowski Daniel**

**Warszawa, 2017**

# Spis treści

<b>1. Opis obiektu</b>	2
<b>2. Zadanie 1: Weryfikacja punktu pracy</b>	3
<b>3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe</b>	4
3.1. Odpowiedzi skokowe	4
<b>4. Zadanie 3: Algorytmy PID i DMC</b>	5
4.1. Cyfrowy algorytm PID	5
4.2. Analityczny algorytm DMC	5
<b>5. Zadanie 4: Strojenie regulatorów</b>	9
5.1. PID	9
5.1.1. Konfiguracja	9
5.1.2. PID - konfiguracja pierwsza	11
5.1.3. PID - konfiguracja druga	28
5.1.4. PID - konfiguracja trzecia	37
5.1.5. PID - konfiguracja czwarta	44
5.1.6. Wnioski	51
5.2. DMC	51
5.2.1. Pierwszy współczynnik $\psi$	54
5.2.2. Drugi współczynnik $\psi$	54
5.2.3. Trzeci współczynnik $\psi$	54
5.2.4. Pierwszy współczynnik $\lambda$	61
5.2.5. Drugi współczynnik $\lambda$	61
5.2.6. Trzeci współczynnik $\lambda$	61
5.2.7. Czwarty współczynnik $\lambda$	68
5.2.8. Wnioski	68
<b>6. Zadanie 5: Automatyczne dobieranie nastaw</b>	71
6.1. PID	71
6.1.1. Konfiguracja pierwsza	71
6.1.2. Konfiguracja druga	74
6.1.3. Konfiguracja trzecia	77
6.1.4. Konfiguracja czwarta	80
6.2. DMC	83
6.2.1. Wnioski	86
<b>7. Zadanie 6: Uproszczony obliczeniowo DMC</b>	87

# 1. Opis obiektu

Obiekt używany w projekcie opisany jest daną przez prowadzącego funkcją:

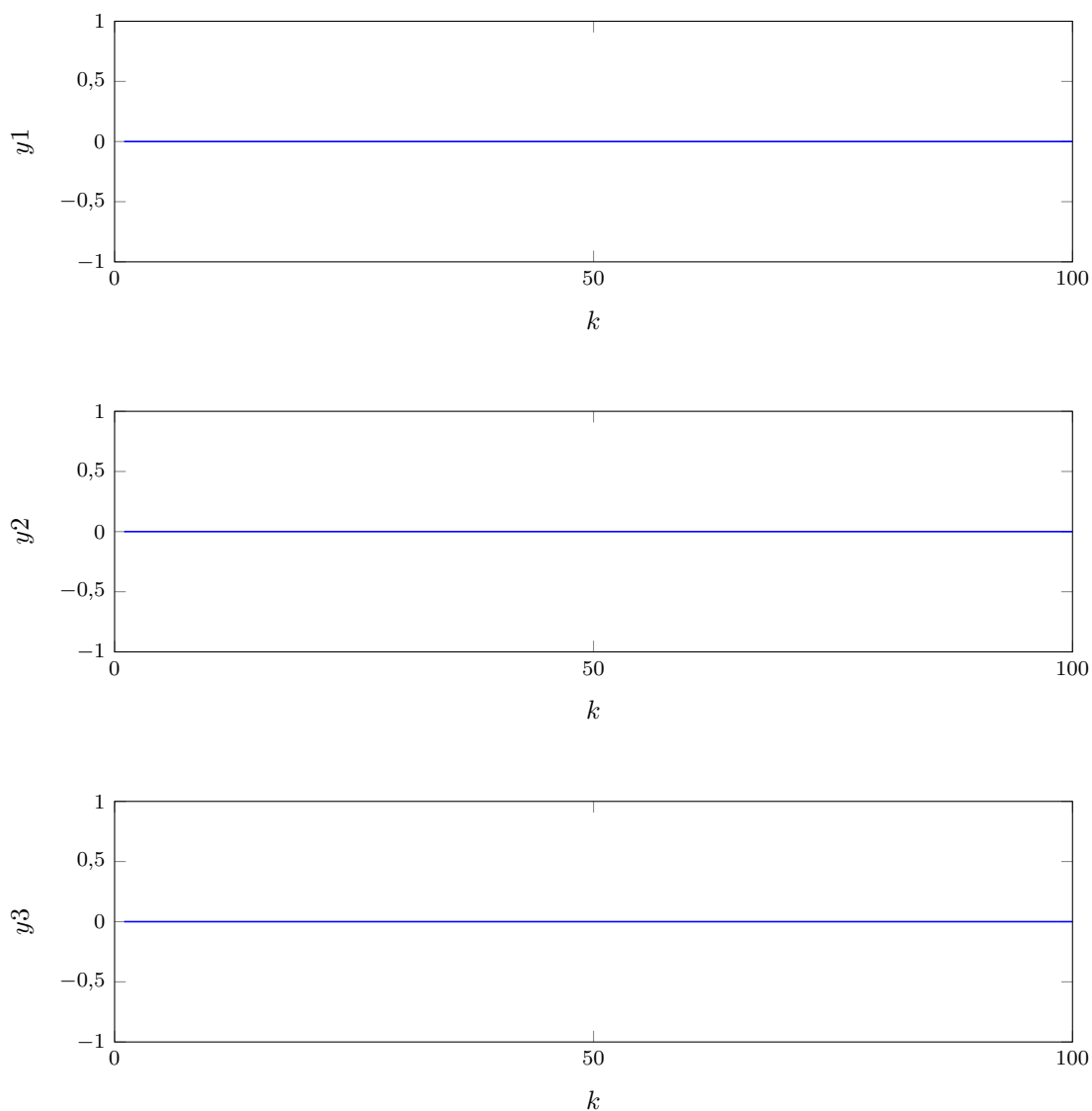
$$\begin{aligned}[y1(k), y2(k), y3(k)] = & \text{symulacja\_obektu3}(u1(k-1), u1(k-2), u1(k-3), u1(k-4), \\ & u2(k-1), u2(k-2), u2(k-3), u2(k-4), \\ & u3(k-1), u3(k-2), u3(k-3), u3(k-4), \\ & u4(k-1), u4(k-2), u4(k-3), u4(k-4), \\ & y1(k-1), y1(k-2), y1(k-3), y1(k-4), \\ & y2(k-1), y2(k-2), y2(k-3), y2(k-4), \\ & y3(k-1), y3(k-2), y3(k-3), y3(k-4))\end{aligned}$$

gdzie  $k$  jest aktualną chwilą symulacji sygnału próbkowanego.

Wartości sygnałów w punkcie pracy ( w stanie ustalonym ) mają wartość  $u1 = u2 = u3 = u4 = y1 = y2 = y3 = 0$ . Okres próbkowania obiektu wynosi  $T_p = 0,5s$ .

## 2. Zadanie 1: Weryfikacja punktu pracy

Pierwszym poleceniem było zweryfikowanie poprawności punktu pracy obiektu. Udało się to osiągnąć za pomocą prostego sprawdzenia, przy jakich wartościach wyjść stabilizuje się obiekt przy stałym sterowaniu, równym jego wartości w punkcie pracy ( $U1_{pp} = 0$ ,  $U2_{pp} = 0$ ,  $U3_{pp} = 0$ ,  $U4_{pp} = 0$ ). Eksperyment potwierdził wcześniej podane wartości wyjść ( $Y1_{pp} = 0$ ,  $Y2_{pp} = 0$ ,  $Y3_{pp} = 0$ ), a jego przebieg obrazuje wykres 2.1.

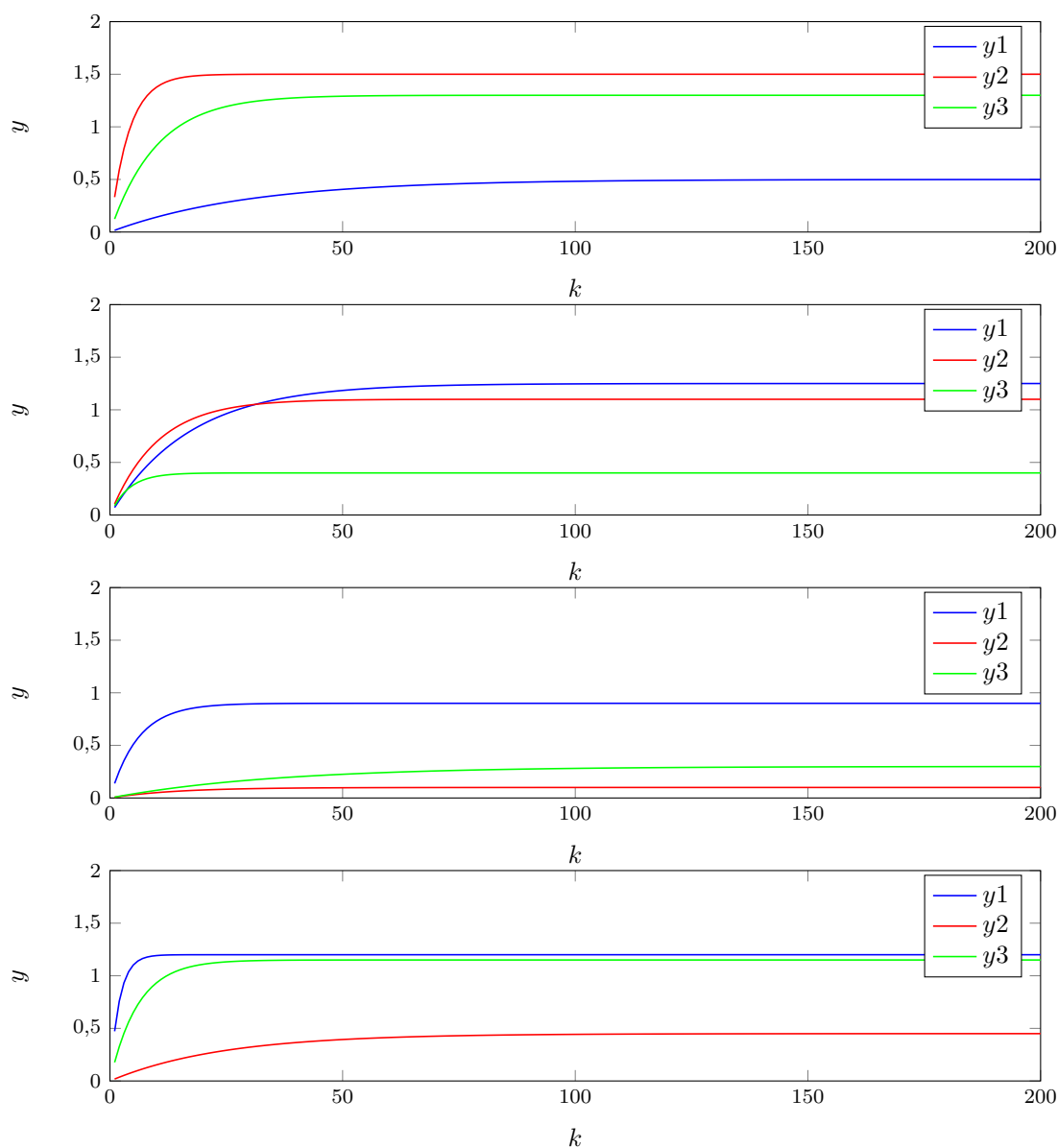


Rys. 2.1. Zachowanie obiektu w punkcie pracy

## 3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe

### 3.1. Odpowiedzi skokowe

W tej części projektu należało wyznaczyć symulacyjnie wszystkie odpowiedzi skokowe (rys. 3.1). Eksperyment zakładał, iż obiekt będzie na początku w punkcie pracy, a następnie zostanie wykonany skok jednostkowy jednego z sygnałów sterujących. Poniżej przedstawiono odpowiedzi jednostkowe wszystkich wyjść dla skoków wszystkich sygnałów sterujących.



Rys. 3.1. Wartości wyjść po skokach jednostkowych sterowań kolejno:  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  i  $u_4$

## 4. Zadanie 3: Algorytmy PID i DMC

### 4.1. Cyfrowy algorytm PID

W projekcie został wykorzystany regulator cyfrowy *PID*, którego parametry są opisane poniższymi wzorami, gdzie  $K$  - wzmocnienie członu P,  $T_p$  - czas próbkowania,  $T_i$  - czas zdwojenia członu całkującego  $I$ ,  $T_d$  - czas wyprzedzenia członu różniczkującego  $D$ ,  $n_u$  - ilość sterowań,  $n_y$  - ilość wyjść.

$$r_0^j = K^j * (1 + T_p/(2 * T_i^j) + T_d^j/T_p) \quad \forall j \in < 1, n_u > \quad (4.1)$$

$$r_1^j = K^j * (T_p/(2 * T_i^j) - 2 * T_d^j/T_p - 1) \quad \forall j \in < 1, n_u > \quad (4.2)$$

$$r_2^j = K * T_d^j/T_p \quad \forall j \in < 1, n_u > \quad (4.3)$$

W każdej iteracji pętli sterowania są obliczane uchyby wyjść obiektu.

$$e(k)^j = y^{\text{zad}}(k)^j - y(k)^j \quad \forall j \in < 1, n_y > \quad (4.4)$$

Sterowania regulatora zostają wyliczone na bieżącą chwilę przy użyciu wzoru:

$$U(k)^j = r_2^j * e(k-2)^i + r_1^j * e(k-1)^i + r_0^j * e(k)^i + u(k-1)^j \quad \text{gdzie} \quad j \in < 1, n_u >, \quad i \in < 1, n_y > \quad (4.5)$$

Każdemu wyjściu przypada jedno sterowanie, przy tym każde sterowanie może być wykorzystane tylko do jednego wyjścia, a każde wyjście ma przyporządkowane inne sterowanie. Ponieważ w naszym przykładzie mamy 3 wyjścia i 4 wejścia, to jedno z wejść będziemy musieli odrzucić.

### 4.2. Analityczny algorytm DMC

Do obliczeń wykorzystujemy następujące wzory:

$$\mathbf{y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{\text{zad}}(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix}_{n_y \times 1} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}(k) \end{bmatrix}_{n_y \times 1} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_{n_u}(k) \end{bmatrix}_{n_u \times 1} \quad (4.8)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \vdots \\ \Delta u_{n_u}(k) \end{bmatrix}_{n_u \times 1} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \begin{bmatrix} y(k|k) \\ \vdots \\ y(k|k) \end{bmatrix}_{N \times n_y \times 1} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y^{\text{zad}}(k|k) \\ \vdots \\ y^{\text{zad}}(k|k) \end{bmatrix}_{N \times n_y \times 1} \quad (4.11)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k + N_u - 1|k) \end{bmatrix}_{N_u \times n_u \times 1} \quad (4.12)$$

$$\Delta \mathbf{U}^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k - (D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times n_u \times 1} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{S}_l = \begin{bmatrix} s_l^{11} & s_l^{12} & \dots & s_l^{1n_u} \\ s_l^{21} & s_l^{22} & \dots & s_l^{2n_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_l^{n_y 1} & s_l^{n_y 2} & \dots & s_l^{n_y n_u} \end{bmatrix}_{n_y \times n_u}, l = 1, \dots, D. \quad (4.14)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & S_{N-1} & \dots & S_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times (N_u \times n_u)} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{M}^P = \begin{bmatrix} S_2 - S_1 & S_3 - S_2 & \dots & S_D - S_{D-1} \\ S_3 - S_1 & S_4 - S_2 & \dots & S_{D+1} - S_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N+1} - S_1 & S_{N+2} - S_2 & \dots & S_{N+D-1} - S_{D-1} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times ((D-1) \times n_u)} \quad (4.16)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_{1,1} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \psi_{1,n_y} & & & \\ & & & \psi_{2,1} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \psi_{2,n_y} \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & \psi_{N,1} \\ & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & \psi_{N,n_y} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times (N \times n_y)} \quad (4.17)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{0,1} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \lambda_{0,n_u} & & \\ & & & \lambda_{1,1} & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \lambda_{1,n_u} \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & \lambda_{N_u-1,1} \\ & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & \lambda_{N_u-1,n_u} \end{bmatrix}_{(N_u * n_u) \times (N_u * n_u)} \quad (4.18)$$

$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) \quad (4.19)$$

$$K = (M^T \Psi M + \Lambda)^{-1} M^T \Psi \quad (4.20)$$

$$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) \quad (4.21)$$

W naszej regulacji potrzebujemy wyznaczyć tylko pierwszy element macierzy  $\Delta U(k)$  czyli  $\Delta u(k|k)$ . W tym celu rozwijamy macierz  $K$  do postaci:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_{N_u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,N} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{N_u,1} & k_{N_u,2} & \dots & k_{N_u,N} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

gdzie  $k_{i,j}$  jest macierzą o wymiarach  $n_u \times n_y$ , a co za tym idzie  $K_i$  jest macierzą o wymiarach  $n_u \times (N^* n_y)$ . Teraz prawo regulacji można zapisać:

$$\Delta u(k) = K_1(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) = K_1(Y^{zad}(k) - Y(k) - M^P \Delta U^P(k)) \quad (4.23)$$

Aktualne sterowanie otrzymujemy poprzez zsumowanie poprzedniego sterowania i aktualnie wyliczonego  $\Delta u(k|k)$ .

Dodatkowo nakład obliczeń można znacznie zmniejszyć jeszcze bardziej upraszczając to równanie (o co poproszono nas w zadaniu 6). W tym celu zmieniamy wzór regulacji na:

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - k_u \Delta U^P \quad (4.24)$$

gdzie:

$$e(k) = y^{zad}(k) - y(k) \quad (4.25)$$

Ponieważ nasze  $n_u = 4$  i  $n_y = 3$  to:

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} k_e^{1,1} & k_e^{1,2} & k_e^{1,3} \\ k_e^{2,1} & k_e^{2,2} & k_e^{2,3} \\ k_e^{3,1} & k_e^{3,2} & k_e^{3,3} \\ k_e^{4,1} & k_e^{4,2} & k_e^{4,3} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

gdzie dla każdego  $i$  oraz  $j$ ,  $k_e^{i,j}$  to suma elementów znajdujących się w wierszu  $i$ -tym licząc od  $j$ -tego elementu co 3 elementy.



$$k_u = K_1 M^P \quad (4.27)$$

## 5. Zadanie 4: Strojenie regulatorów

Następnym zadaniem było wyznaczenie optymalnych parametrów algorytmów PID i DMC odpowiednio za pomocą metody inżynierskiej(PID) i eksperymentalnej(DMC). Jakość regulacji oceniana była wizualnie - na podstawie wykresów - oraz obliczeniowo na podstawie wskaźnika jakości regulacji. Wzór na ten wskaźnik znajduje się poniżej.

$$E = \sum_{k=1}^{k_{kone}} (Y^{zad}(k) - Y(k))^2 \quad (5.1)$$

### 5.1. PID

Nastawy PID dobieramy włączając w tym samym czasie tylko jeden tor regulacji z istniejących trzech i dobierając jego parametry. Na końcu łączymy 3 tory i korygujemy nastawy. Strojąc jeden tor nie będziemy się przejmować innymi, więc nie umieszczaliśmy ich wykresów, a przedstawione wartości błędów będą sumą tylko z tego jednego toru.

#### 5.1.1. Konfiguracja

Ponieważ posiadamy 4 wejścia i 3 wyjścia w celu napisania regulatora PID jedno z wejść będziemy musieli odrzucić. Pozostaje zdecydować które. W tym celu tworzymy macierz wzmocnień KKK zawierającą wzmocnienia statyczne wszystkich torów procesów (wersy odzwierciedlają kolejne sterowania, a kolumny kolejne wyjścia).

$$KKK = \begin{bmatrix} 0,5 & 1,5 & 1,3 \\ 1,25 & 1,1 & 0,4 \\ 0,9 & 0,1 & 0,3 \\ 1,2 & 0,45 & 1,15 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Oczywiście już na jej podstawie moglibyśmy wybrać niezłą konfigurację wyjść, jednakże my szukamy najlepszej. W tym celu dzielimy macierz KKK na cztery macierze  $KK_i$  o wymiarach 3x3 usuwając za każdym razem inny wiersz (numer i nową macierz to numer usuniętego wiersza).

$$KK_1 = \begin{bmatrix} 1,25 & 1,1 & 0,4 \\ 0,9 & 0,1 & 0,3 \\ 1,2 & 0,45 & 1,15 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$KK_2 = \begin{bmatrix} 0,5 & 1,5 & 1,3 \\ 0,9 & 0,1 & 0,3 \\ 1,2 & 0,45 & 1,15 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$KK_3 = \begin{bmatrix} 0,5 & 1,5 & 1,3 \\ 1,25 & 1,1 & 0,4 \\ 1,2 & 0,45 & 1,15 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$KK_4 = \begin{bmatrix} 0,5 & 1,5 & 1,3 \\ 1,25 & 1,1 & 0,4 \\ 0,9 & 0,1 & 0,3 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Następnie obliczamy w Matlabie wskaźniki uwarunkowania tych macierzy, które wynoszą odpowiednio:

- $\text{cond}(\text{KK}_1)=6,7173$
- $\text{cond}(\text{KK}_2)=11,1599$
- $\text{cond}(\text{KK}_3)=4,2242$
- $\text{cond}(\text{KK}_4)=6,9254$

Następnie wybieramy tą, której wskaźnik jest najmniejszy (w naszym przypadku  $\text{KK}_3$ ) i obliczamy dla niej (w matlabie) macierz  $\text{KK}_i \cdot (\text{KK}_i^{-1})'$ . Następnie wybieramy z obliczonej macierzy 3 elementy, po jednym na każdy wiersz i kolumnę, mające wartości jak najbliższe jeden (wartości ujemne są wykluczone). Położenie tych elementów określa które sterowanie powinno odpowiadać któremu wyjściu. Poniżej przedstawiam wyniki tego równania dla wszystkich macierzy  $\text{KK}_i$ .

$$\text{Dla } \text{KK}_1 : \begin{bmatrix} 0,0383 & 1,1362 & -0,1744 \\ 1,4943 & -0,1465 & -0,3477 \\ -0,5325 & 0,0103 & 1,5222 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\text{Dla } \text{KK}_2 : \begin{bmatrix} 0,0153 & 1,5529 & -0,5683 \\ 1,5736 & 0,1511 & -0,7247 \\ -0,5890 & -0,7040 & 2,2929 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\text{Dla } \text{KK}_3 : \begin{bmatrix} -0,2888 & 0,7646 & 0,5242 \\ 0,7586 & 0,5768 & -0,3354 \\ 0,5302 & -0,3414 & 0,8112 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\text{Dla } \text{KK}_4 : \begin{bmatrix} -0,1447 & 0,0225 & 1,1223 \\ 0,3992 & 1,1198 & -0,5190 \\ 0,7455 & -0,1422 & 0,3967 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Normalnie wybralibyśmy jedynie konfigurację uzyskaną z macierzy o najniższym wskaźniku uwarunkowania ( $\text{KK}_3$ ), jednakże zadanie nakazuje przetestować różne konfiguracje regulatora PID. Z tego powodu zdecydowaliśmy się wybrać po jednej (najlepszej) konfiguracji z każdej z macierzy. Będą to:

- Dla  $\text{KK}_1$ : y1-u3 y2-u2 y3-u4
- Dla  $\text{KK}_2$ : y1-u3 y2-u1 y3-u4
- Dla  $\text{KK}_3$ : y1-u2 y2-u1 y3-u4
- Dla  $\text{KK}_4$ : y1-u3 y2-u2 y3-u1

### 5.1.2. PID - konfiguracja pierwsza

Pierwsza konfiguracja naszego PID'a zakłada, że wyjście pierwsze sterujemy wejściem trzecim, wyjście drugie wejściem drugim, a wyjście trzecie wejściem czwartym.

#### Tor pierwszy

Nastawy PID wyznaczamy metodą inżynierską. Oznacza to, że zaczynamy od wyznaczenia wzmocnienia  $K$ . Jego wartość ustawiamy na połowę wartości, dla której obiekt wpada w niekończące się i nierosnące oscylacje. Dla pierwszego toru  $K_{osc} = 13,3642$ , co oznacza, że jako wartość  $K$  przyjmujemy  $K = 6,6821$ . Oscylacje przedstawia poniższy wykres 5.1.

Następnie przystąpiliśmy do wyznaczenia czasu zdwojenia  $T_i$ . Po wielu testach zdecydowaliśmy się, że najlepszy przebieg oraz najniższa wartość błędu występuje dla  $T_i = 3$ . Choć w przebiegu sterowania nie ma ona większej przewagi, to przebieg wyjścia jest o wiele lepszy od konkurentów. Na wykresie wyjście dosłownie stapia się w jeden przebieg z wartością zadaną. Poniżej w tabeli 5.2 przedstawiono wartości błędów dla różnych wartości  $T_i$ . Przebiegi dla tych wartości pokazano na wykresie 5.2.

Ostatnim dobieranym parametrem był czas wyprzedzenia  $T_d$ . Niemniej okazało się, że włączenie członu różniczkowego powoduje bardziej pogorszenie przebiegu niż jego polepszenie. Z tego powodu postanowiliśmy pozostać przy wartości  $T_d = 0$ . Wartości błędów dla wybranych wartości przedstawione zostały w tabeli 5.3, a przebiegi na wykresie 5.3.

$y$	$u$
$y_1$	$u_3$
$y_2$	$u_2$
$y_3$	$u_4$

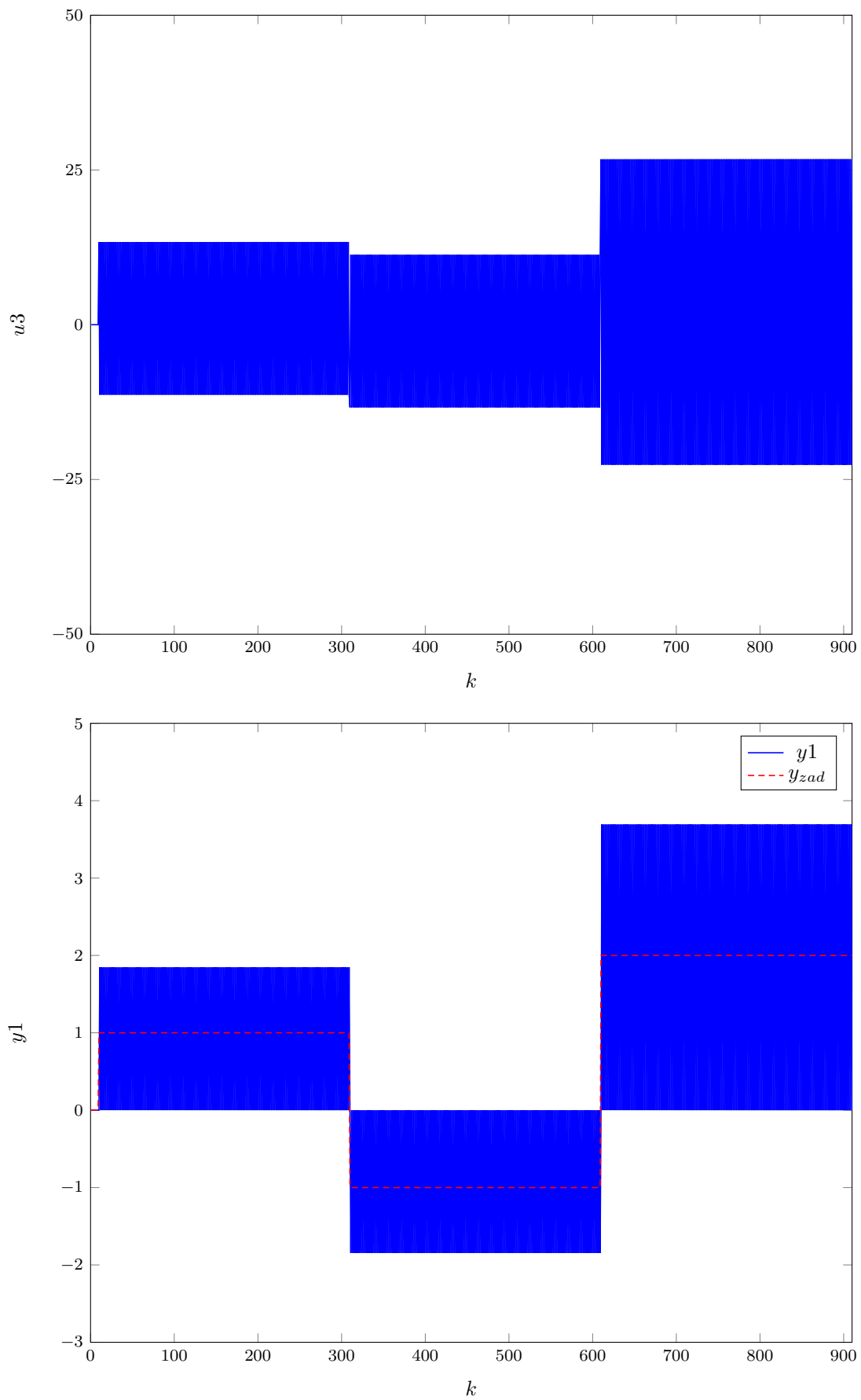
Tab. 5.1. Pierwsza konfiguracja

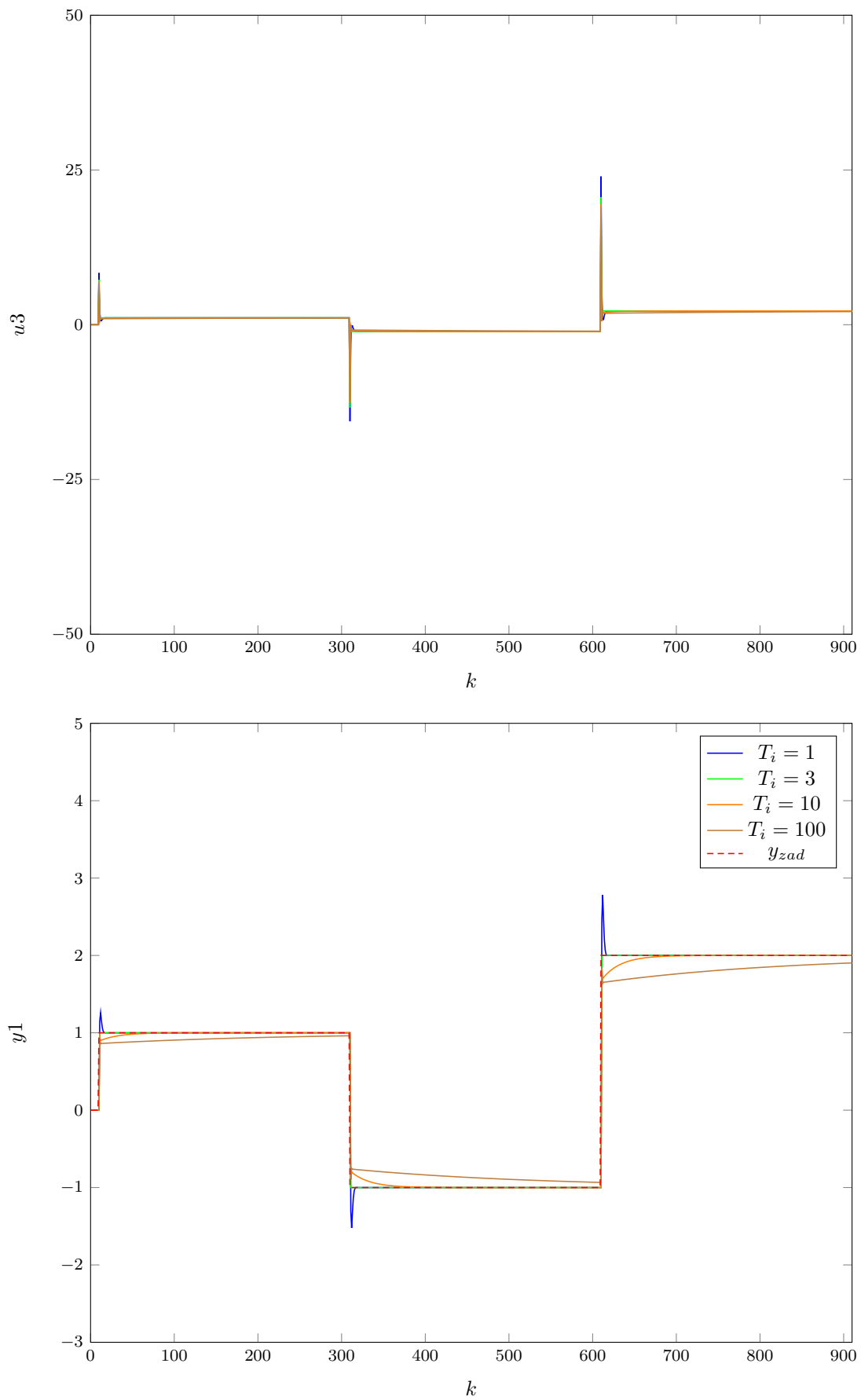
$T_i$	$E1$
1	15,7016
3	14,0000
10	15,6587
100	34,8237

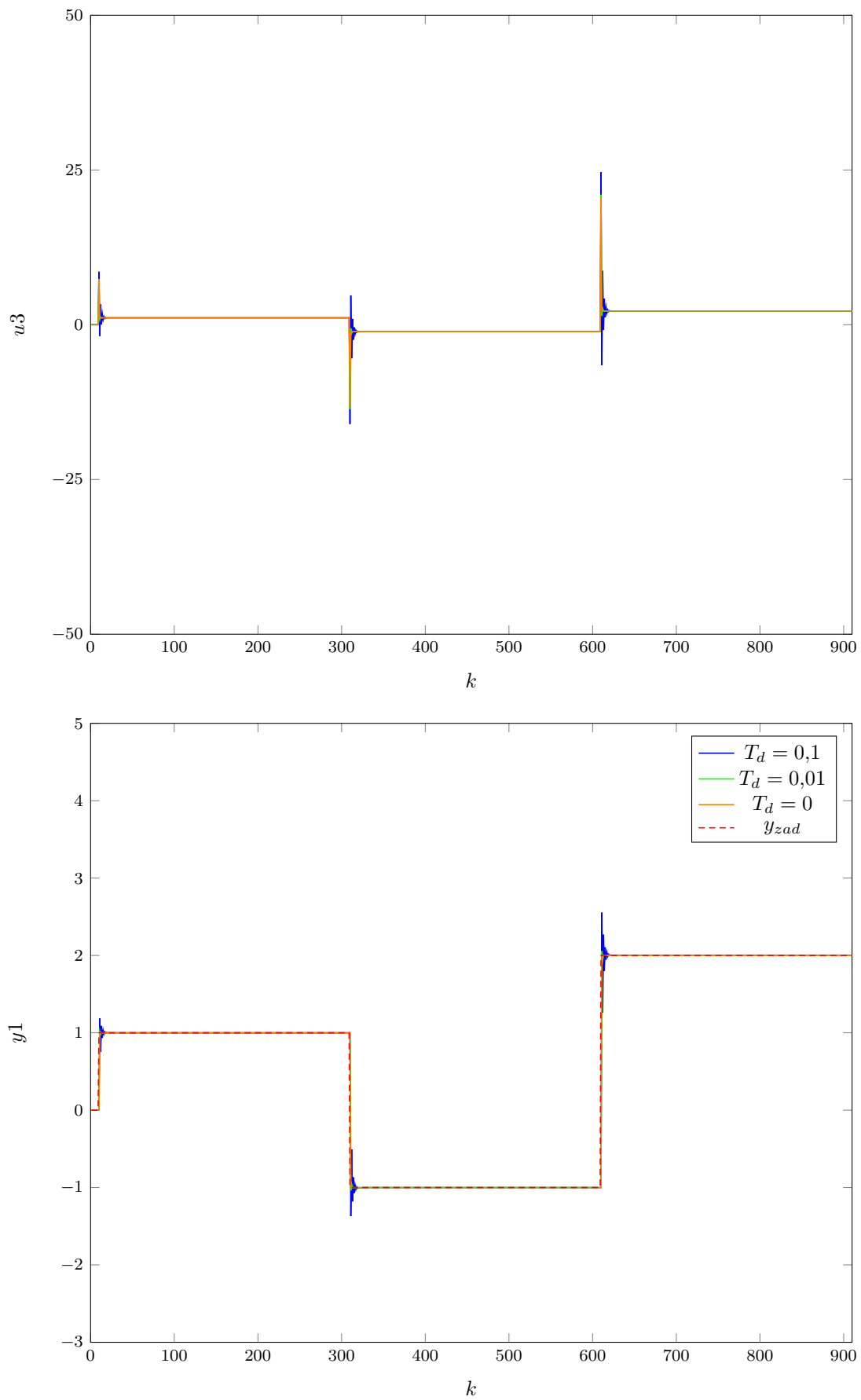
Tab. 5.2. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_i$

$T_i$	$E1$
0	14,0000
0.01	14,0113
0.1	15,5293

Tab. 5.3. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_d$

Rys. 5.1. Przebieg wyjścia pierwszego i wejścia trzeciego dla wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 13,3642$

Rys. 5.2. Przebieg wyjścia pierwszego i wejścia trzeciego dla różnych wartości  $T_i$

Rys. 5.3. Przebieg wyjścia pierwszego i wejścia trzeciego dla różnych wartości  $T_d$

### Tor drugi

Oczywiście zaczynamy od dobrania wzmocnienia  $K$ . Dla wyjścia drugiego sterowanego drugim wejściem wartość wzmocnienia dla którego wpada ono w oscylacje to  $K_{osc}=18,197$ . Oznacza to, że dla regulatora przyjmujemy wzmocnienie równe  $K=9,0985$ . Wykres zawierający przebiegi dla wzmocnienia oscylacyjnego umieściliśmy pod numerem 5.4.

Następną dobieraną wartością było  $T_i$ . Po kilku próbach doszliśmy do wniosku, że najlepszą wartością jest  $T_i=5$ . Dla tej wartości zarówno przebieg jak i wartość błędu są najlepsze. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.4. Przebiegi zamieściliśmy na wykresie 5.5.

Ostatnim dobieranym parametrem był czas wyprzedzenia  $T_d$ . Niemniej okazało się, że włączenie członu różniczkowego powoduje bardziej pogorszenie przebiegu niż jego polepszenie. Z tego powodu postanowiliśmy pozostać przy wartości  $T_d = 0$ . Wartości błędów dla wybranych wartości przedstawione zostały w tabeli 5.5, a przebiegi na wykresie 5.6.

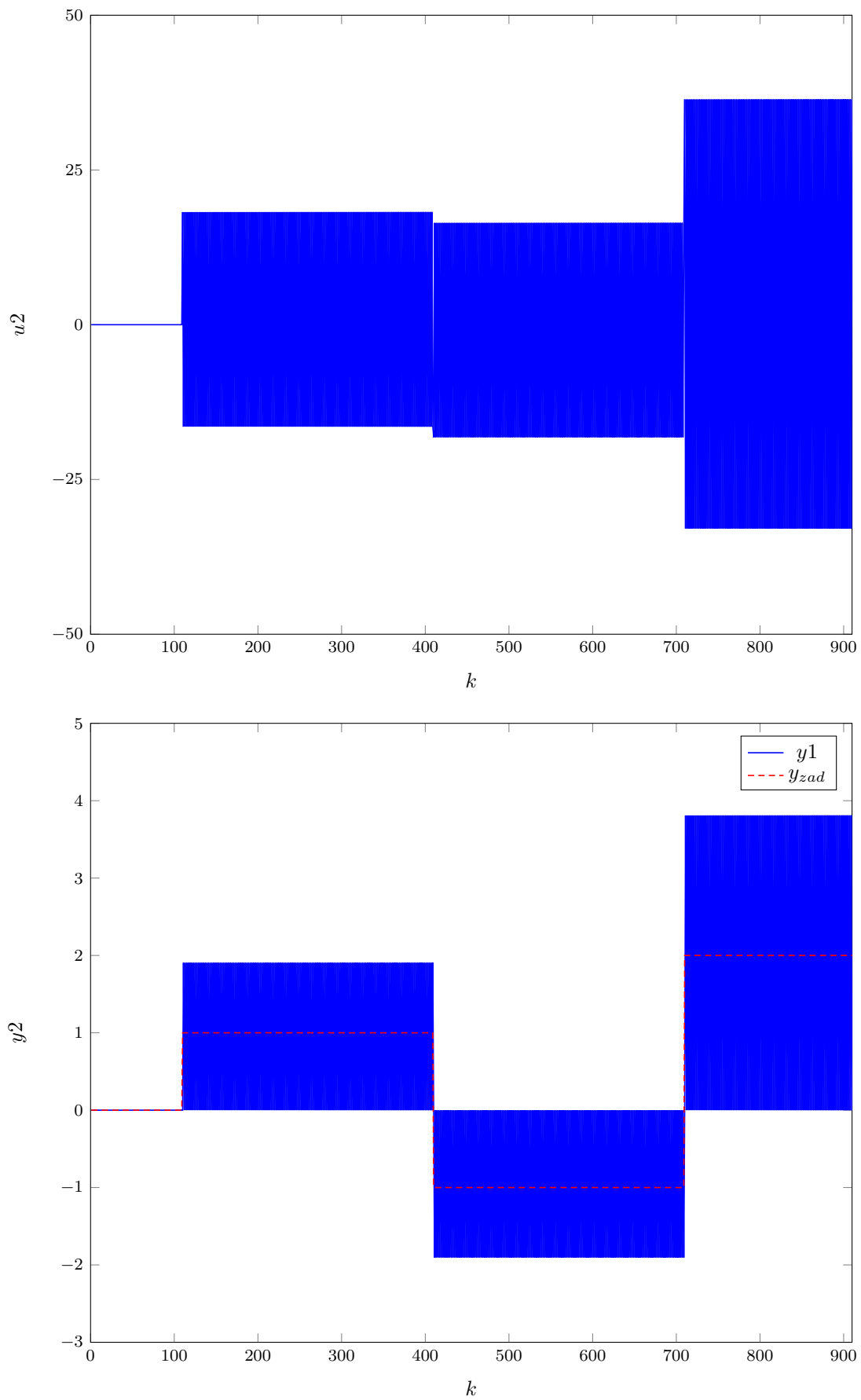
$T_i$	$E2$
1	16,6367
5	14,0000
10	14,3245
100	21,2770

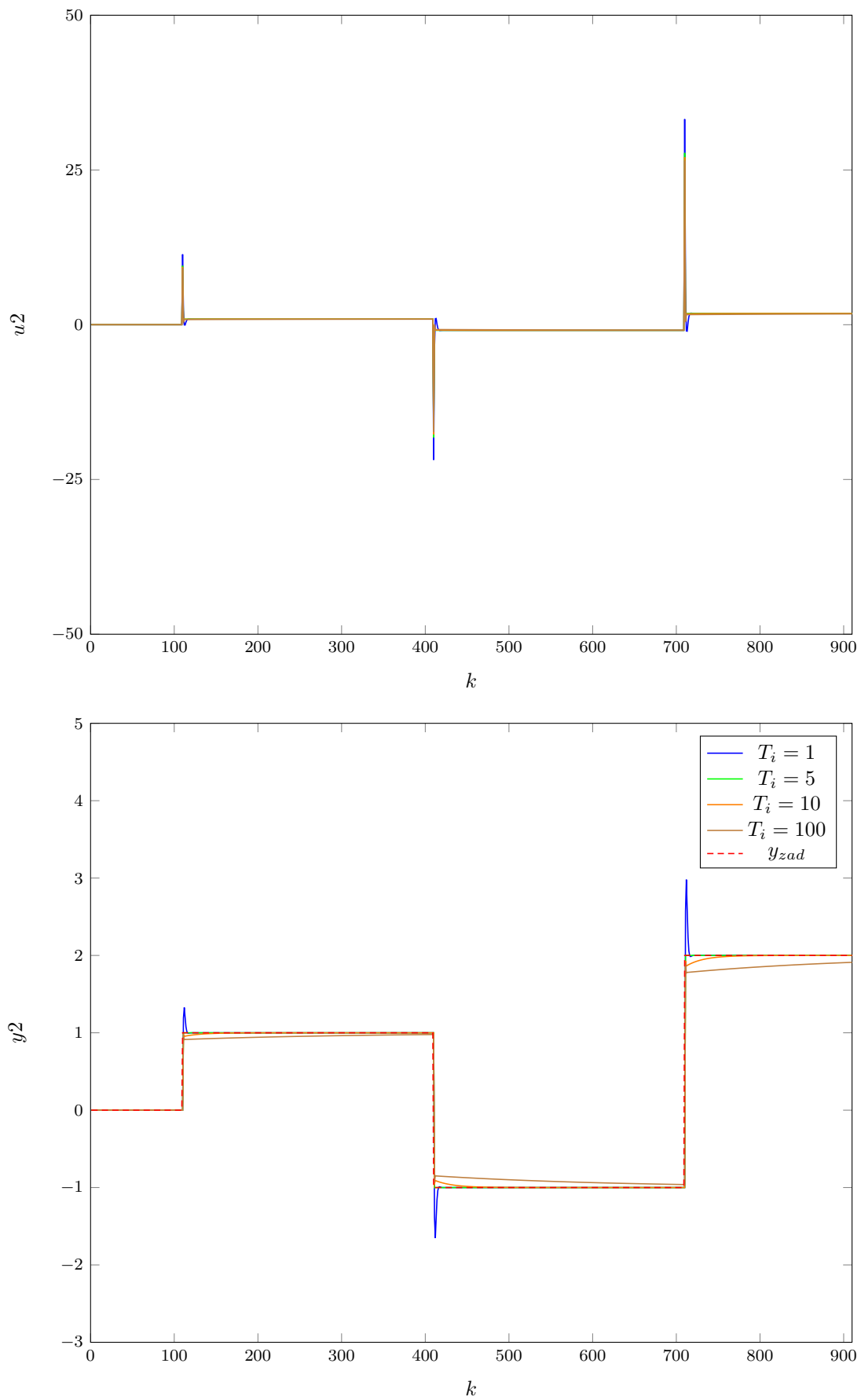
Tab. 5.4. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_i$

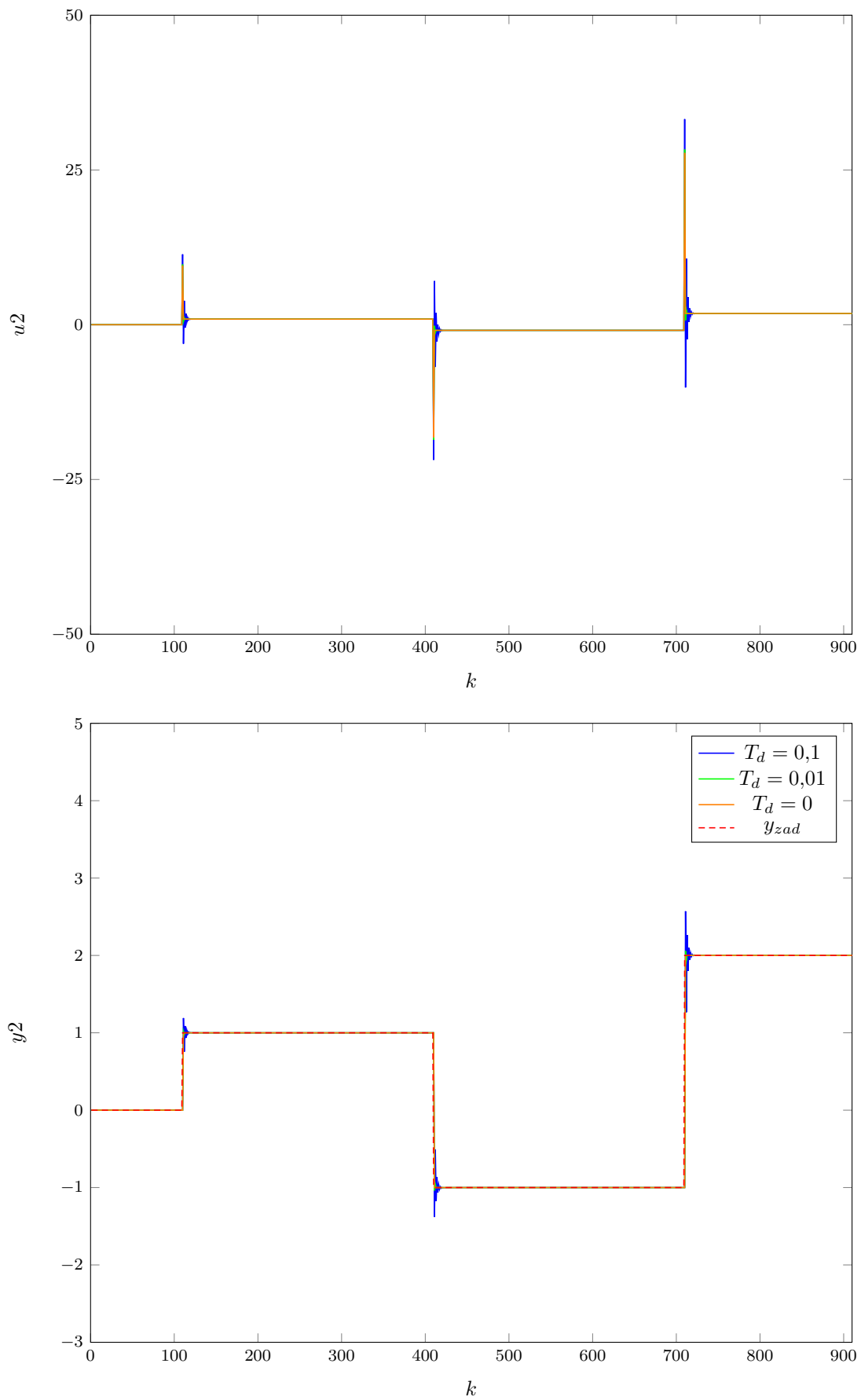
$T_i$	$E2$
0	14,0000
0.01	14,0114
0.1	15,5409

Tab. 5.5. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_d$



Rys. 5.4. Przebieg wyjścia drugiego i wejścia drugiego dla wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 18,197$

Rys. 5.5. Przebieg wyjścia drugiego i wejścia drugiego dla różnych wartości  $T_i$

Rys. 5.6. Przebieg wyjścia drugiego i wejścia drugiego dla różnych wartości  $T_d$

**Tor trzeci**

Zaczynamy od wyznaczenia wzmocnienia  $K$ . Dla trzeciego toru  $K_{osc} = 10,459$ , co oznacza, że jako wartość  $K$  przyjmujemy  $K = 5,2295$ . Oscylacje przedstawia poniższy wykres 5.7.

Następnie przystąpiliśmy do wyznaczenia czasu zdwojenia  $T_i$ . Po wielu testach zdecydowaliśmy się, że najlepszy przebieg oraz najniższa wartość błędu występuje dla  $T_i = 3$ . Choć w przebiegu sterowania nie ma ona większej przewagi, to przebieg wyjścia jest o wiele lepszy od konkurentów. Na wykresie wyjście dosłownie stapia się w jeden przebieg z wartością zadaną. Poniżej w tabeli 5.6 przedstawiono wartości błędów dla różnych wartości  $T_i$ . Przebiegi dla tych wartości pokazano na wykresie 5.8.

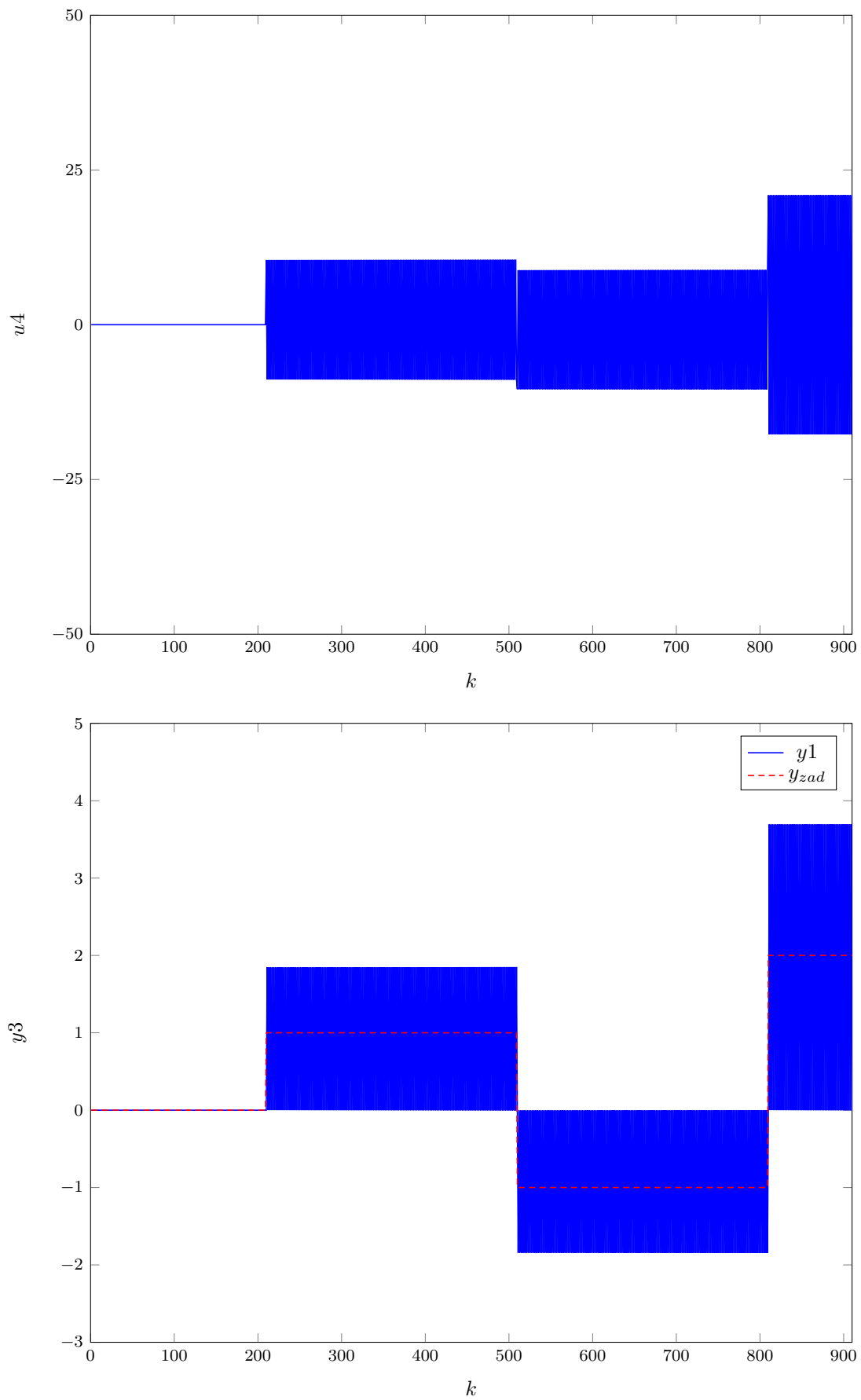
Ostatnim dobieranym parametrem był czas wyprzedzenia  $T_d$ . Niemniej okazało się, że włączenie członu różniczkowego powoduje bardziej pogorszenie przebiegu niż jego polepszenie. Z tego powodu postanowiliśmy pozostać przy wartości  $T_d = 0$ . Wartości błędów dla wybranych wartości przedstawione zostały w tabeli 5.7, a przebiegi na wykresie 5.9.

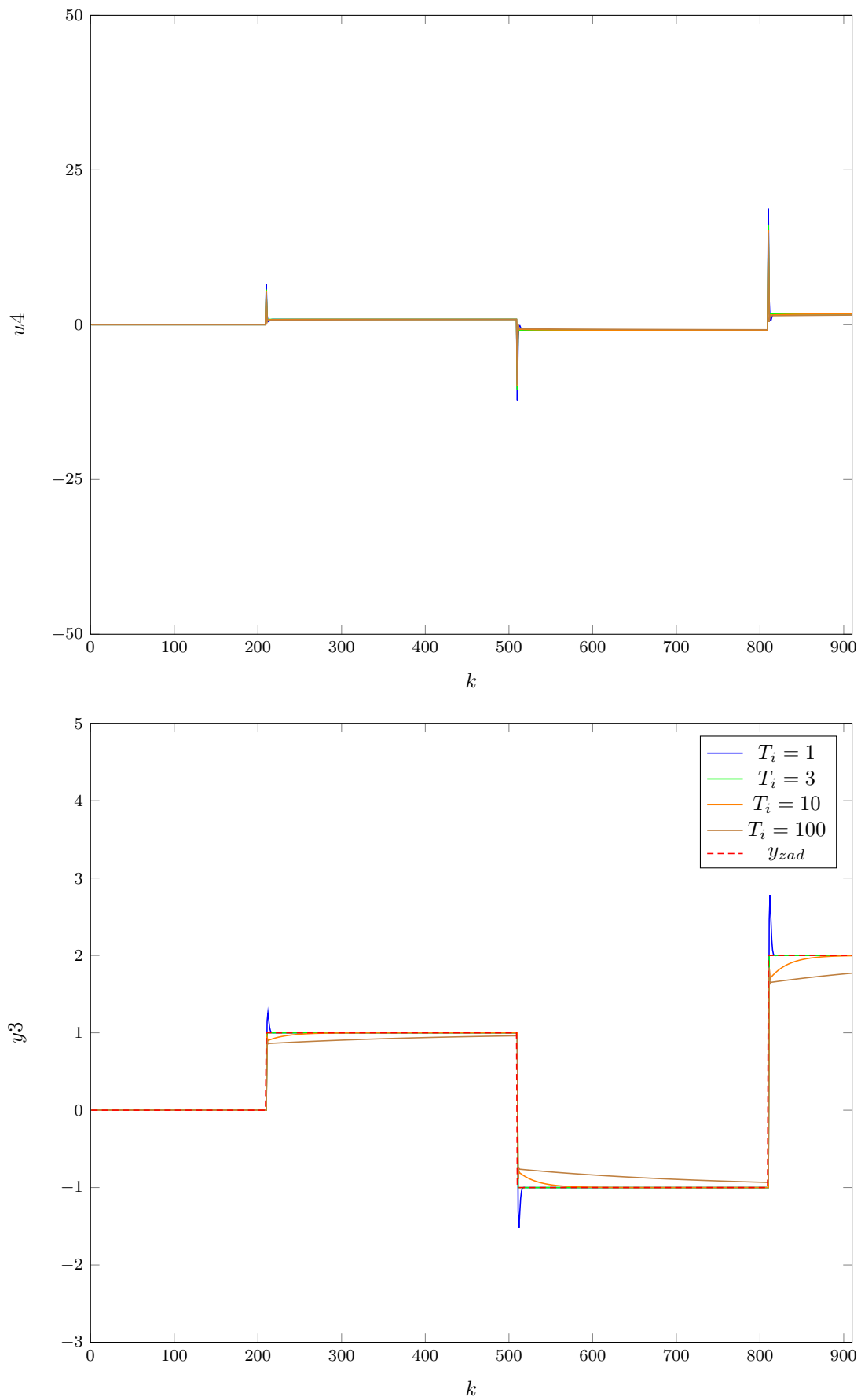
$T_i$	$E3$
1	15,7016
3	14,0000
10	15,6585
100	29,845

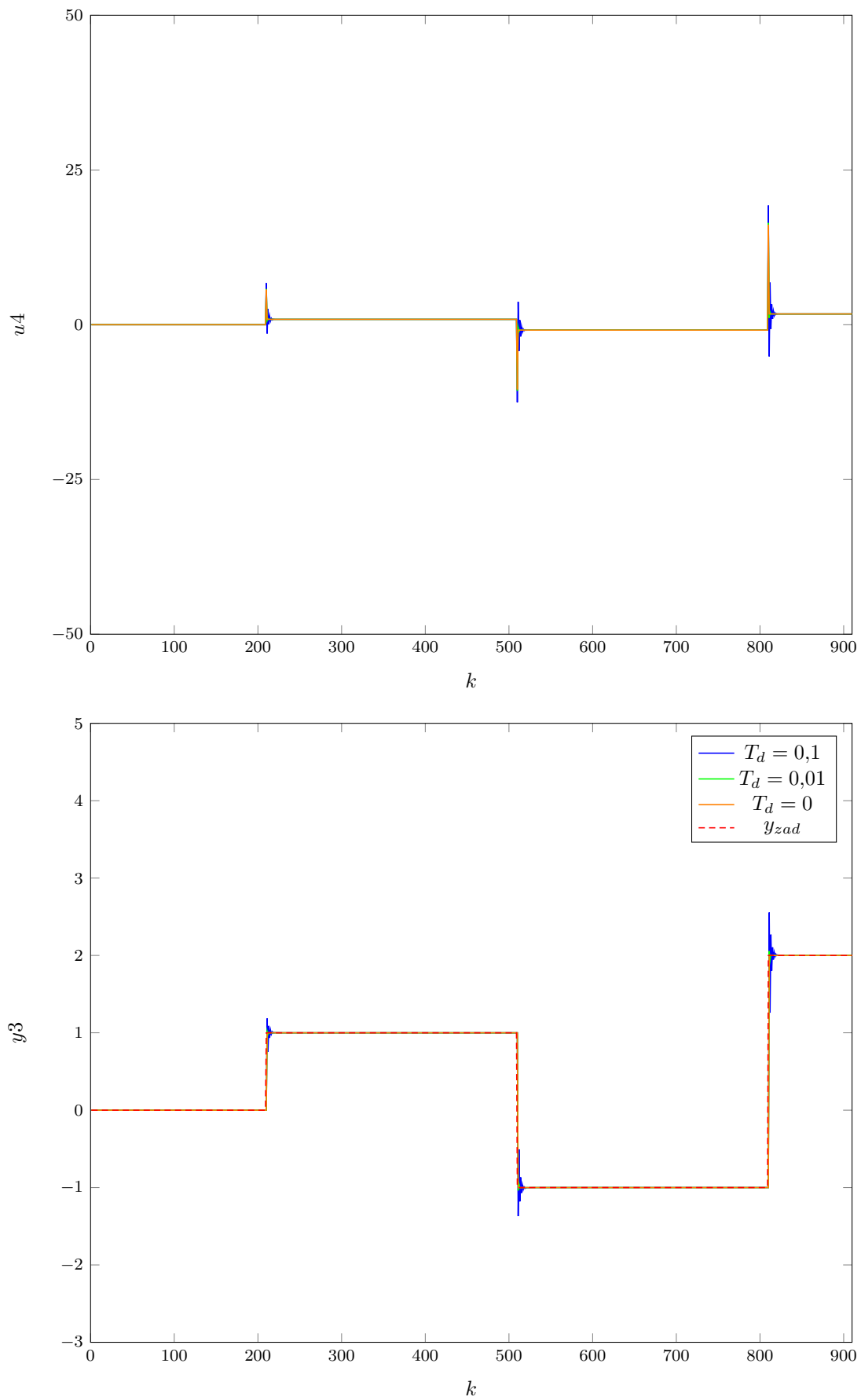
Tab. 5.6. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_i$ 

$T_i$	$E3$
0	14,0000
0.01	14,0113
0.1	15,5294

Tab. 5.7. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_d$

Rys. 5.7. Przebieg wyjścia trzeciego i wejścia czwartego dla wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 10,459$

Rys. 5.8. Przebieg wyjścia trzeciego i wejścia czwartego dla różnych wartości  $T_i$

Rys. 5.9. Przebieg wyjścia trzeciego i wejścia czwartego dla różnych wartości  $T_d$

## Całość

Poniżej na wykresach 5.10 oraz 5.11 znajduje się przebieg działania całego procesu (wszystkie tory aktywne, trzy sterowania w odpowiedniej kolejności i trzy wyjścia) dla nastaw wybranych w poprzednich podpunktach. Wartości błędów znajdują się w tabeli 5.9. Jak można zauważyć przebiegi nie są idealne, zwłaszcza dla toru pierwszego z którym występują znaczne odchylenia. Fakt, że nastawy należy poprawić nie był dla nas zaskoczeniem, w końcu każde sterowanie ma wpływ na każde wyjście. Po wielu próbach doszliśmy do następujących wniosków:

- włączenie któregokolwiek członu D pogarsza regulację
- zmienianie czasu  $T_I$  członów ma bardzo mały wpływ na poprawę regulacji i często ją pogarsza
- najlepszy wpływ na regulację ma zmniejszanie wzmocnień członów

Ostatecznie zdecydowaliśmy się pozostawić wartości  $T_i$  i  $T_d$  członów niezmienione oraz zmniejszyć wzmocnienia toru drugiego i trzeciego (sterowania  $u_2$  i  $u_4$ ) dwukrotnie. Powód dla którego nie zmieniliśmy wzmocnienie pierwszego z torów wynika z tabeli wzmocnień znajdującej się na początku sekcji PID. Wyraźnie widać w niej, że  $u_3$  ma mały wpływ na wyjścia  $y_2$  oraz  $y_3$ . Z drugiej strony  $u_2$  i  $u_4$  mają bardzo duży wpływ na  $y_1$ . Wzmocnienia dla wszystkich torów po poprawkach przyjmują wartości  $K_1 = 6,6821$ ,  $K_2 = 4,4592$ ,  $K_3 = 2,6147$ . Poniżej w tabeli 5.11 znajdują się wyliczone nowe wartości błędów. Dużą poprawę widać zwłaszcza dla toru pierwszego. Błąd dla  $y_2$  nieco się powiększył, ale mimo to i tak jest najmniejszy ze wszystkich. Przebiegi sterowań i wyjść dla poprawionych nastaw znajdują się na wykresach 5.12 oraz 5.13. Tu także widać ogromną poprawę przebiegu regulacji, zwłaszcza dla wyjścia pierwszego, ale nie tylko.

	$y1$	$y2$	$y3$
$K$	6,6821	9,0985	5,2295
$T_i$	3	5	3
$T_d$	0	0	0

Tab. 5.8. Nastawy oryginalne

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
284,3723	242,0791	15,0974	27,1958

Tab. 5.9. Wartości błędów dla nastaw oryginalnych

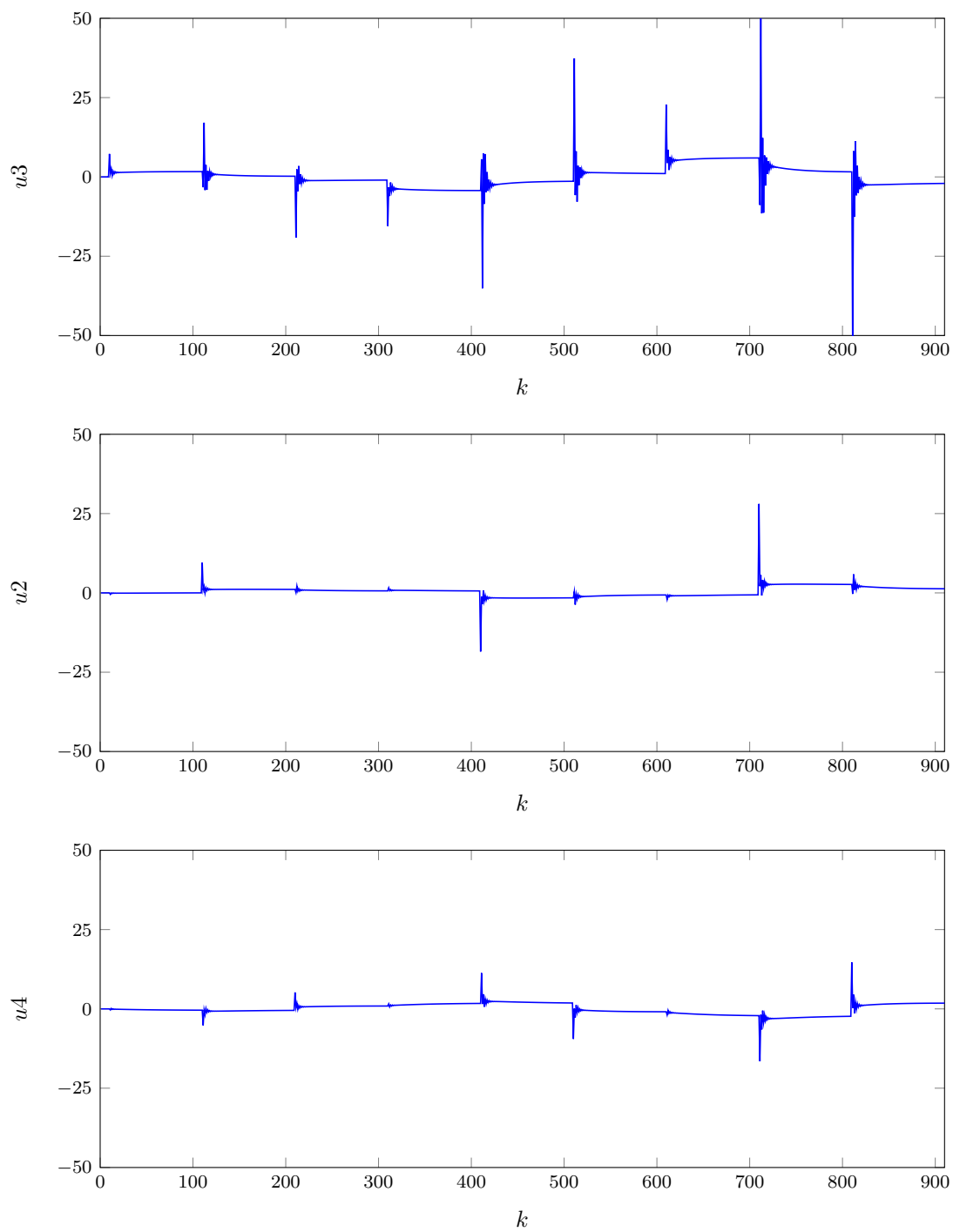
	$y1$	$y2$	$y3$
$K$	6,6821	4,4592	2,6147
$T_i$	3	5	3
$T_d$	0	0	0

Tab. 5.10. Nastawy poprawione

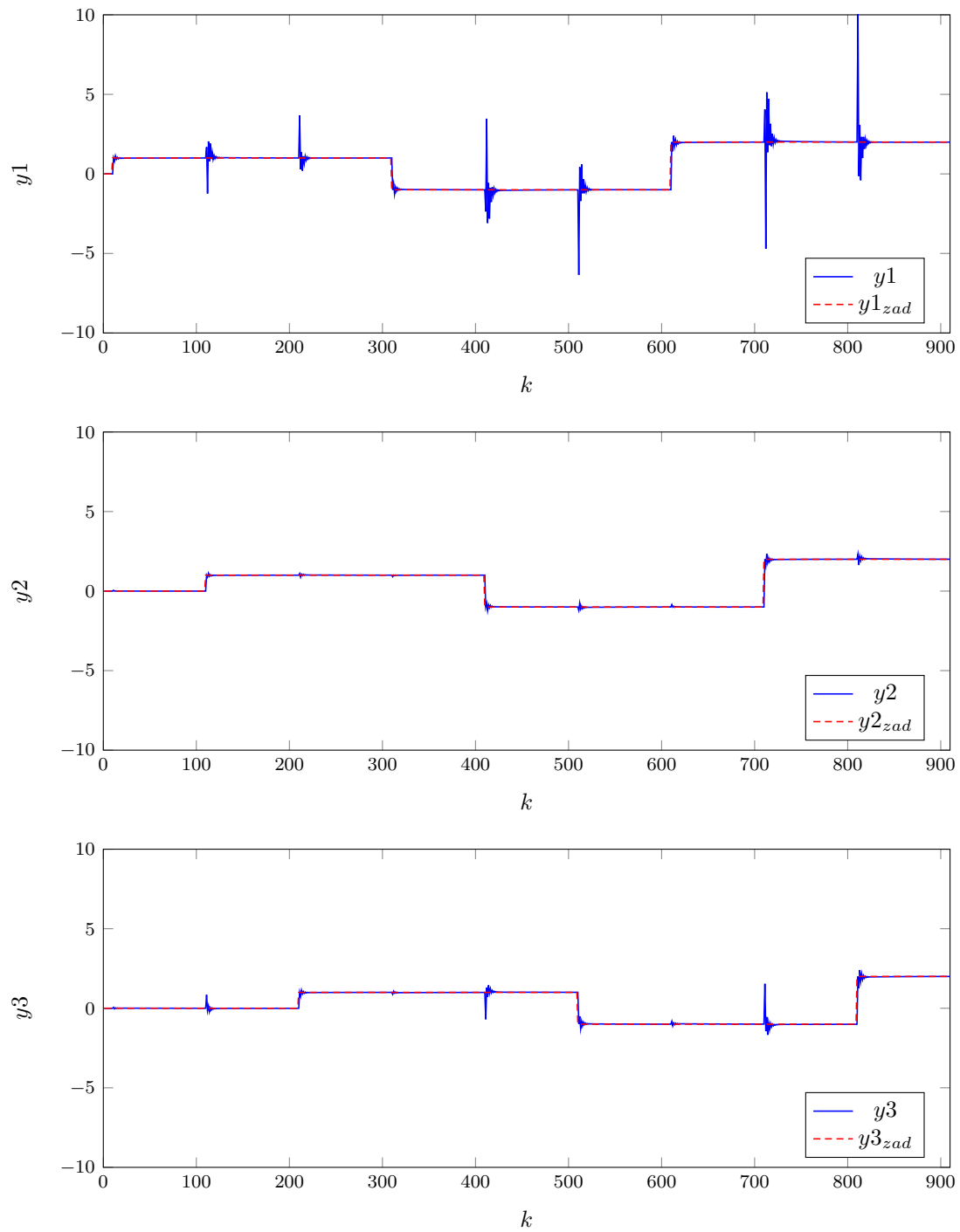
$E$	$E1$	$E2$	$E3$
93,5137	47,3773	19,8595	26,2770

Tab. 5.11. Wartości błędów dla nastaw poprawionych

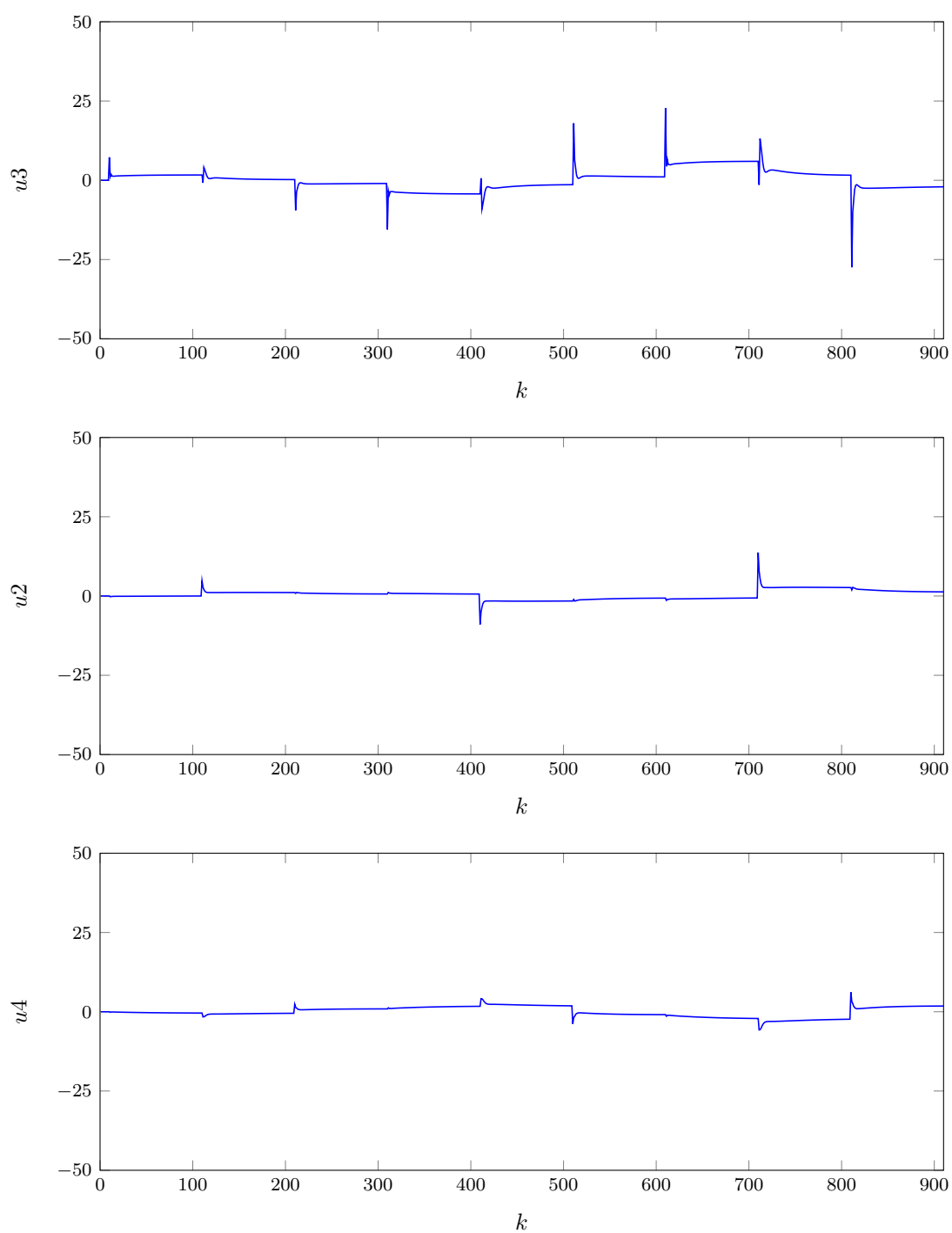




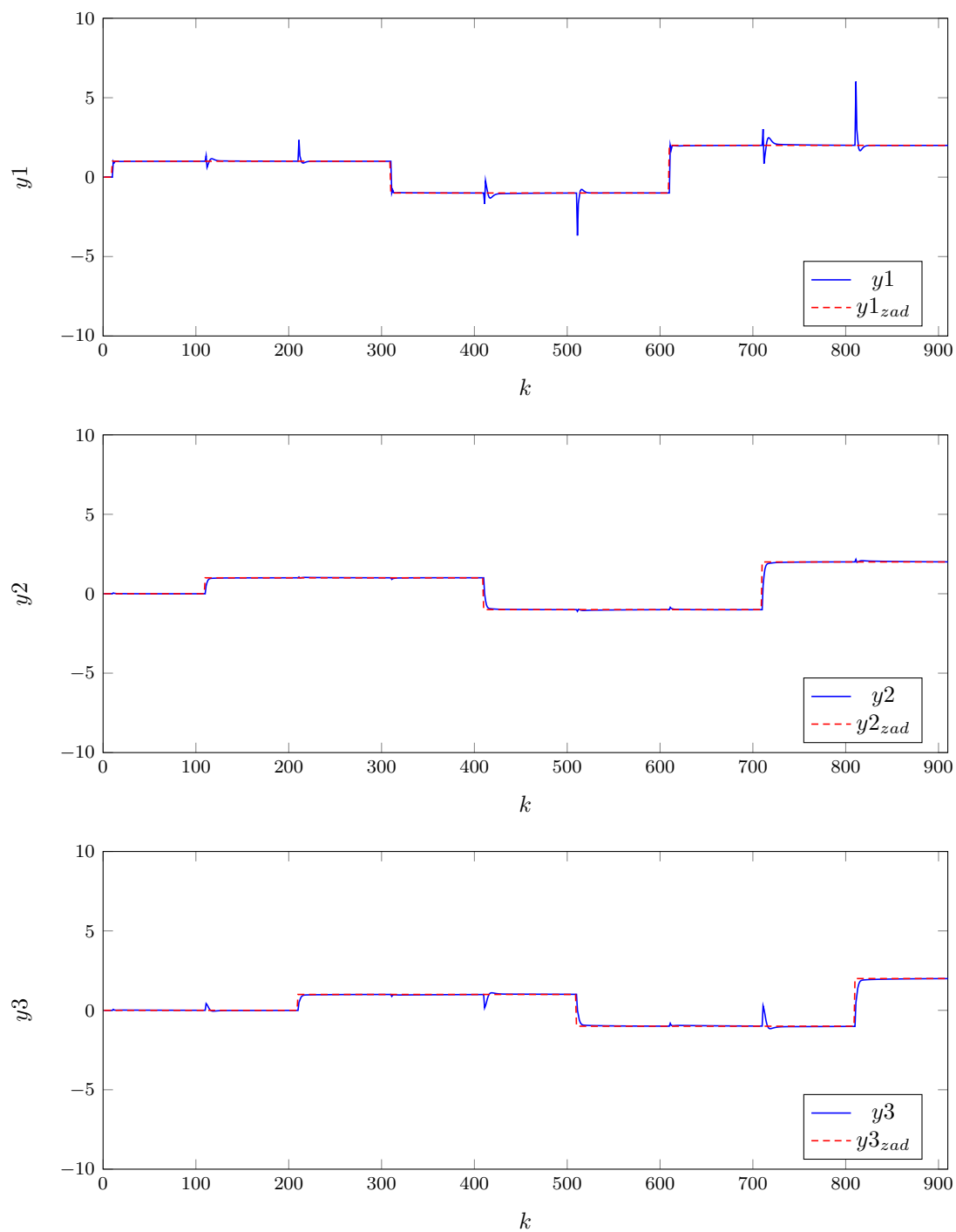
Rys. 5.10. Przebiegi sterowań dla oryginalnych nastaw



Rys. 5.11. Przebiegi wyjść dla oryginalnych nastaw



Rys. 5.12. Przebiegi sterowań dla poprawionych nastaw



Rys. 5.13. Przebiegi wyjść dla poprawionych nastaw

### 5.1.3. PID - konfiguracja druga

Druga konfiguracja naszego PID'a zakłada, że wyjście pierwsze sterujemy wejściem trzecim, wyjście drugie wejściem pierwszym, a wyjście trzecie wejściem czwartym. Ponieważ nastawy dla toru pierwszego i drugiego wyliczyłem już w poprzedniej konfiguracji nie będę zamieszczał ponownie tych procesów.

#### Tor drugi

Jest to jedyny tor, który musimy obliczyć w tej konfiguracji (reszta torów jest taka sama jak w pierwszej konfiguracji). Zaczynamy od wzmocnienia  $K$ . Po kilku próbach znaleźliśmy do wartości wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 5,3611$ , co daje końcową wartość wzmocnienia  $K = 2,6806$ . Przebieg przedstawiliśmy na wykresie 5.14.

Następną dobieraną wartością było  $T_i$ . Po kilku próbach doszliśmy do wniosku, że najlepszą wartością jest  $T_i=2$ . Dla tej wartości zarówno przebieg jak i wartość błędu są najlepsze. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.13. Przebiegi zamieściliśmy na wykresie 5.15.

Ostatnim dobieranym parametrem był czas wyprzedzenia  $T_d$ . Niemniej okazało się, że włączenie członu różniczkowego powoduje bardziej pogorszenie przebiegu niż jego polepszenie. Z tego powodu postanowiliśmy pozostać przy wartości  $T_d = 0$ . Wartości błędów dla wybranych wartości przedstawione zostały w tabeli 5.14, a przebiegi na wykresie 5.16.

$y$	$u$
$y_1$	$u_3$
$y_2$	$u_1$
$y_3$	$u_4$

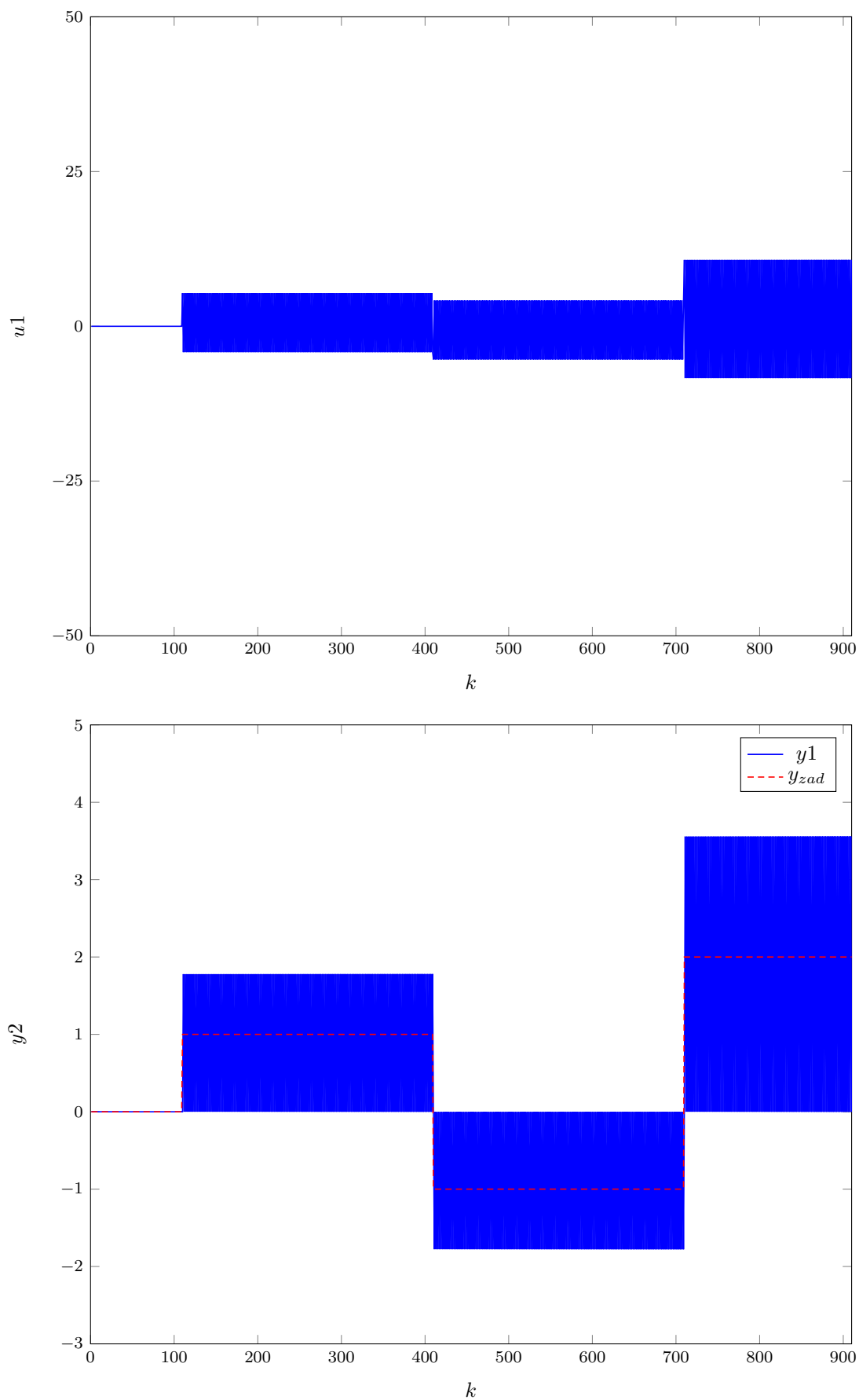
Tab. 5.12. Druga konfiguracja

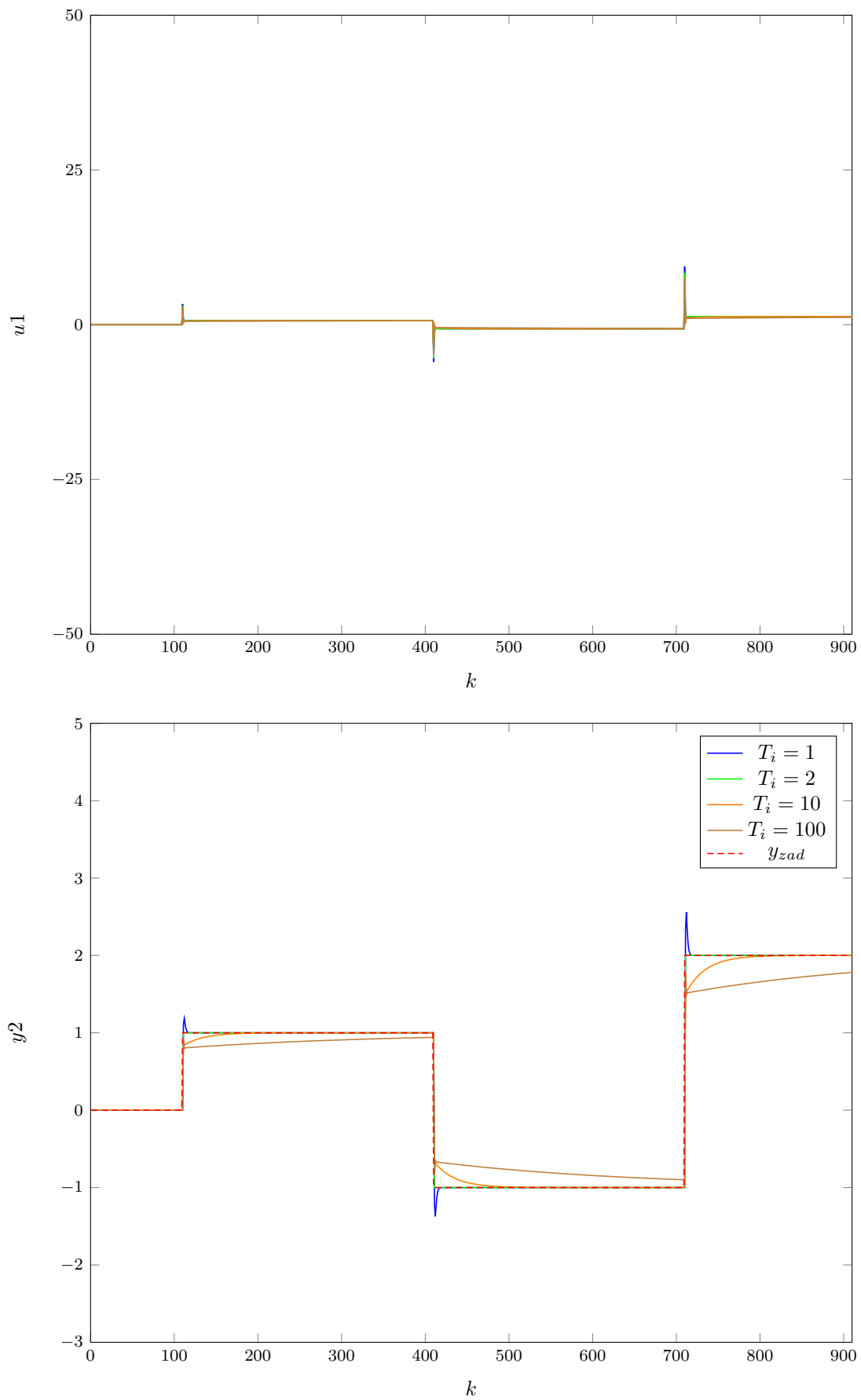
$T_i$	$E2$
1	14,8853
2	14,0000
10	18,5170
100	53,6244

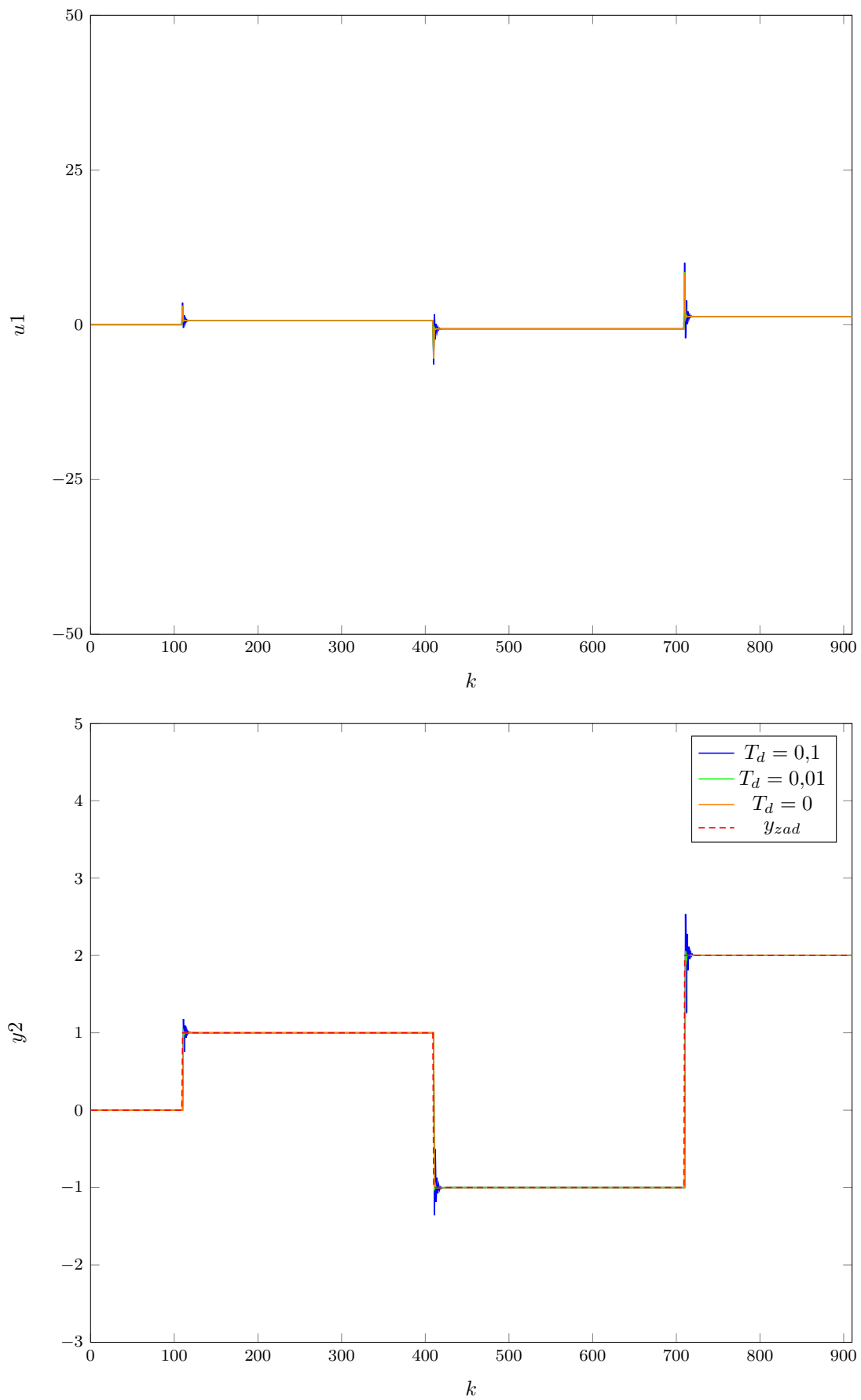
Tab. 5.13. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_i$

$T_i$	$E2$
0	14,0000
0.01	14,0111
0.1	15,5134

Tab. 5.14. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_d$

Rys. 5.14. Przebieg wyjścia drugiego i wejścia pierwszego dla wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 5,3611$

Rys. 5.15. Przebieg wyjścia drugiego i wejścia pierwszego dla różnych wartości  $T_i$

Rys. 5.16. Przebieg wyjścia drugiego i wejścia pierwszego dla różnych wartości  $T_d$



### Całość

Poniżej na wykresach 5.17 oraz 5.18 znajduje się przebieg działania całego procesu (wszystkie tory aktywne, trzy sterowania w odpowiedniej kolejności i trzy wyjścia) dla nastaw wybranych w poprzednich podpunktach. Wartości błędów znajdują się w tabeli 5.16. Jak można zauważyć przebiegi nie są idealne, zwłaszcza dla toru pierwszego z którym występują znaczne odchylenia. Fakt, że nastawy należy poprawić nie był dla nas zaskoczeniem, w końcu każde sterowanie ma wpływ na każde wyjście. Po wykonaniu kilku testów zdecydowaliśmy się zmniejszyć wzmocnienie trzeciego toru trzykrotnie ( $u_4$ ), bo w przeciwieństwie do toru drugiego ( $u_1$ ) ma on znaczny wpływ na pierwsze wyjście. Spowodowało to jednak znaczne pogorszenie przebiegu wyjścia trzeciego (pojawił się uchyb ustalony) co wymusiło na nas zmniejszenie czasu  $T_i$  tego toru do wartości 1. Pozostałe tory pozostawiliśmy bez zmian. Poniżej w tabeli 5.18 znajdują się wyliczone nowe wartości błędów. Dużą poprawę widać zwłaszcza dla toru pierwszego. Błąd dla  $y_3$  nieco się powiększył, ale przebieg nie pogorszył się bardzo. Przebiegi sterowań i wyjść dla poprawionych nastaw znajdują się na wykresach 5.19 oraz 5.20.

	$y1$	$y2$	$y3$
$K$	6,6821	2,6806	5,2295
$T_i$	3	2	3
$T_d$	0	0	0

Tab. 5.15. Nastawy oryginalne

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
171,6336	139,8074	14,5997	17,2265

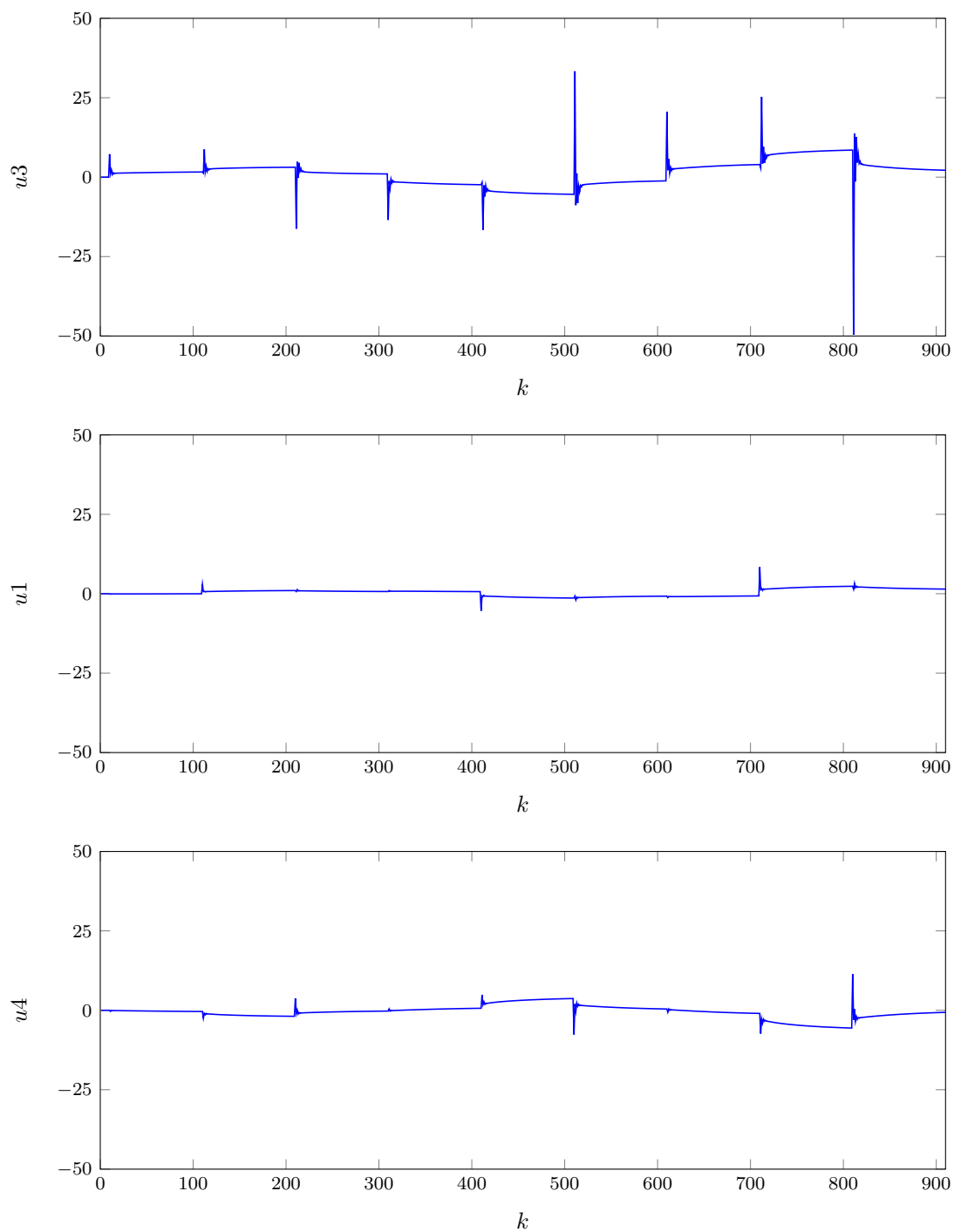
Tab. 5.16. Wartości błędów dla nastaw oryginalnych

	$y1$	$y2$	$y3$
$K$	6,6821	2,6806	1,7432
$T_i$	3	2	1
$T_d$	0	0	0

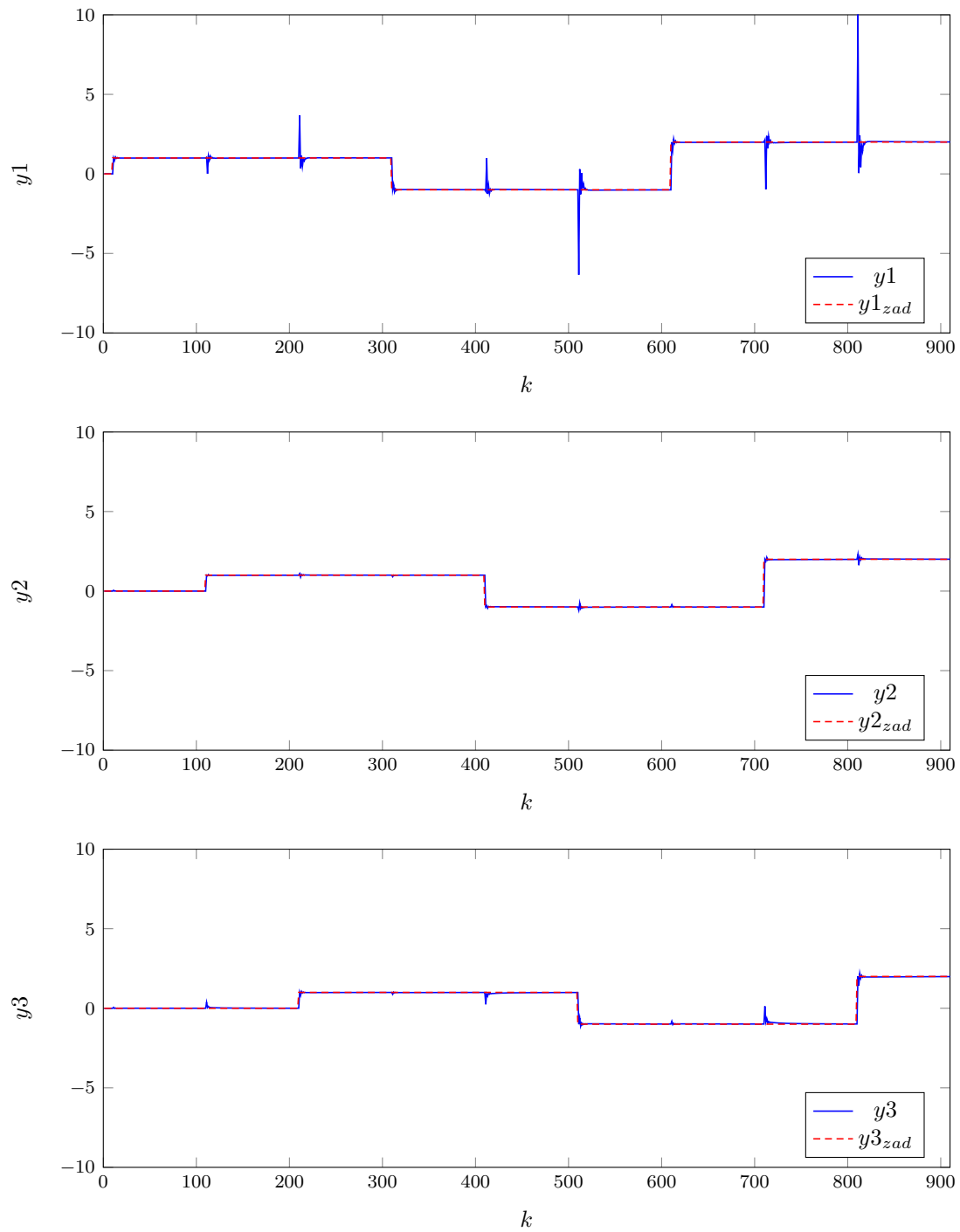
Tab. 5.17. Nastawy poprawione

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
84,5872	43,0392	14,1660	27,3819

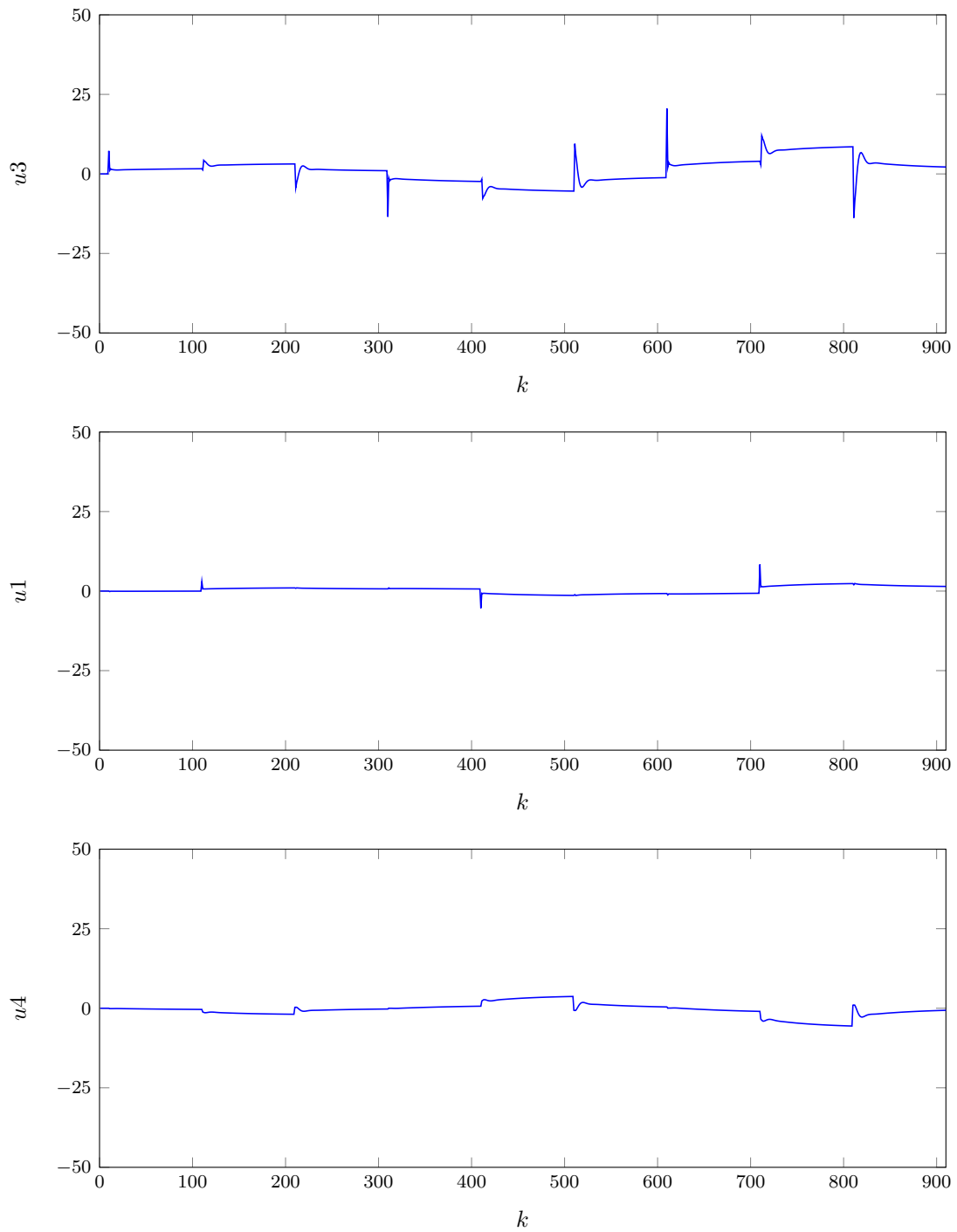
Tab. 5.18. Wartości błędów dla nastaw poprawionych



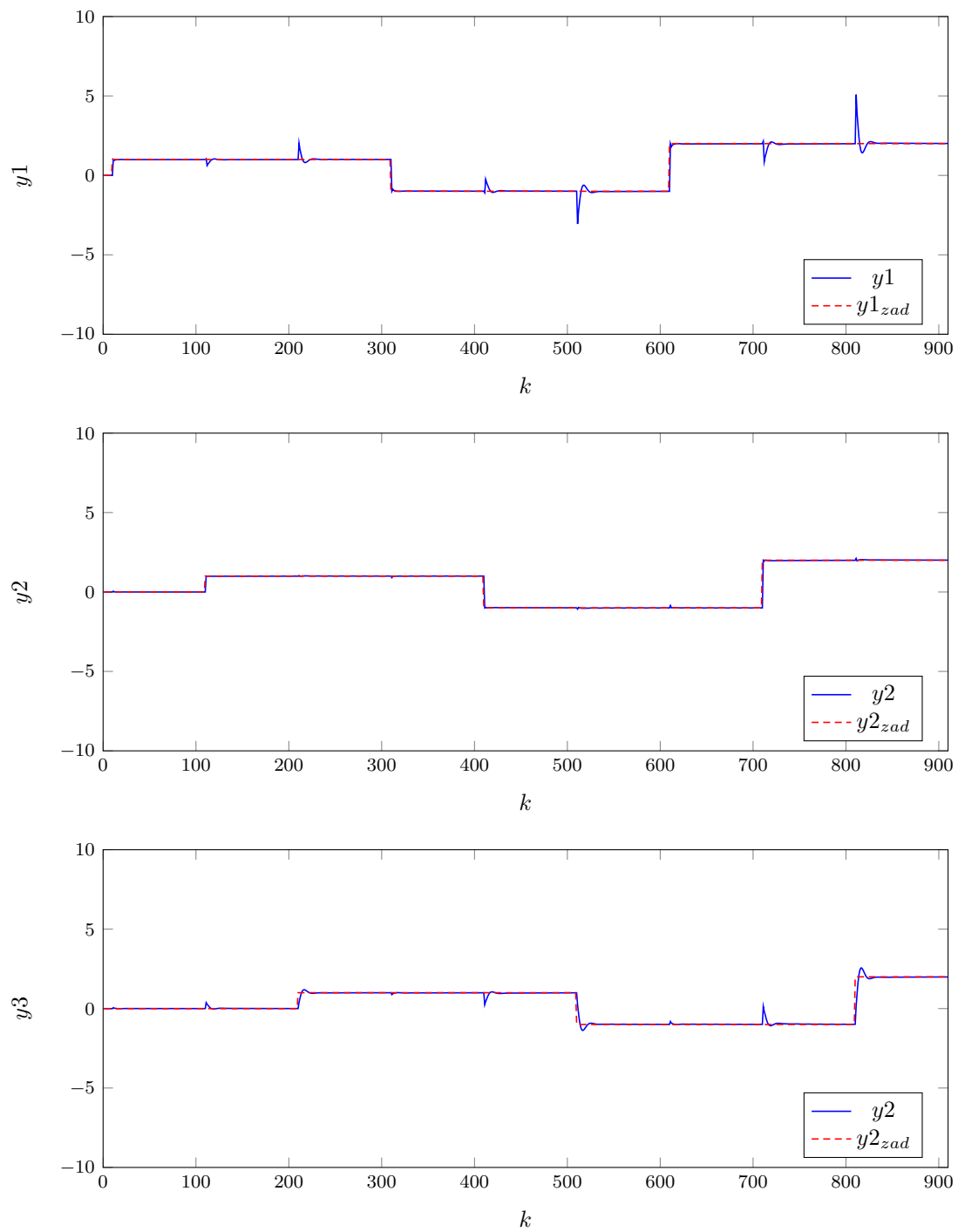
Rys. 5.17. Przebiegi sterowań dla oryginalnych nastaw



Rys. 5.18. Przebiegi wyjść dla oryginalnych nastaw



Rys. 5.19. Przebiegi sterowań dla poprawionych nastaw



Rys. 5.20. Przebiegi wyjść dla poprawionych nastaw

#### 5.1.4. PID - konfiguracja trzecia

Trzecia konfiguracja naszego PID'a zakłada, że wyjście pierwsze sterujemy wejściem drugim, wyjście drugie wejściem pierwszym, a wyjście trzecie wejściem czwartym. Ponieważ nastawy dla toru drugiego i trzeciego wyliczyłem już w poprzednich konfiguracjach nie będę zamieszczał ponownie tych procesów. Ta konfiguracja miała najniższy wskaźnik uwarunkowania macierzy, więc potencjalnie powinna być najlepsza.

##### Tor pierwszy

Jest to jedyny tor, który musimy obliczyć w tej konfiguracji (reszta torów jest taka sama jak w innych konfiguracjach). Zaczynamy od wzmocnienia  $K$ . Po kilku próbach znaleźliśmy do wartość wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 27,2078$ , co daje końcową wartość wzmocnienia  $K = 13,6039$ . Przebieg przedstawiliśmy na wykresie 5.21.

Następną dobieraną wartością było  $T_i$ . Po kilku próbach doszliśmy do wniosku, że najlepszą wartością jest  $T_i=2$ . Dla tej wartości zarówno przebieg jak i wartość błędu są najlepsze. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.20. Przebiegi zamieściliśmy na wykresie 5.22.

Ostatnim dobieranym parametrem był czas wyprzedzenia  $T_d$ . Niemniej okazało się, że włączenie członu różniczkowego powoduje bardziej pogorszenie przebiegu niż jego polepszenie. Z tego powodu postanowiliśmy pozostać przy wartości  $T_d = 0$ . Wartości błędów dla wybranych wartości przedstawione zostały w tabeli 5.21, a przebiegi na wykresie 5.23.

$y$	$u$
$y_1$	$u_2$
$y_2$	$u_1$
$y_3$	$u_4$

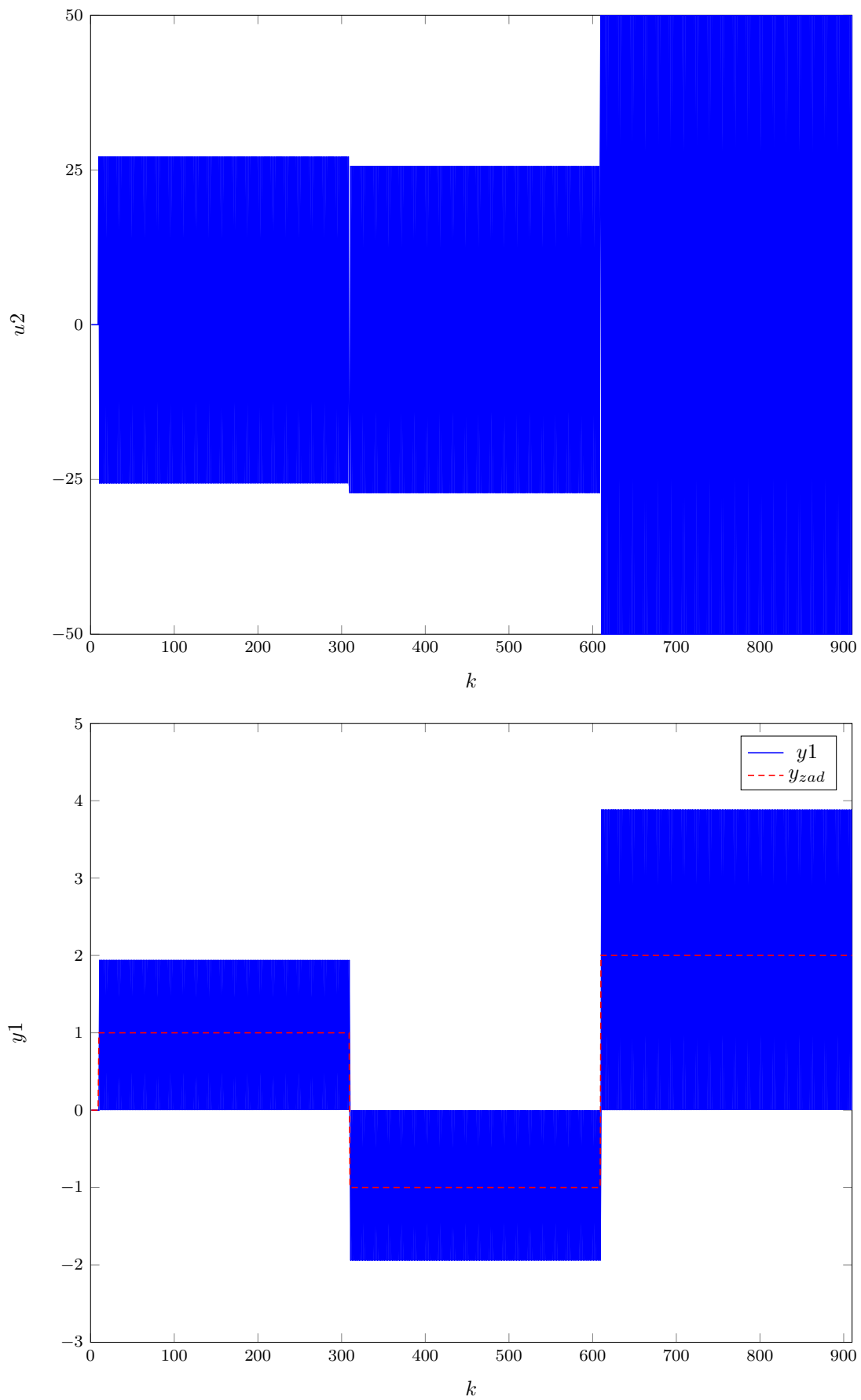
Tab. 5.19. Trzecia konfiguracja

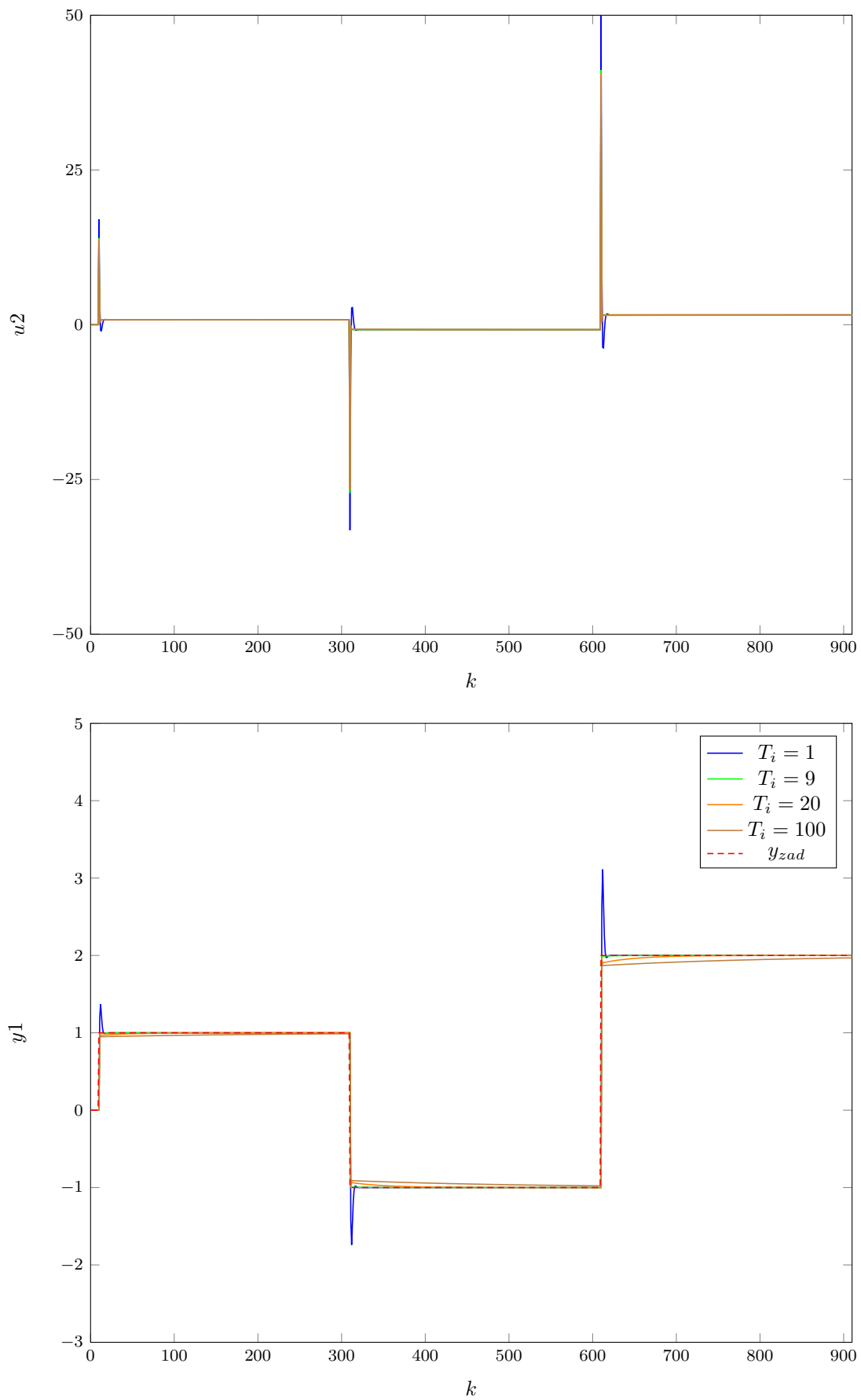
$T_i$	$E1$
1	17,3693
9	14,0013
20	14,3052
100	16,5877

Tab. 5.20. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_i$

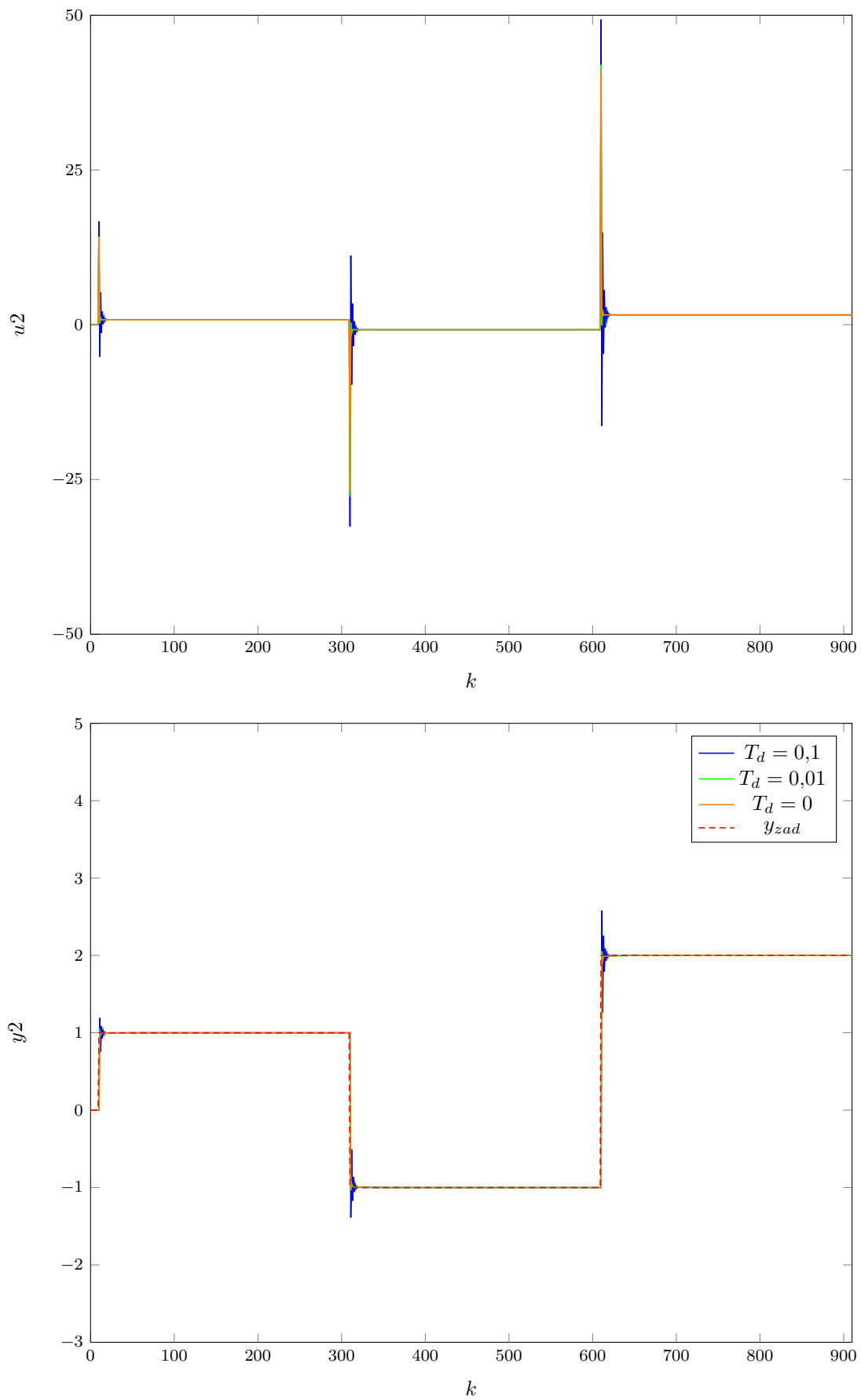
$T_i$	$E1$
0	14,0013
0.01	14,0135
0.1	15,5541

Tab. 5.21. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_d$

Rys. 5.21. Przebieg wyjścia pierwszego i wejścia drugiego dla wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 27,2078$

Rys. 5.22. Przebieg wyjścia pierwszego i wejścia drugiego dla różnych wartości  $T_i$



Rys. 5.23. Przebieg wyjścia pierwszego i wejścia drugiego dla różnych wartości  $T_d$

### Całość

Przy oryginalnych nastawach PID nie działa w ogóle, dlatego nie zamieszczałem ich wykresów. Wartości błędów dążą do nieskończoności. Choć ta kombinacja miała najmniejszy ze wszystkich wskaźnik uwarunkowania okazało się, że nie jest ona aż taka dobra. Nastawy należało całkowicie zmienić, aby osiągnąć logicznie wyglądający przebieg. Wartości błędów są o wiele wyższe niż te znalezione dla poprzednich konfiguracji. Tylko błąd toru drugiego jest dość niski. Może być to spowodowane tym, że każde z używanych w konfiguracji sterowań ma mocny wpływ na przynajmniej 2 różne wyjścia, co widać w macierzy wzmocnień. Przebiegi nie są idealne, ale akceptowalne. Inną możliwością jest to, że po prostu nie udało nam się znaleźć odpowiednich nastaw. Poniżej w tabeli 5.24 znajdują się wyliczone nowe wartości błędów. Przebiegi sterowań i wyjść dla poprawionych nastaw znajdują się na wykresach 5.24 oraz 5.25.

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	13,6039	2,6806	5,2295
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	9	2	3
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	0	0	0

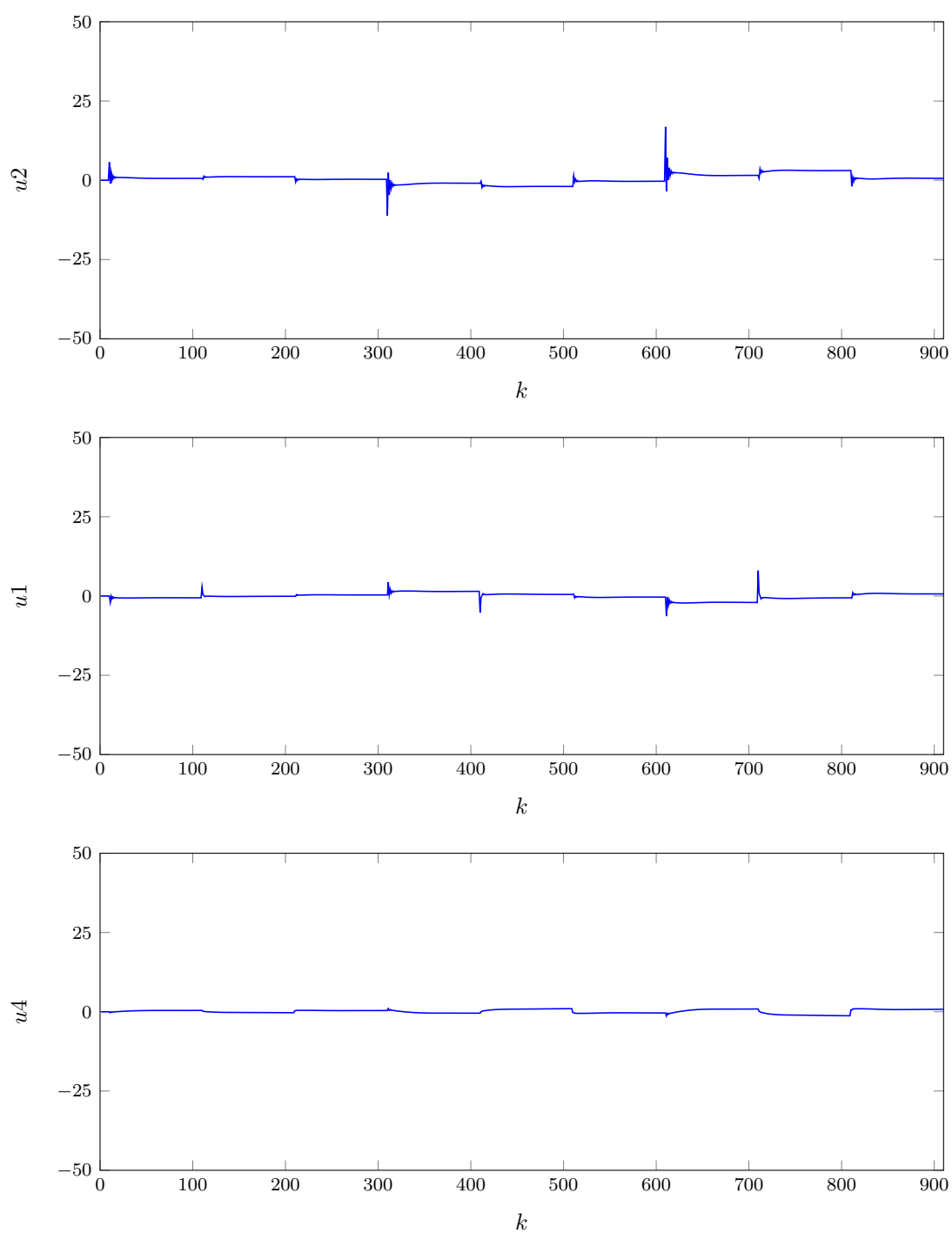
Tab. 5.22. Nastawy oryginalne

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	1,1337	2,6806	0,5811
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	6	1	4
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	2	0	0

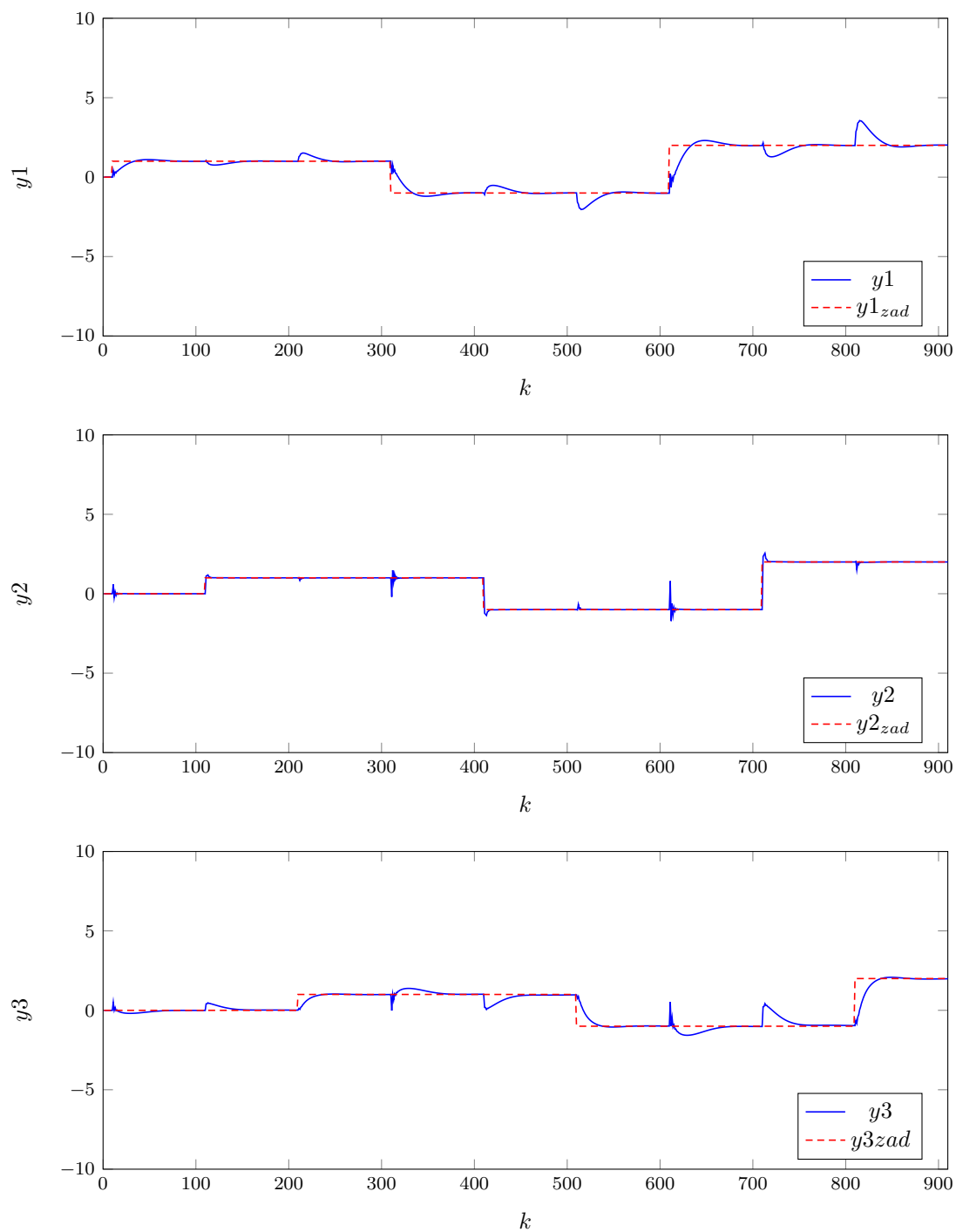
Tab. 5.23. Nastawy poprawione

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
295,8916	139,8703	21,7816	134,2398

Tab. 5.24. Wartości błędów dla nastaw poprawionych



Rys. 5.24. Przebiegi sterowań dla poprawionych nastaw



Rys. 5.25. Przebiegi wyjść dla poprawionych nastaw

### 5.1.5. PID - konfiguracja czwarta

Czwarta konfiguracja naszego PID'a zakłada, że wyjście pierwsze sterujemy wejściem trzecim, wyjście drugie wejściem drugim, a wyjście trzecie wejściem pierwszym. Ponieważ nastawy dla toru pierwszego i drugiego wyliczyłem już w poprzednich konfiguracjach nie będę zamieszczał ponownie tych procesów. Ta konfiguracja miała najniższy wskaźnik uwarunkowania macierzy, więc potencjalnie powinna być najlepsza.

#### Tor trzeci

Jest to jedyny tor, który musimy obliczyć w tej konfiguracji (reszta torów jest taka sama jak w pierwszej konfiguracji). Zaczynamy od wzmocnienia  $K$ . Po kilku próbach znaleźliśmy do wartość wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 15,3974$ , co daje końcową wartość wzmocnienia  $K = 7,6987$ . Przebieg przedstawiliśmy na wykresie 5.26.

Następną dobieraną wartością było  $T_i$ . Po kilku próbach doszliśmy do wniosku, że najlepszą wartością jest  $T_i=5$ . Dla tej wartości zarówno przebieg jak i wartość błędu są najlepsze. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.26. Przebiegi zamieściliśmy na wykresie 5.27.

Ostatnim dobieranym parametrem był czas wyprzedzenia  $T_d$ . Niemniej okazało się, że włączenie członu różniczkowego powoduje bardziej pogorszenie przebiegu niż jego polepszenie. Z tego powodu postanowiliśmy pozostać przy wartości  $T_d = 0$ . Wartości błędów dla wybranych wartości przedstawione zostały w tabeli 5.27, a przebiegi na wykresie 5.28.

$y$	$u$
$y_1$	$u_3$
$y_2$	$u_2$
$y_3$	$u_1$

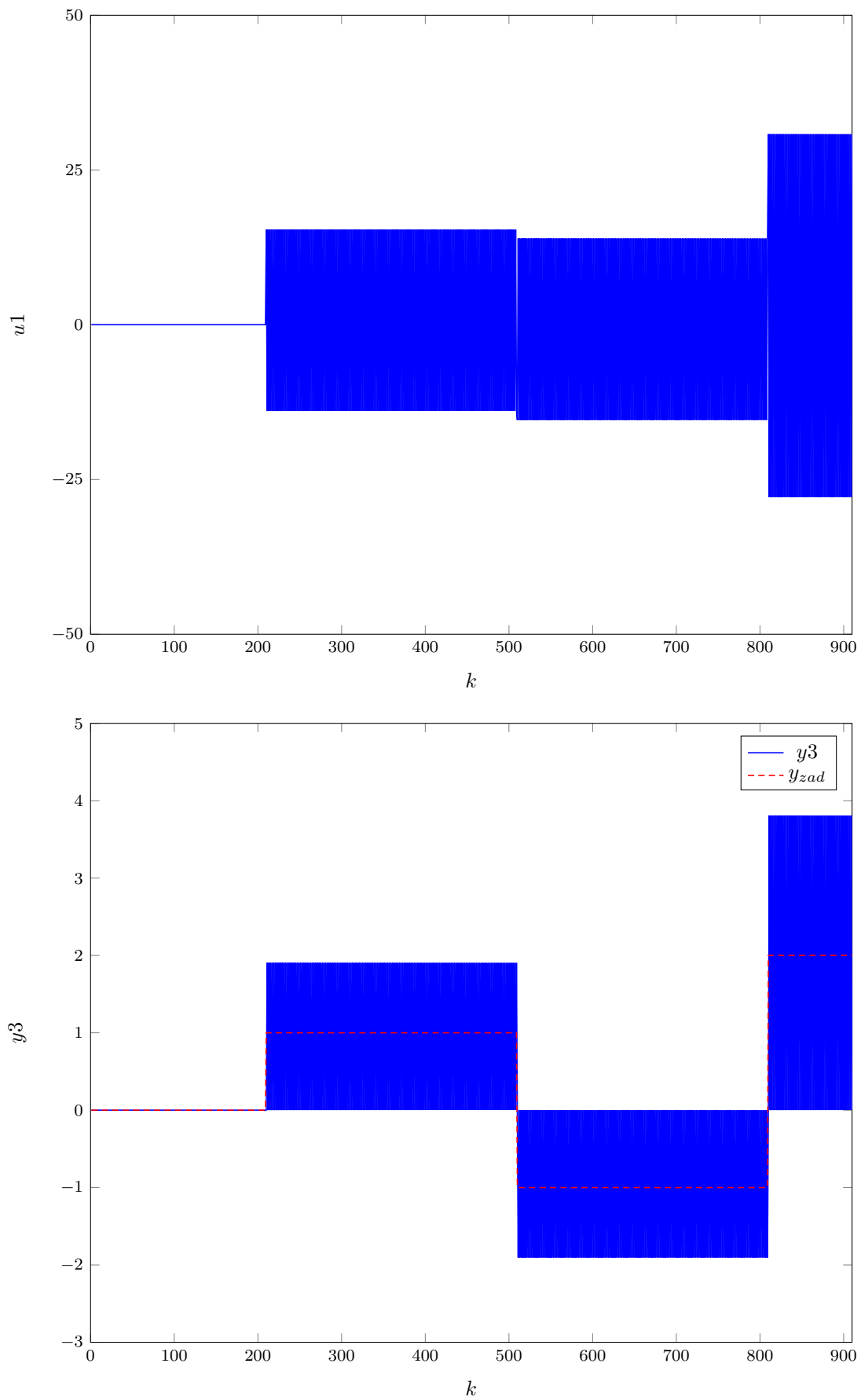
Tab. 5.25. Czwarta konfiguracja

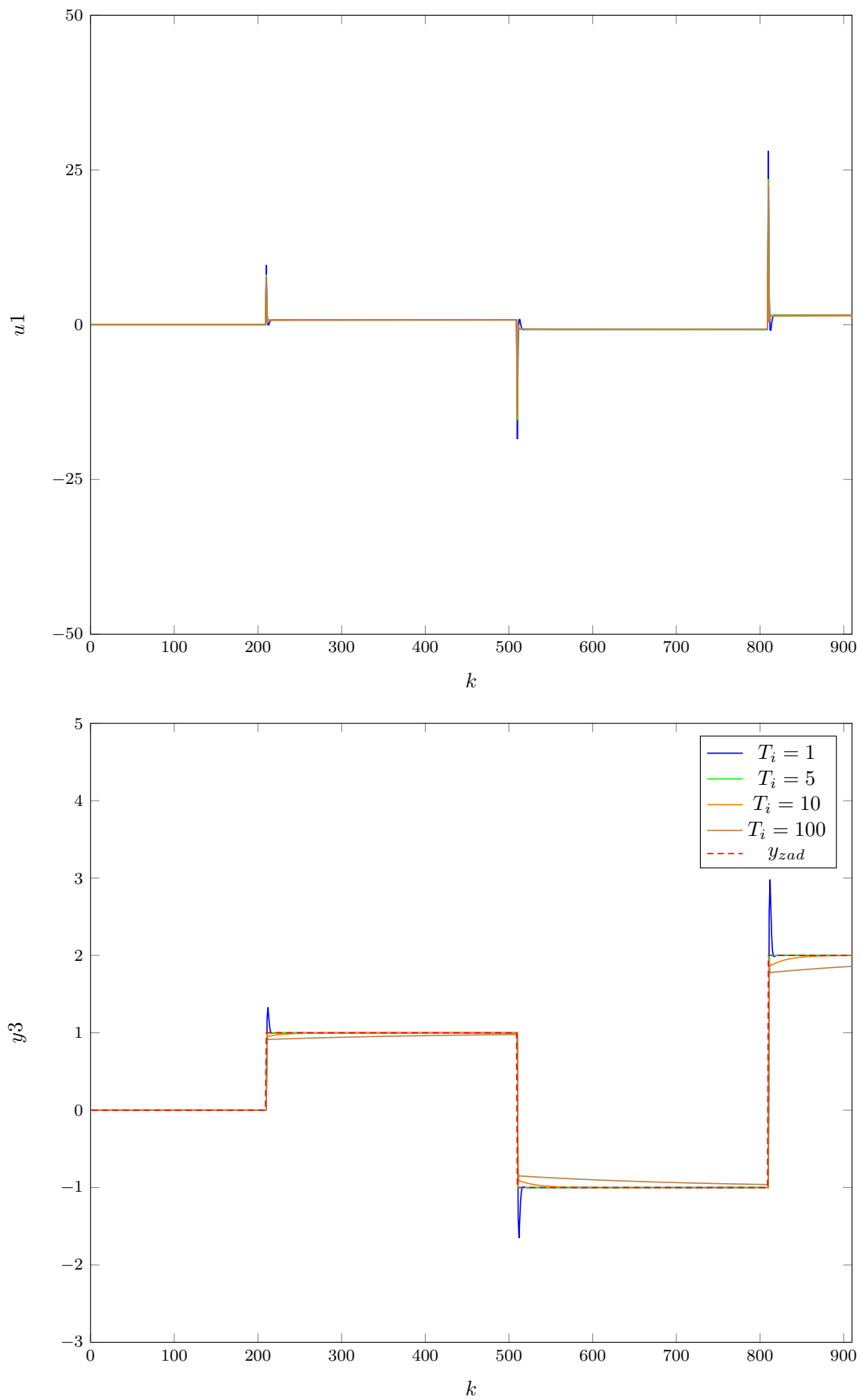
$T_i$	$E3$
1	16,6366
5	14,0000
10	14,3245
100	19,9801

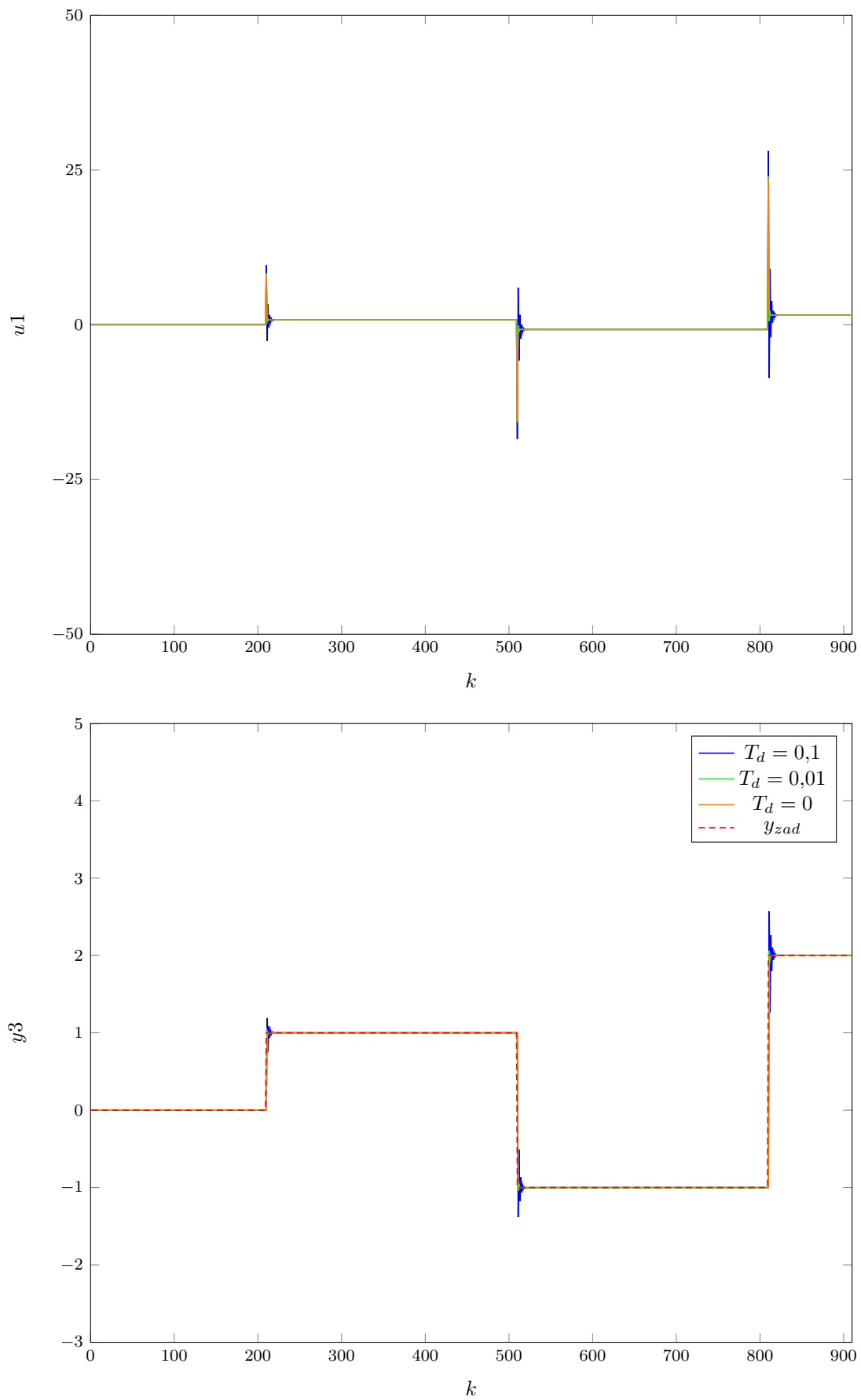
Tab. 5.26. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_i$

$T_i$	$E3$
0	14,0000
0.01	14,0114
0.1	15,5408

Tab. 5.27. Wartości błędu dla różnych wartości  $T_d$

Rys. 5.26. Przebieg wyjścia trzeciego i wejścia pierwszego dla wzmocnienia oscylacyjnego  $K_{osc} = 15,3974$

Rys. 5.27. Przebieg wyjścia trzeciego i wejścia pierwszego dla różnych wartości  $T_i$

Rys. 5.28. Przebieg wyjścia trzeciego i wejścia pierwszego dla różnych wartości  $T_d$



### Całość

Przy oryginalnych nastawach PID nie działa w ogóle (wartości dążą do nieskończoności), dlatego nie zamieszczałem ich wykresów. Wartości błędów także dążą do nieskończoności. Nastawy należało całkowicie zmienić, aby osiągnąć logicznie wyglądający przebieg. Wartości błędów są o wiele wyższe niż te znalezione dla pierwszych dwóch konfiguracji, nie licząc toru pierwszego, którego błąd jest niski. Może być to spowodowane tym, że nie udało nam się znaleźć odpowiednich nastaw. Przebiegi nie są idealne, ale akceptowalne. Poniżej w tabeli 5.30 znajdują się wyliczone nowe wartości błędów. Przebiegi sterowań i wyjść dla poprawionych nastaw znajdują się na wykresach 5.29 oraz 5.30.

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	6,6821	9,0985	7,6987
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	3	5	5
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	0	0	0

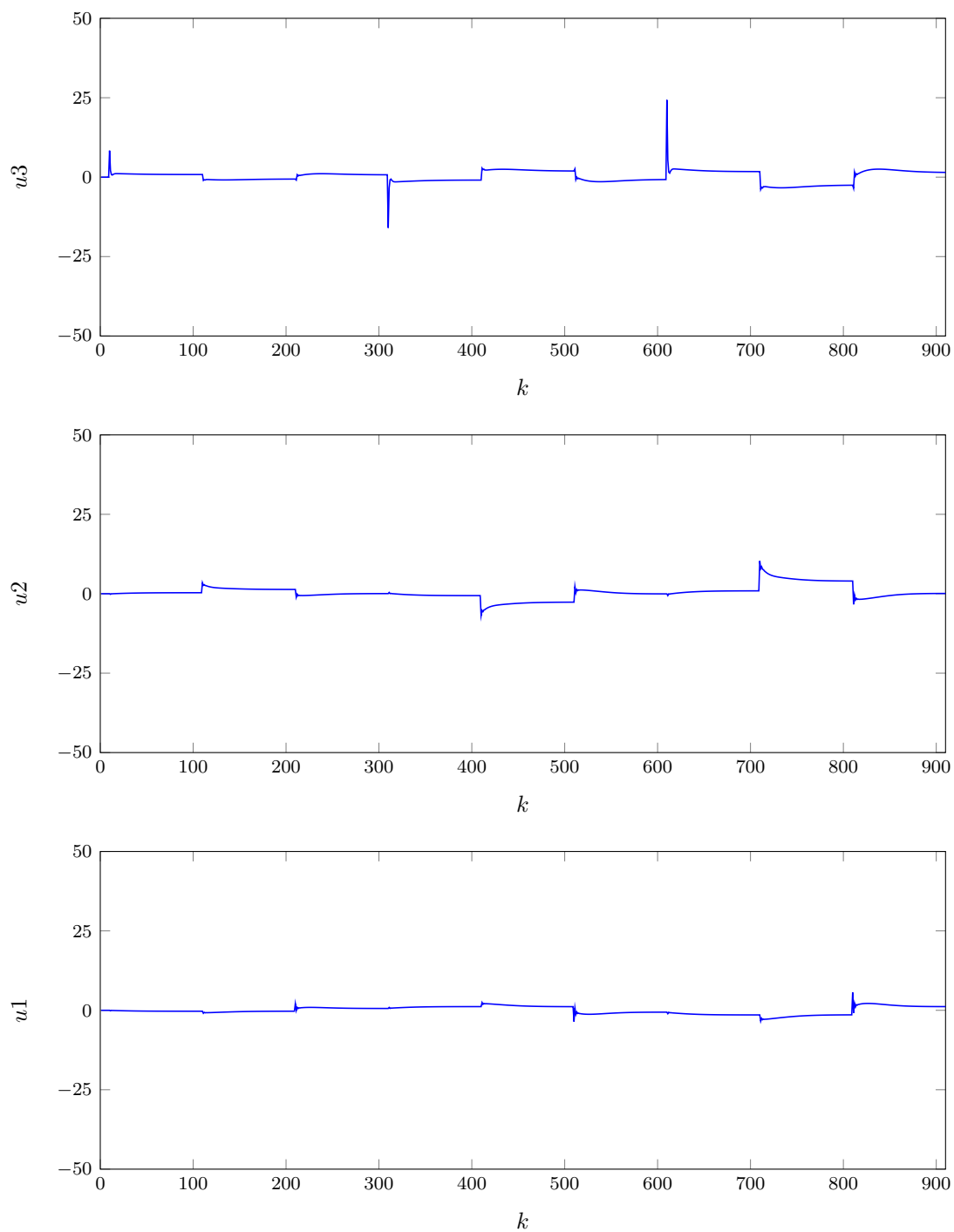
Tab. 5.28. Nastawy oryginalne

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	6,6821	3,0328	0,7699
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	1	7	5
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	0	0	1

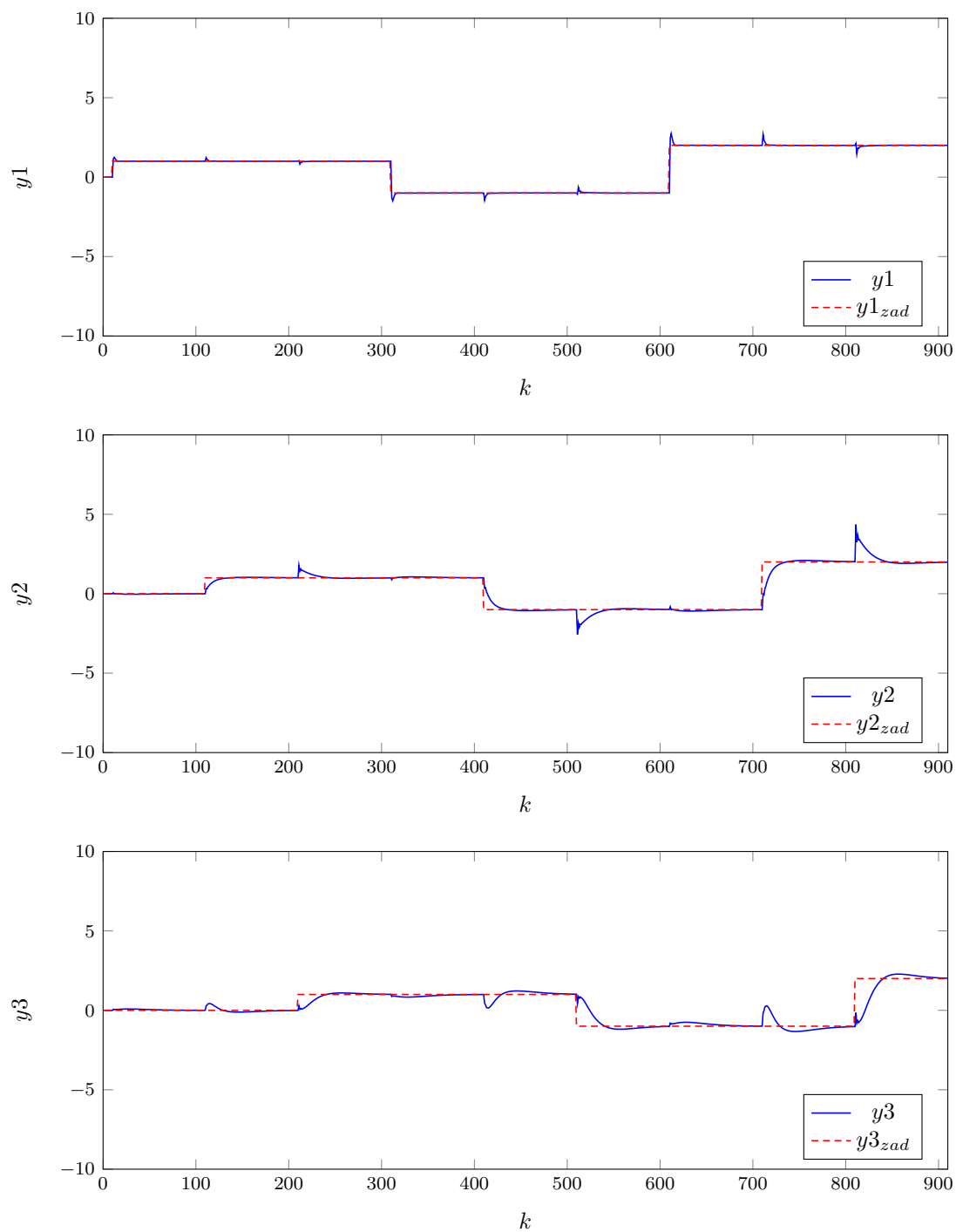
Tab. 5.29. Nastawy poprawione

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
279,8519	17,2126	84,7003	177,9390

Tab. 5.30. Wartości błędów dla nastaw poprawionych



Rys. 5.29. Przebiegi sterowań dla poprawionych nastaw



Rys. 5.30. Przebiegi wyjść dla poprawionych nastaw

### 5.1.6. Wnioski

Regulacja PID nie w każdej konfiguracji sprawuje się dobrze. W pierwszych dwóch wypróbowanych konfiguracjach zarówno obliczone wartości błędów jak i przebiegi były bardzo dobre. W pozostałych dwóch część wyjść była regulowana dobrze, jednakże dla większości jakość regulacji nie była idealna, a błędy znaczne. Najdziwniejszą rzeczą było jednak to, że badany obiekt prawie nigdy nie wymagał od nas użycia członu różniczkującego (człon zwiększał błąd i psuł przebiegi). Prawdopodobnie jest to spowodowane jakąś specyficzną własnością obiektu.

## 5.2. DMC

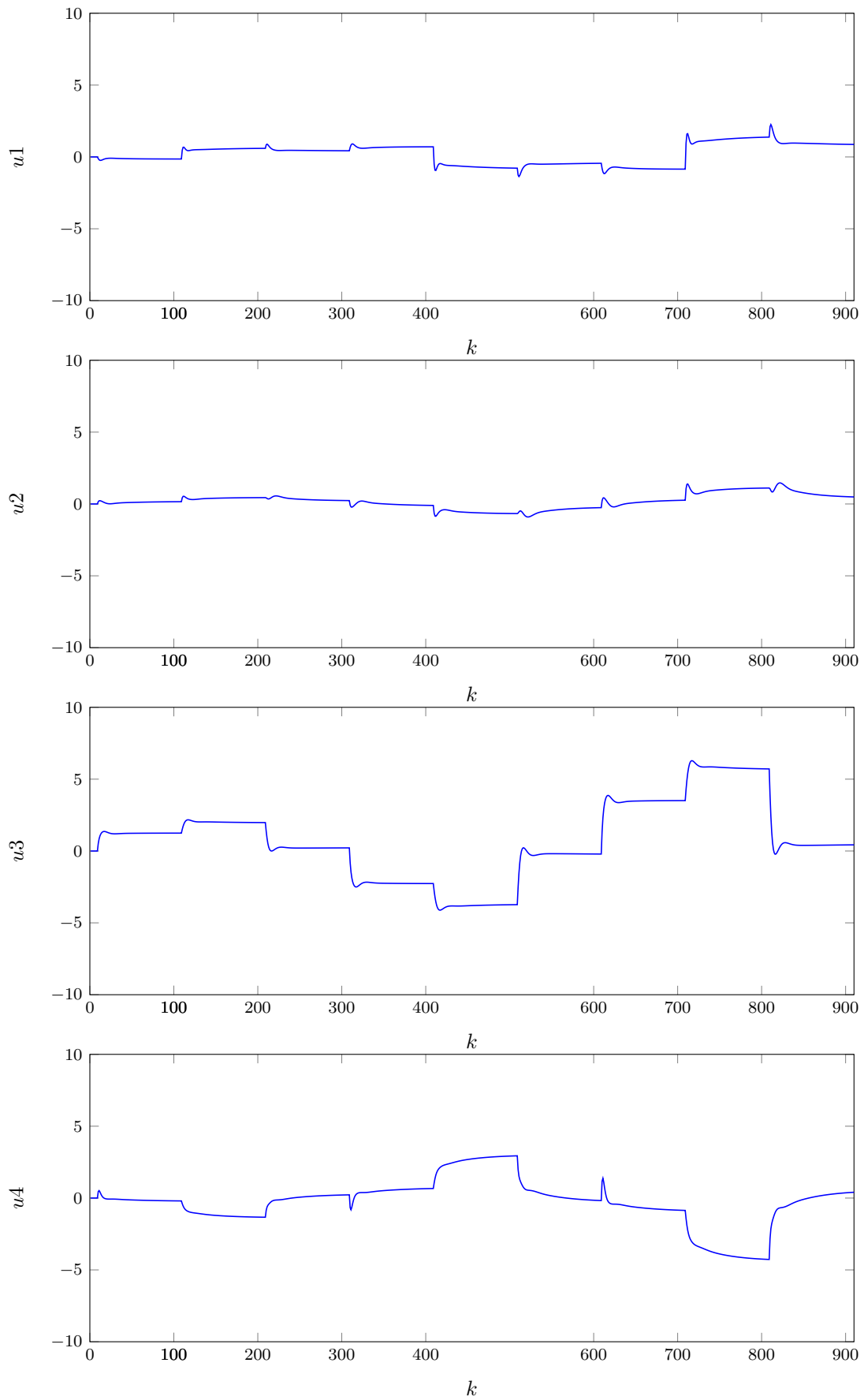
Podczas dobierania DMC dobieramy takie parametry jak:

- $D$  - horyzont dynamiki
- $N$  - horyzont predykcji
- $N_u$  - horyzont sterowania
- współczynniki wagowe macierzy  $\Psi$  w ilości  $n_y=3$
- współczynniki wagowe macierzy  $\Lambda$  w ilości  $n_u=4$

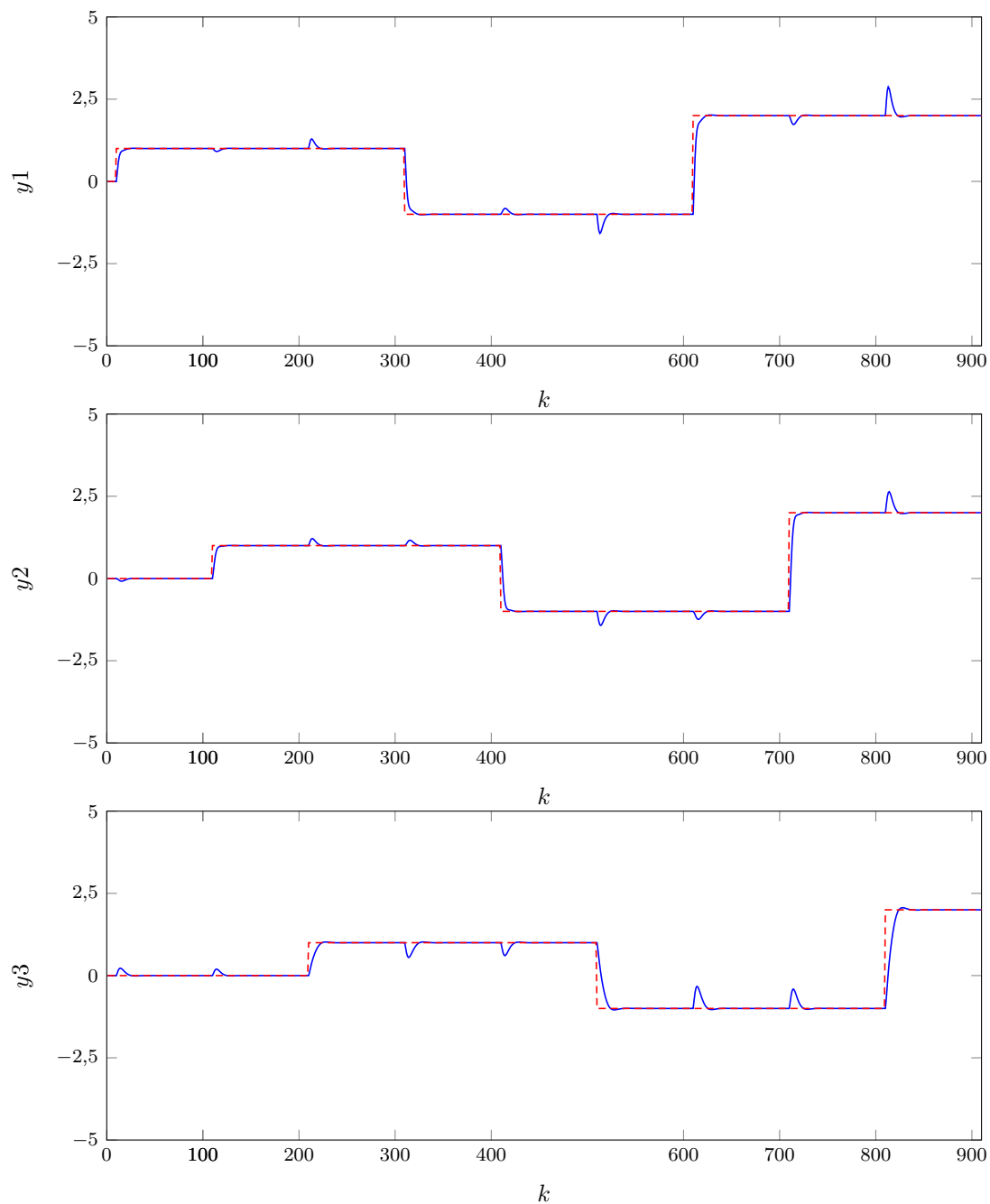
W tym przypadku wszystkie horyzonty przyjmujemy jako stałe przy czym przyjmujemy  $D=N=N_u=200$ , co jest równe liczbie zebranych kroków odpowiedzi skokowych. Zmniejszanie horyzontów żądło poprawia jakość regulacji, celem takich działań najczęściej jest zmniejszenie złożoności obliczeniowej i tym samym czasu obliczeń. Dobieranie nastaw zaczęliśmy od dobrania kolejnych współczynników wagowych  $\psi$ , a następnie współczynników  $\lambda$ . Poniżej zamieściliśmy wykresy sterowań i wyjść dla nastaw początkowych (wszystkie współczynniki równe 1) oraz tabelkę w wartościach błędów dla wszystkich wyjść.

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
118,9959	30,7112	31,6862	56,5985

Tab. 5.31. Wartości błędów dla nastaw początkowych



Rys. 5.31. Wartości wejść przy nastawach początkowych DMC



Rys. 5.32. Wartości wyjść przy nastawach początkowych DMC

### 5.2.1. Pierwszy współczynnik psi

Po kilku testach doszliśmy do wniosku, że najlepsza wartość  $\psi_1$  to 2,7. Zmniejszając lub zwiększając tę wartość zwiększają się błędy. Wartości błędów dla różnych wartości  $\psi_1$  znajdują się w tabeli 5.32. Przebiegi sygnałów sterujących i wyjść są na wykresach 5.33 oraz 5.34. Większość wykresów nie różni się tak bardzo. Najbardziej poprawił się przebieg  $y_1$ , co ma sens biorąc pod uwagę, że kolejne współczynniki psi mają największy wpływ na kolejne wyjścia.

### 5.2.2. Drugi współczynnik psi

Najlepsza znaleziona przez nas podczas testowania wartość  $\psi_2$  (taka dla której błąd E jest najniższy) to 40. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.33. Przebiegi znajdują się na wykresach 5.35 i 5.36. Wartości wejścia trzeciego nieco się pogorszyły, ale za to widać znaczną poprawę w regulacji sygnału  $y_2$ .

### 5.2.3. Trzeci współczynnik psi

Najlepsza znaleziona przez nas podczas testowania wartość  $\psi_3$  (taka dla której błąd E jest najniższy) to 7. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.34. Przebiegi znajdują się na wykresach 5.37 i 5.38. Dobranie tego parametru najbardziej wyrównało wartości błędów wszystkich torów. Przebiegi sterowań widocznie się pogorszyły. Mimo wszystko osiągnęliśmy przez nie wartości nie są nieakceptowalne. Nieco gorzej wygląda również regulacja wartości  $y_1$ , za to polepszył się przebieg wyjścia  $y_3$ .

$\psi_1$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	118,9959	30,7112	31,6862	56,5985
2,7	116,2096	20,3765	32,4374	63,3958
5	116,5936	17,5255	32,7217	66,3464

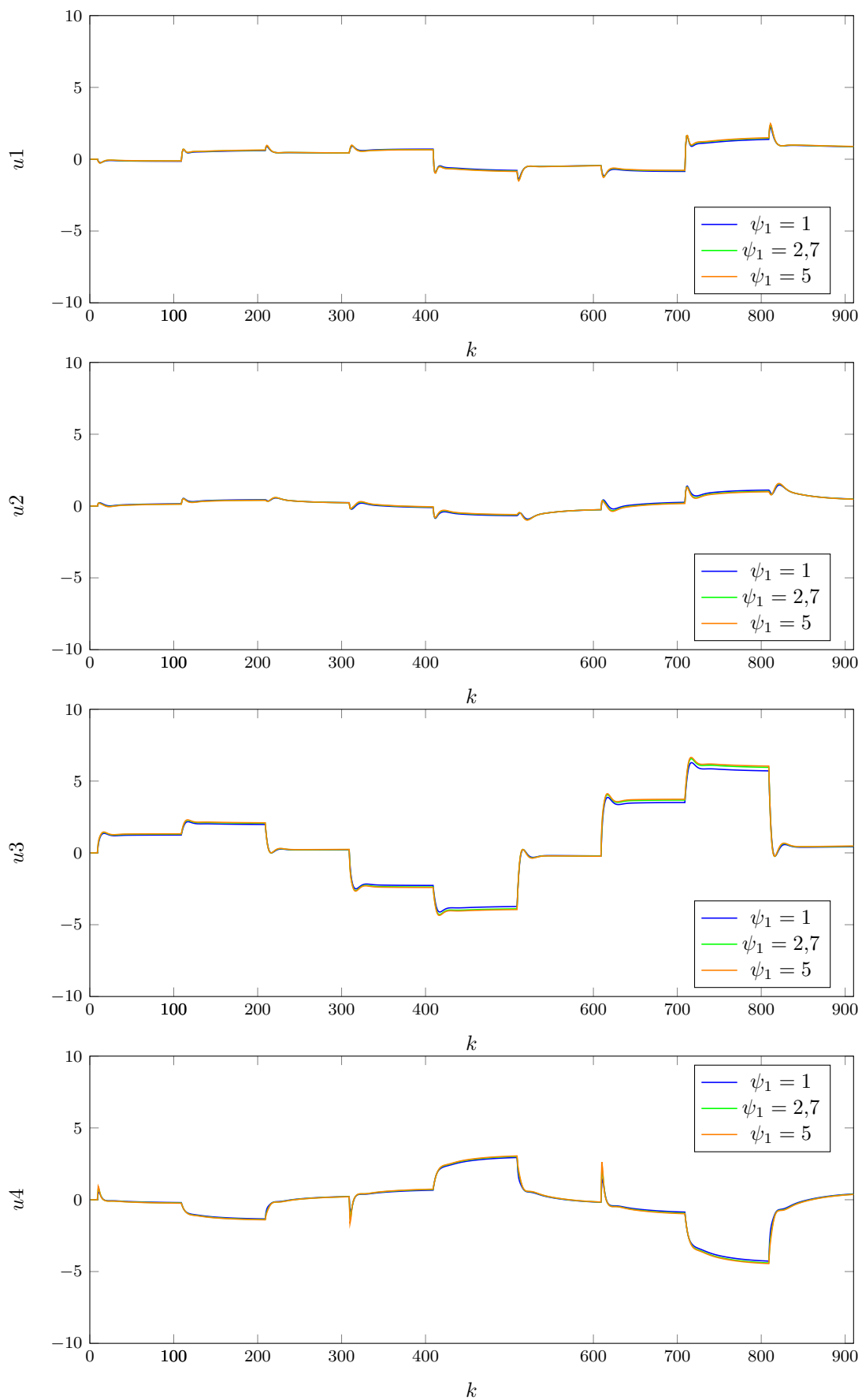
Tab. 5.32. Wartości błędów dla różnych wartości  $\psi_1$

$\psi_2$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	116,2096	20,4374	32,4374	63,3958
40	110,5704	20,6878	14,9057	74,9769
100	110,6651	20,7139	14,2842	75,6670

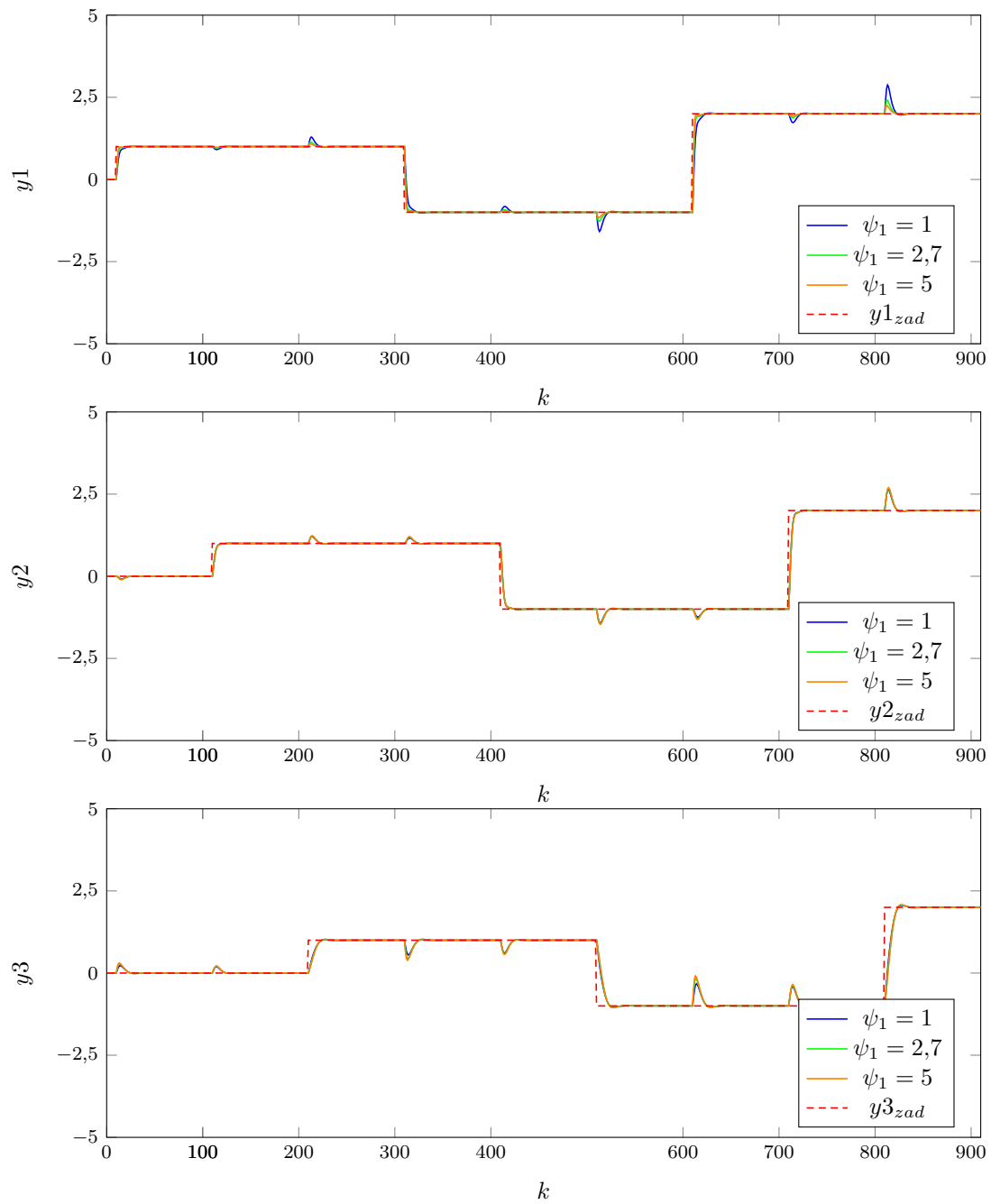
Tab. 5.33. Wartości błędów dla różnych wartości  $\psi_2$

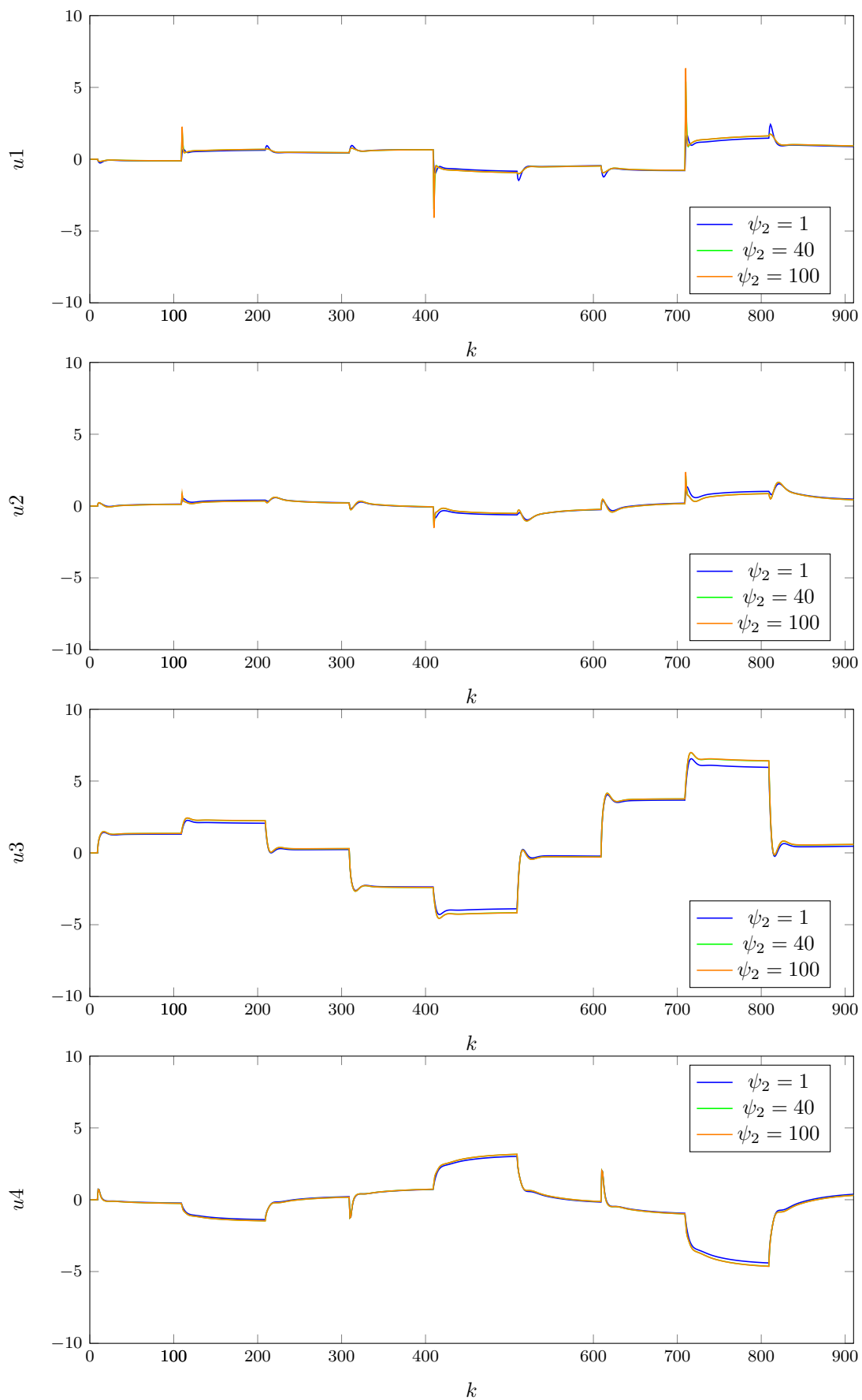
$\psi_3$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	110,5704	20,6878	14,9057	74,9769
7	85,3216	35,4493	15,0596	34,8127
15	90,5030	49,4658	15,2455	25,7917

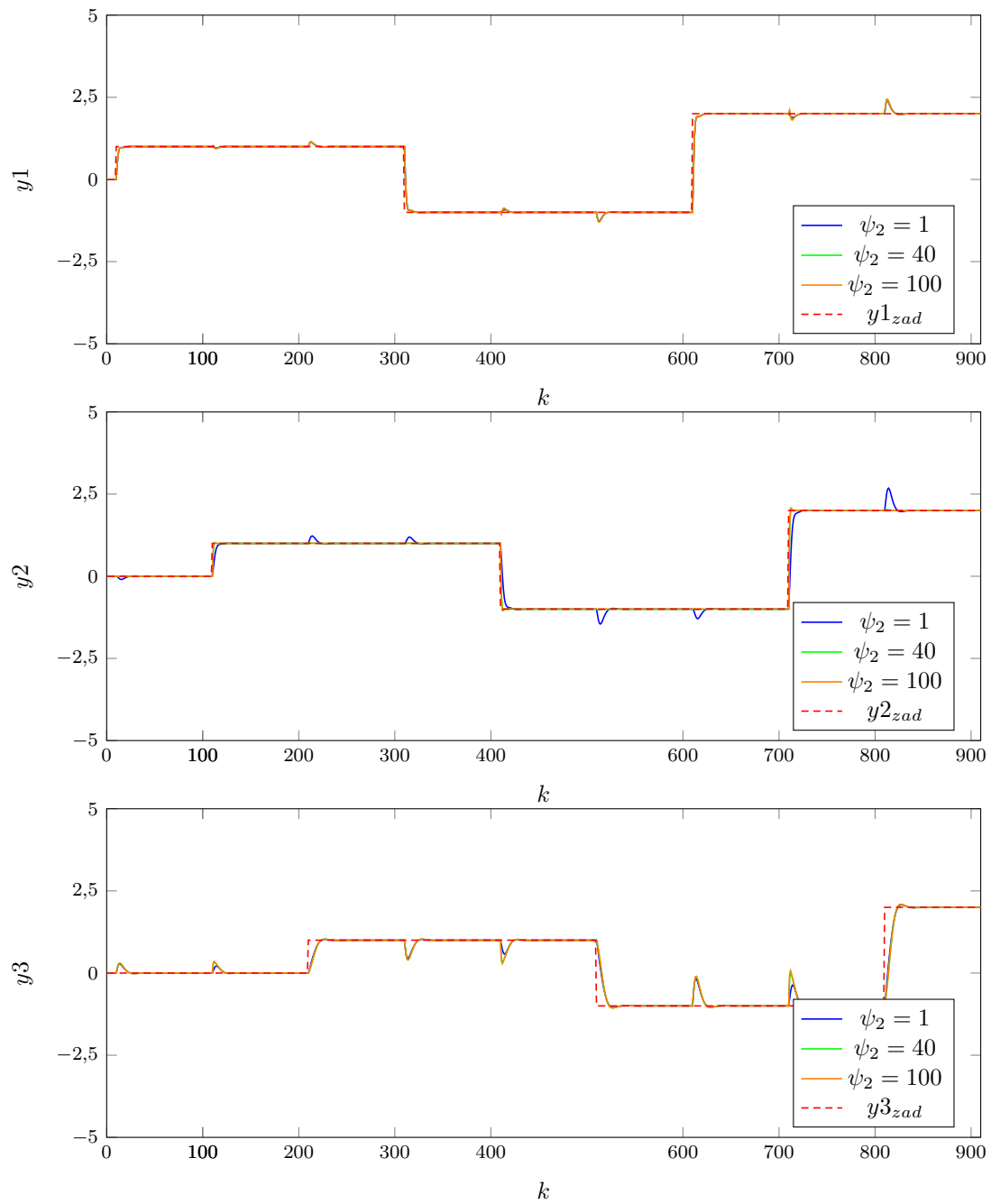
Tab. 5.34. Wartości błędów dla różnych wartości  $\psi_3$

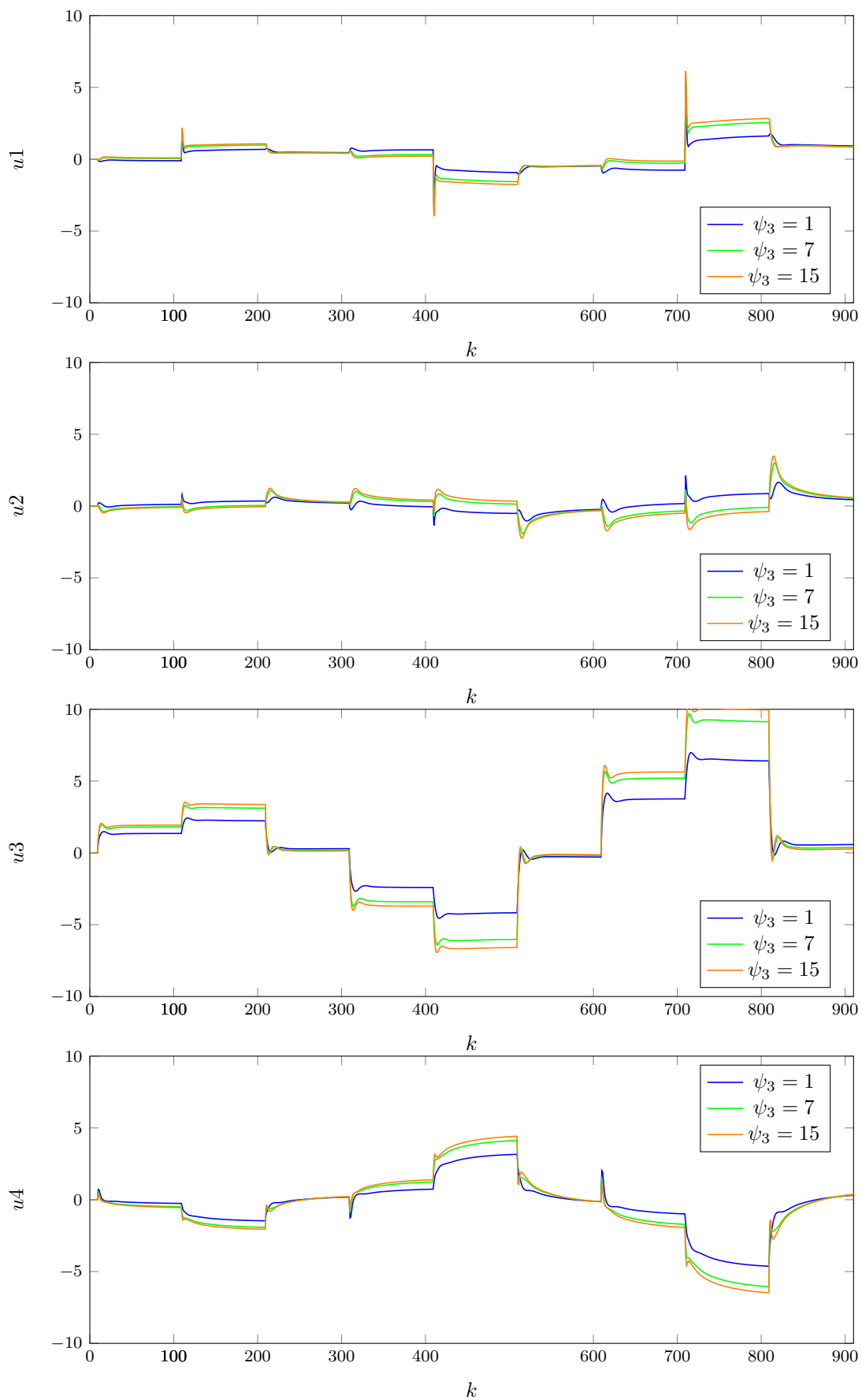
Rys. 5.33. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\psi_1$

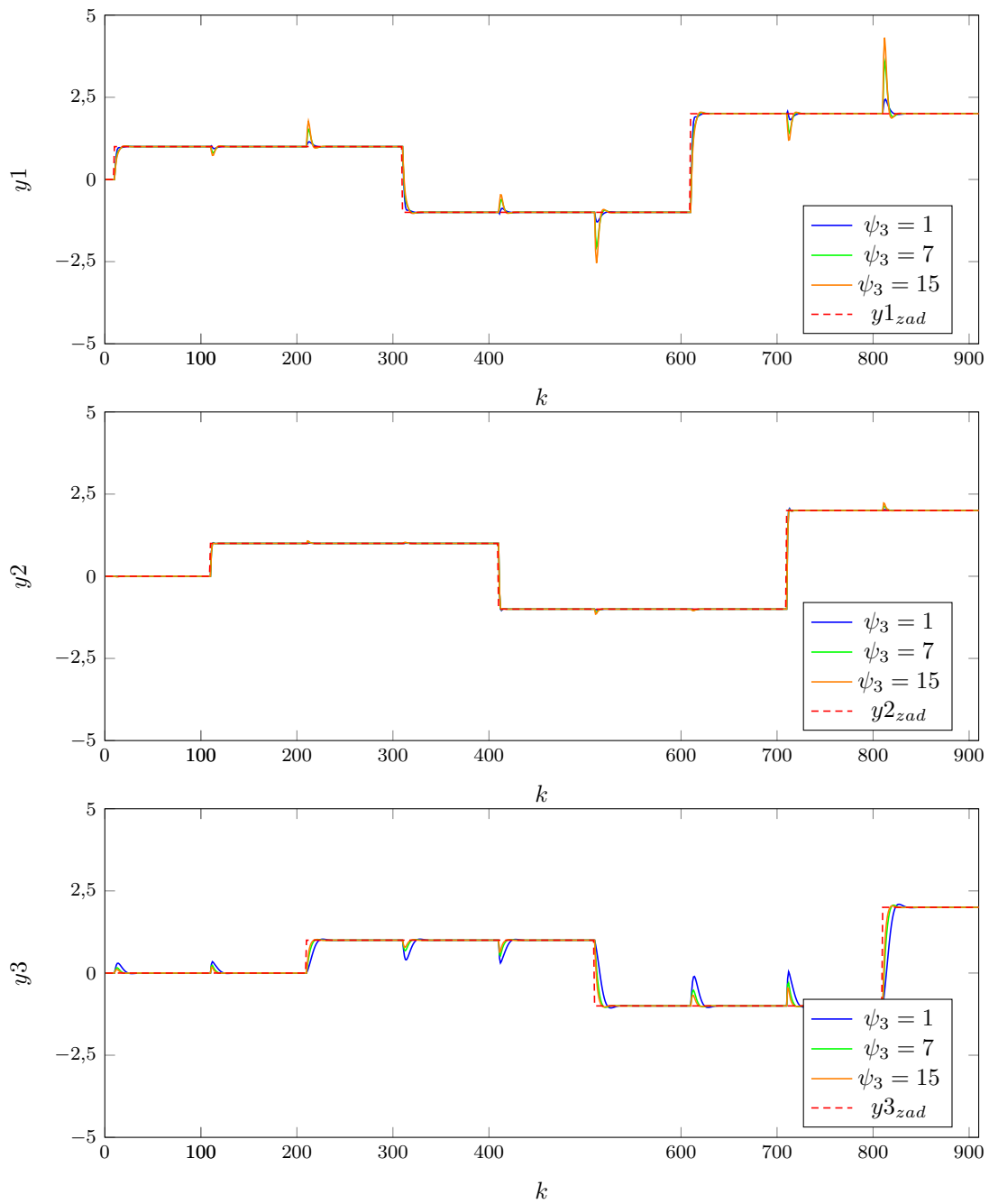


Rys. 5.34. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\psi_1$

Rys. 5.35. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\psi_2$

Rys. 5.36. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\psi_2$

Rys. 5.37. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\psi_3$

Rys. 5.38. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\psi_3$

#### 5.2.4. Pierwszy współczynnik lambda

Najlepsza znaleziona przez nas podczas testowania wartość  $\lambda_1$  (taka dla której błąd  $E$  jest najniższy) to 0.05. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.35. Przebiegi znajdują się na wykresach 5.39 i 5.40. Obniżenie  $\lambda_1$  do 0.05 spowodowałoby zminimalizowanie błędu. Z drugiej strony zwiększenie parametru do 10, a nawet 20 nie daje pogorszenia w przebiegu wyjść, ale za to znacznie poprawia wykresy sterowań  $u_1$ ,  $u_3$  i  $u_4$ . Mimo, że pogorszenia się sterowania  $u_2$ , zdecydowaliśmy się ostatecznie na podniesienie parametru  $\lambda_1$  do 20.

#### 5.2.5. Drugi współczynnik lambda

Teoretycznie najlepsza znaleziona przez nas podczas testowania wartość  $\lambda_2$  (taka dla której błąd  $E$  jest najniższy) to 0.01. Błędy dla różnych wartości znajdują się w tabeli 5.36. Przebiegi znajdują się na wykresach 5.41 i 5.42. Obniżenie  $\lambda_2$  do 0.01 spowodowałoby zminimalizowanie błędu, ale pogorszyłoby przebiegi zarówno sterowań jak i wyjść. Jego powiększenie powoduje zwiększenie błędu i nie poprawia znacznie ani stanu wyjść ani sterowań (niektóre fragmenty wyglądają nawet gorzej). Dlatego właśnie zdecydowaliśmy się ostatecznie na zostawienie parametru  $\lambda_2=1$ .

#### 5.2.6. Trzeci współczynnik lambda

Najlepszą możliwością jest według nas ustawienie parametru  $\lambda_3$  na wartość 0. Mimo że powoduje to duże pogorszenie przebiegów sterowań, umożliwia także zmniejszenie wszystkich błędów oraz poprawę przebiegów wszystkich wyjść. Wartości błędów dla różnych wartości  $\lambda_3$  znajdują się w tabeli 5.37, a wykresy mają numery 5.43 i 5.44.

$\lambda_1$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	85,3216	35,4493	15,0596	34,8127
0.05	84,5415	35,5348	14,1362	34,8705
10	89,7500	35,7278	18,3551	35,6671
20	91,5219	35,9948	19,3204	36,2067

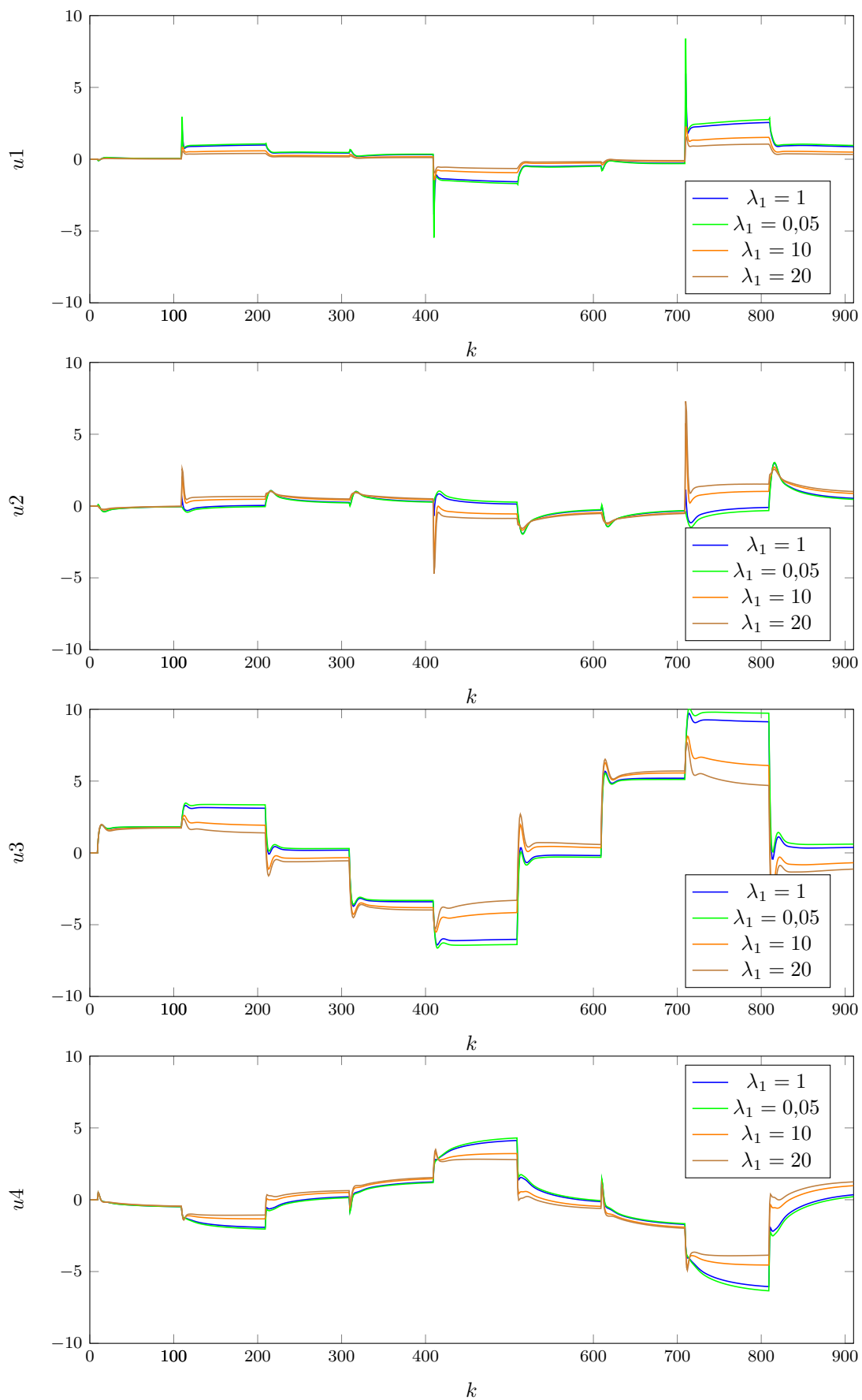
Tab. 5.35. Wartości błędów dla różnych wartości  $\lambda_1$

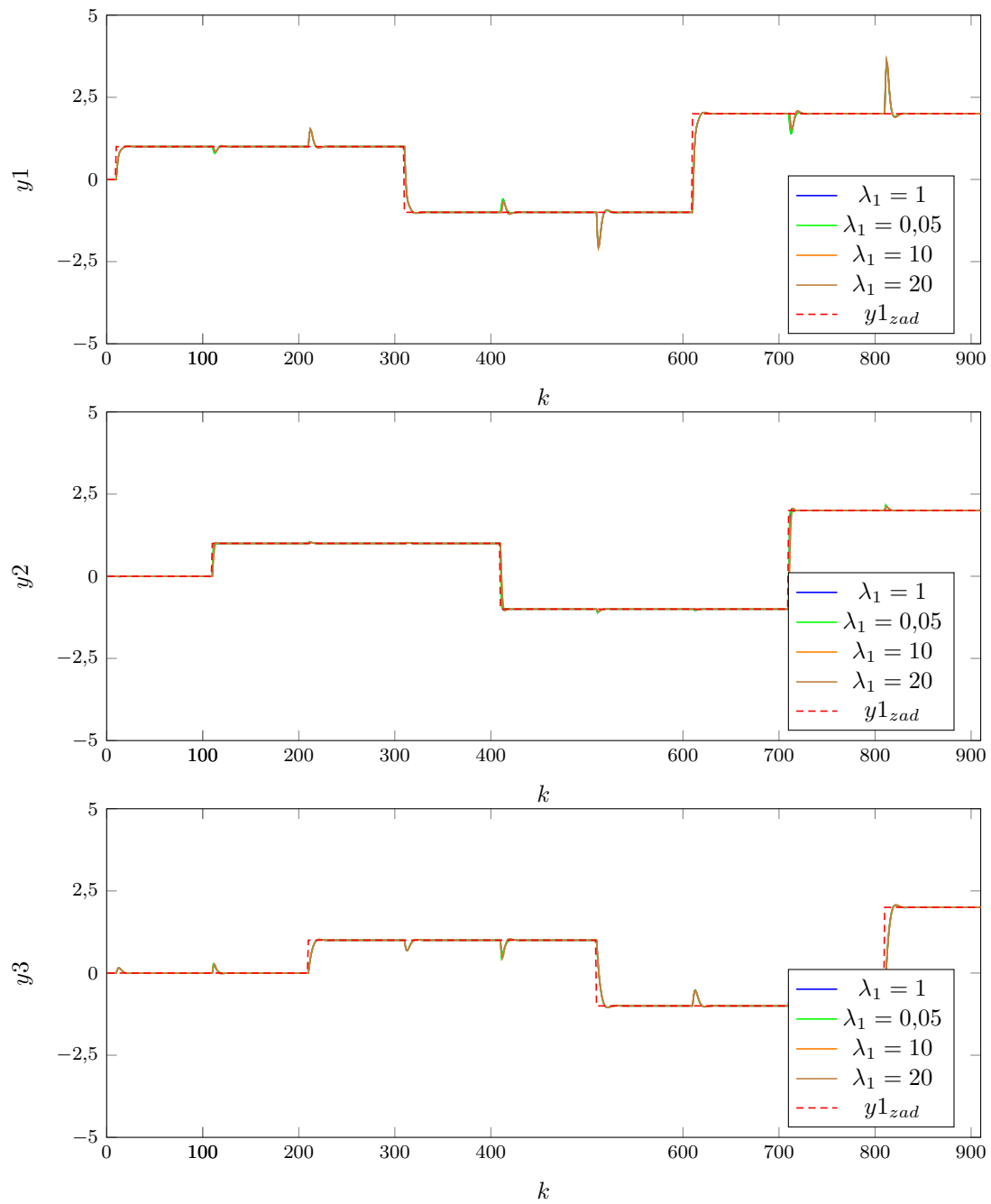
$\lambda_2$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	91,5219	35,9948	19,3204	36,2067
0.01	89,9007	36,0121	14,3511	39,5375
10	94,0455	36,3659	22,3931	35,2866

Tab. 5.36. Wartości błędów dla różnych wartości  $\lambda_2$

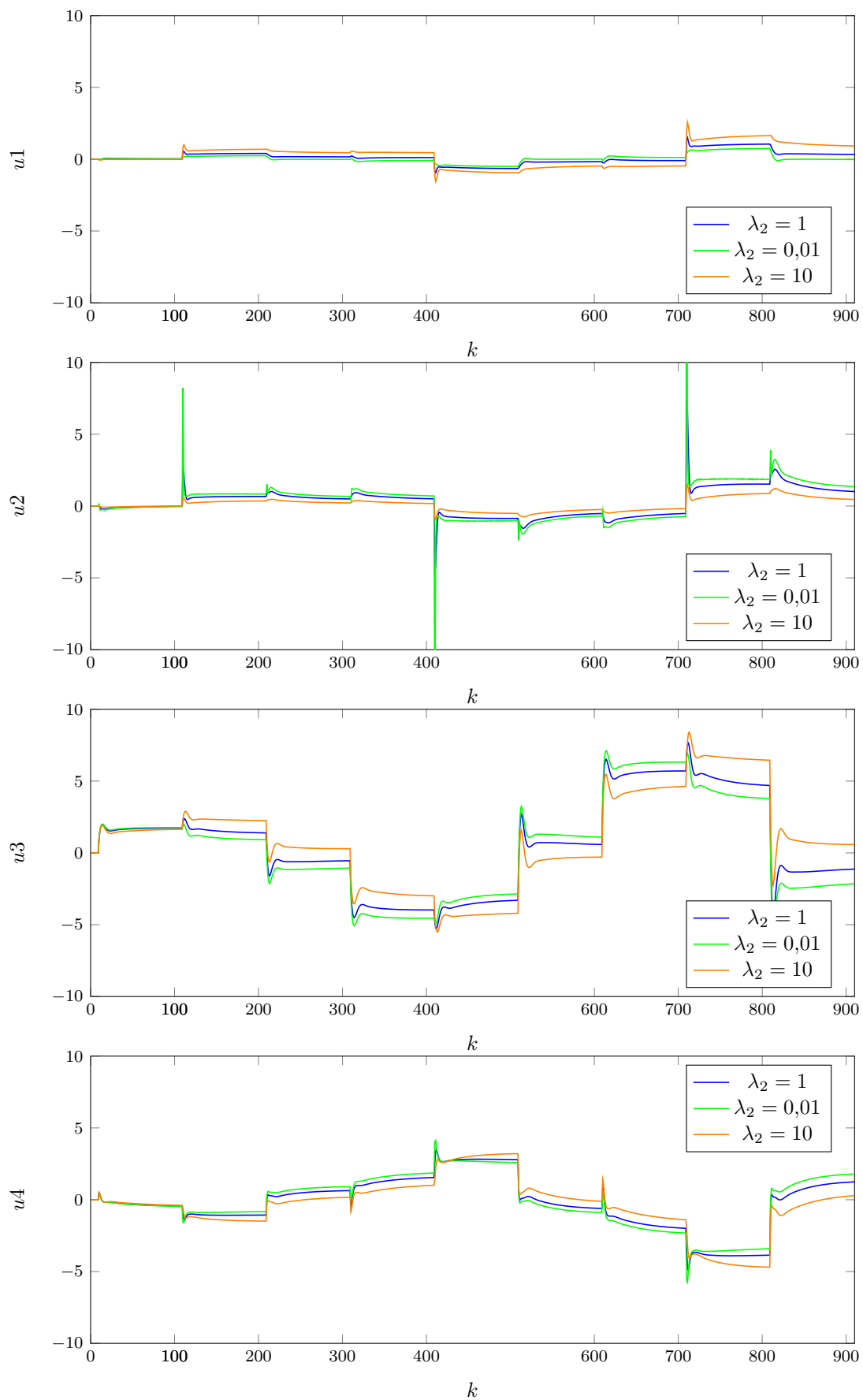
$\lambda_3$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	91,5219	35,9948	19,3204	36,2067
0	60,9477	16,5775	19,0707	25,2996
5	120,3487	57,0457	19,3272	43,9759

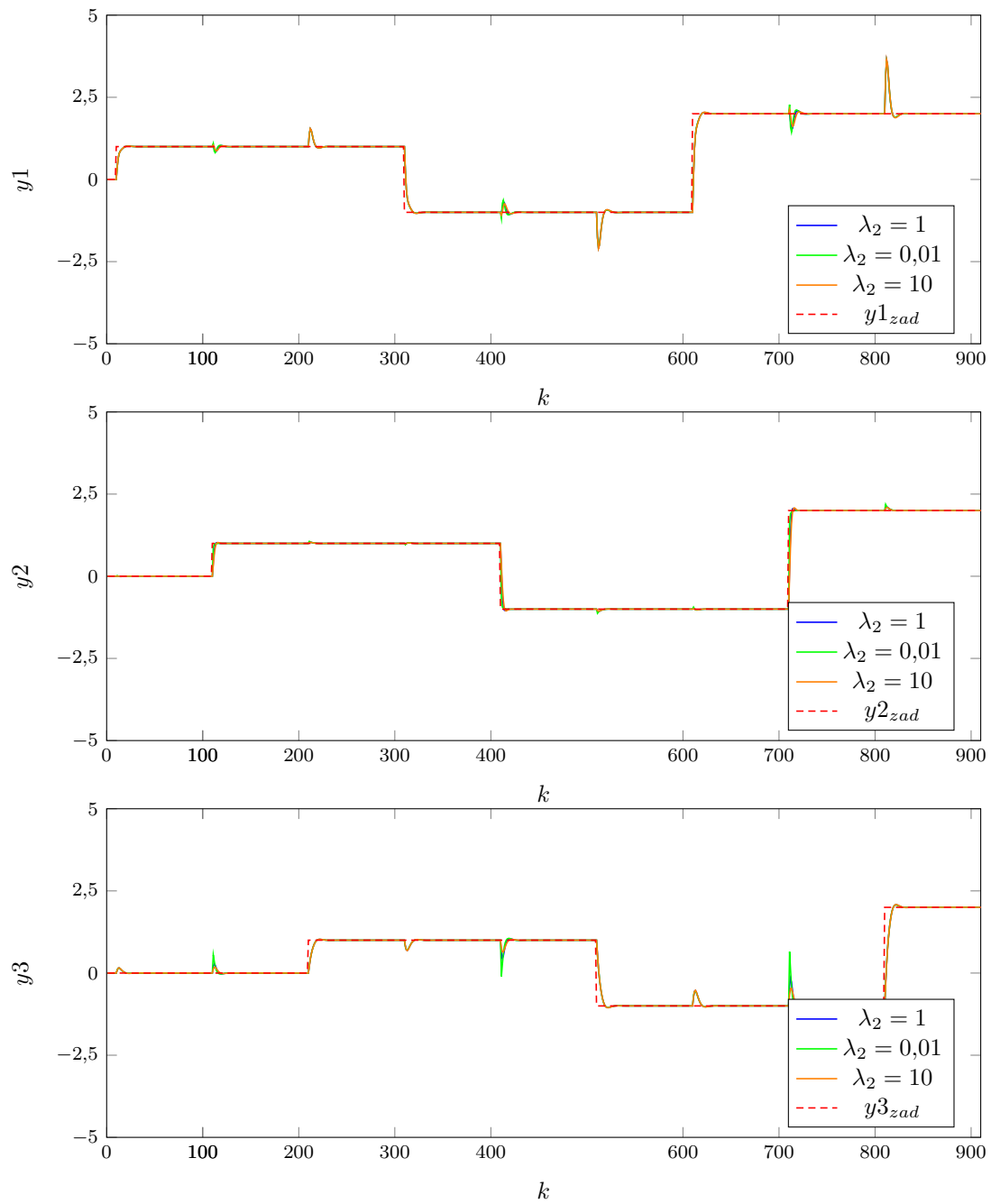
Tab. 5.37. Wartości błędów dla różnych wartości  $\lambda_3$

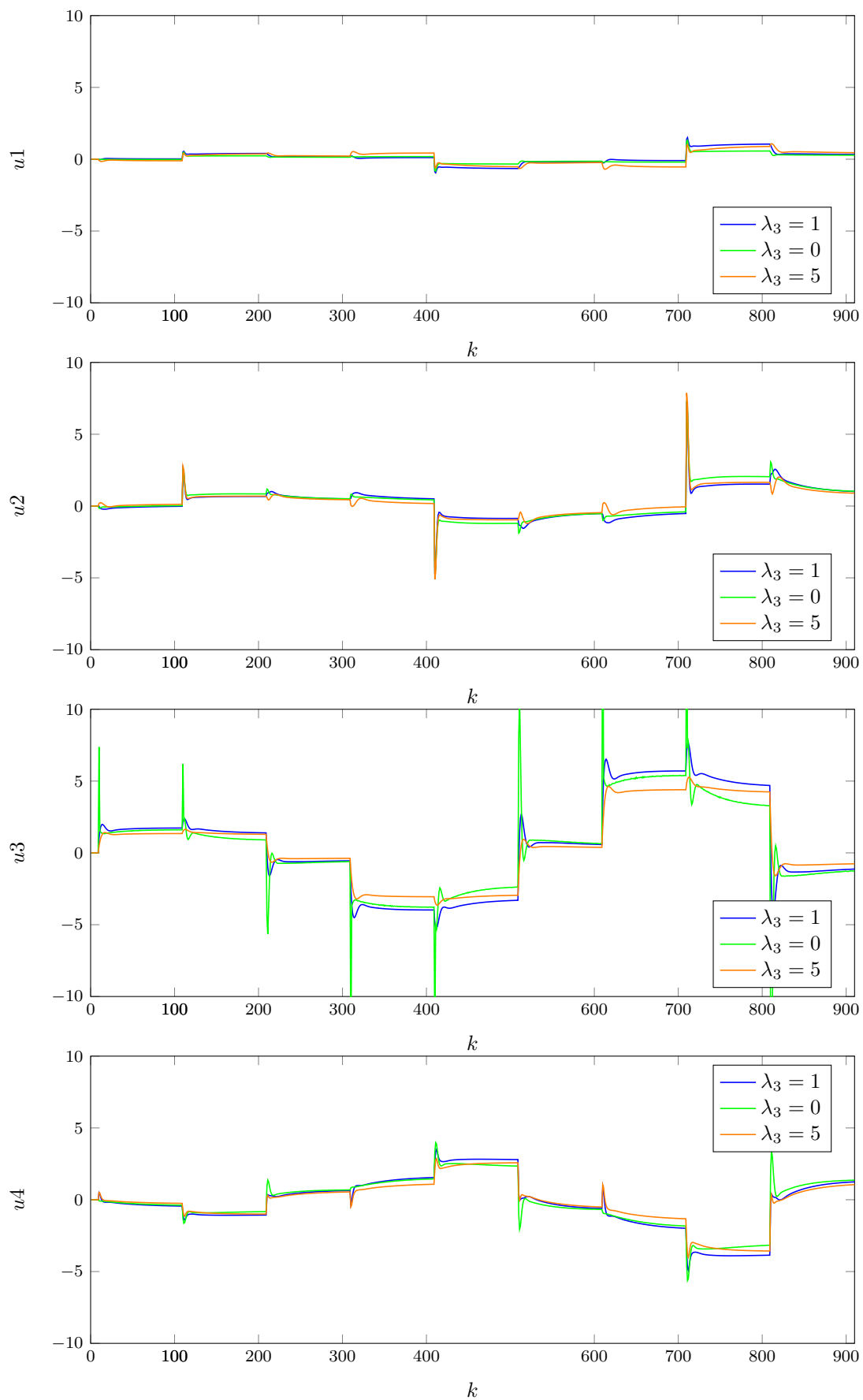
Rys. 5.39. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\lambda_1$

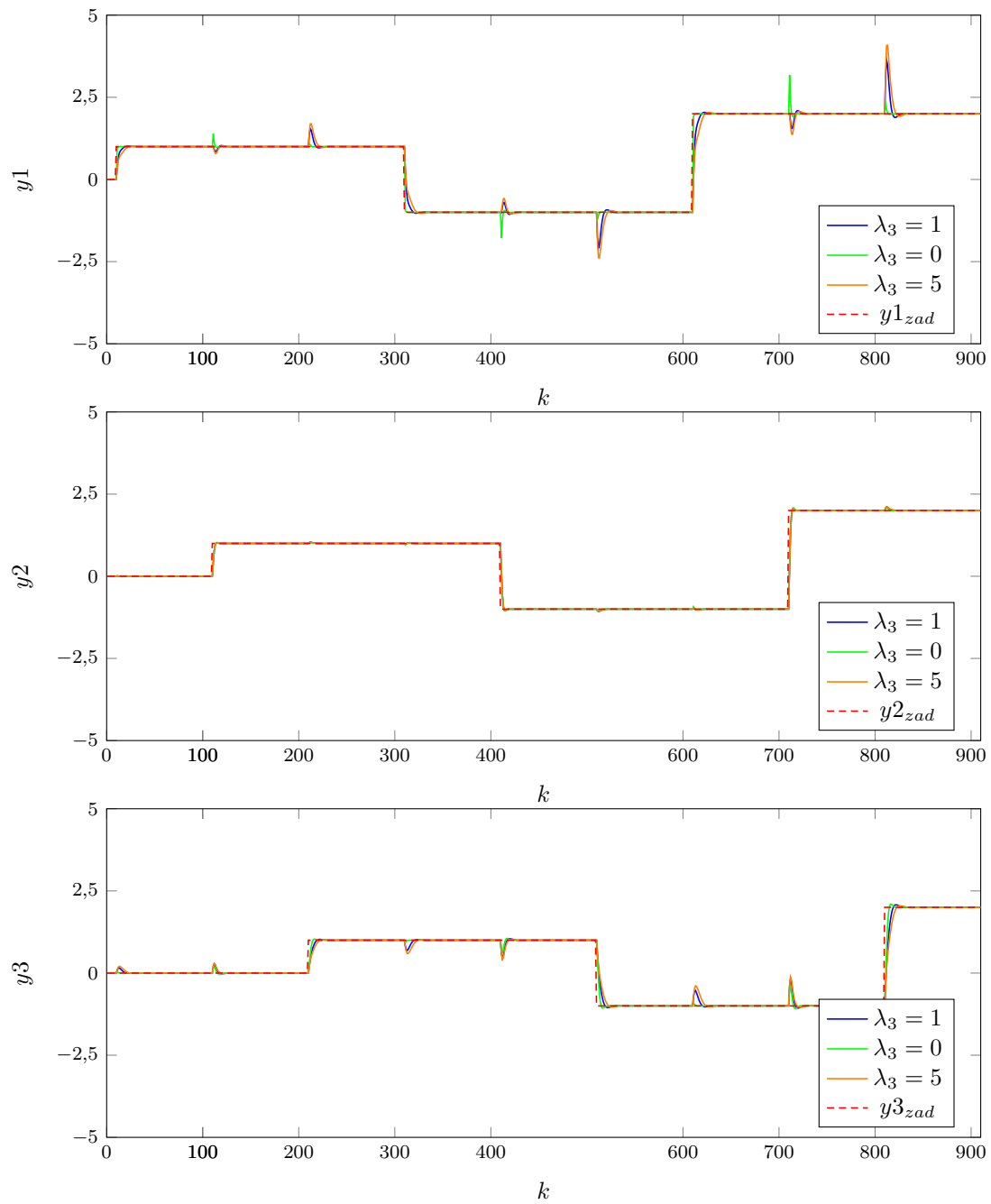
Rys. 5.40. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\lambda_1$



Rys. 5.41. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\lambda_2$

Rys. 5.42. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\lambda_2$

Rys. 5.43. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\lambda_3$

Rys. 5.44. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\lambda_3$

### 5.2.7. Czwarty współczynnik lambda

Czwarty współczynnik lambda był ostatnim dobieranym przez nas parametrem regulatora DMC. Najlepszą możliwością jest według nas ustawienie parametru  $\lambda_4$  na wartość 0, tak jak  $\lambda_3$ . Mimo że powoduje to duże pogorszenie przebiegów sterowań (zwłaszcza  $u_3$  i  $u_4$ ), umożliwia także duże zmniejszenie błędów oraz poprawę przebiegów wyjść (widoczne zwłaszcza dla  $y_3$ ). Wartości błędów dla różnych wartości  $\lambda_3$  znajdują się w tabeli 5.37, a wykresy mają numery 5.43 i 5.44.

### 5.2.8. Wnioski

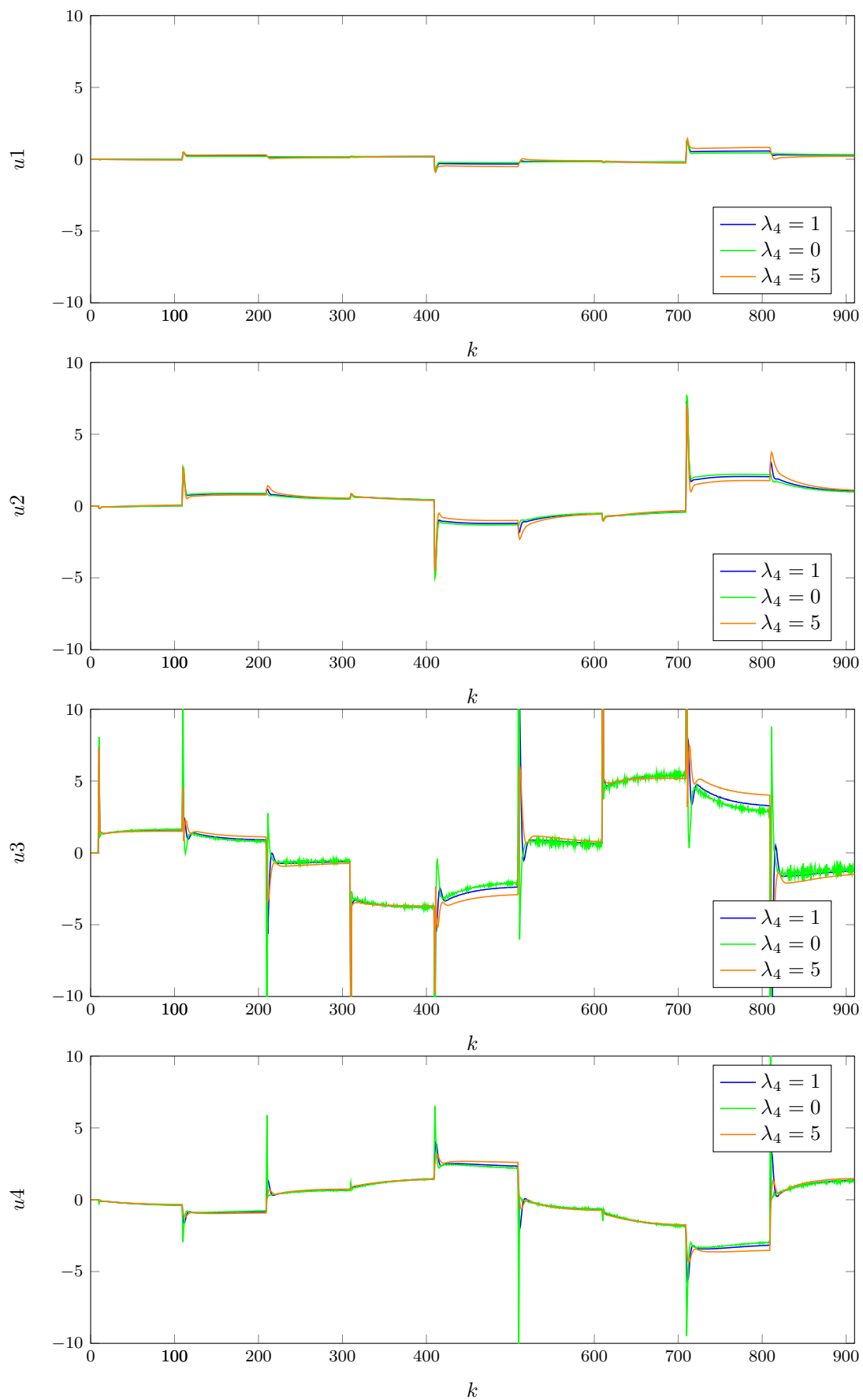
Ostateczne parametry naszego regulatora DMC znajdują się w tabeli 5.39. Dobierając je osiągnęliśmy niższą wartość błędu niż dla którejkolwiek konfiguracji PID, choć przebiegi sterowań nie wyglądają idealnie (zwłaszcza  $u_3$  oraz  $u_4$ , których przebiegi wpadają w widoczne oscylacje i zawierają duże skoki wartości). Choć taki wygląd sterowań mógłby być nieodpowiedni dla niektórych obiektów rzeczywistych, jest całkowicie akceptowalny przy programowej regulacji sygnału.

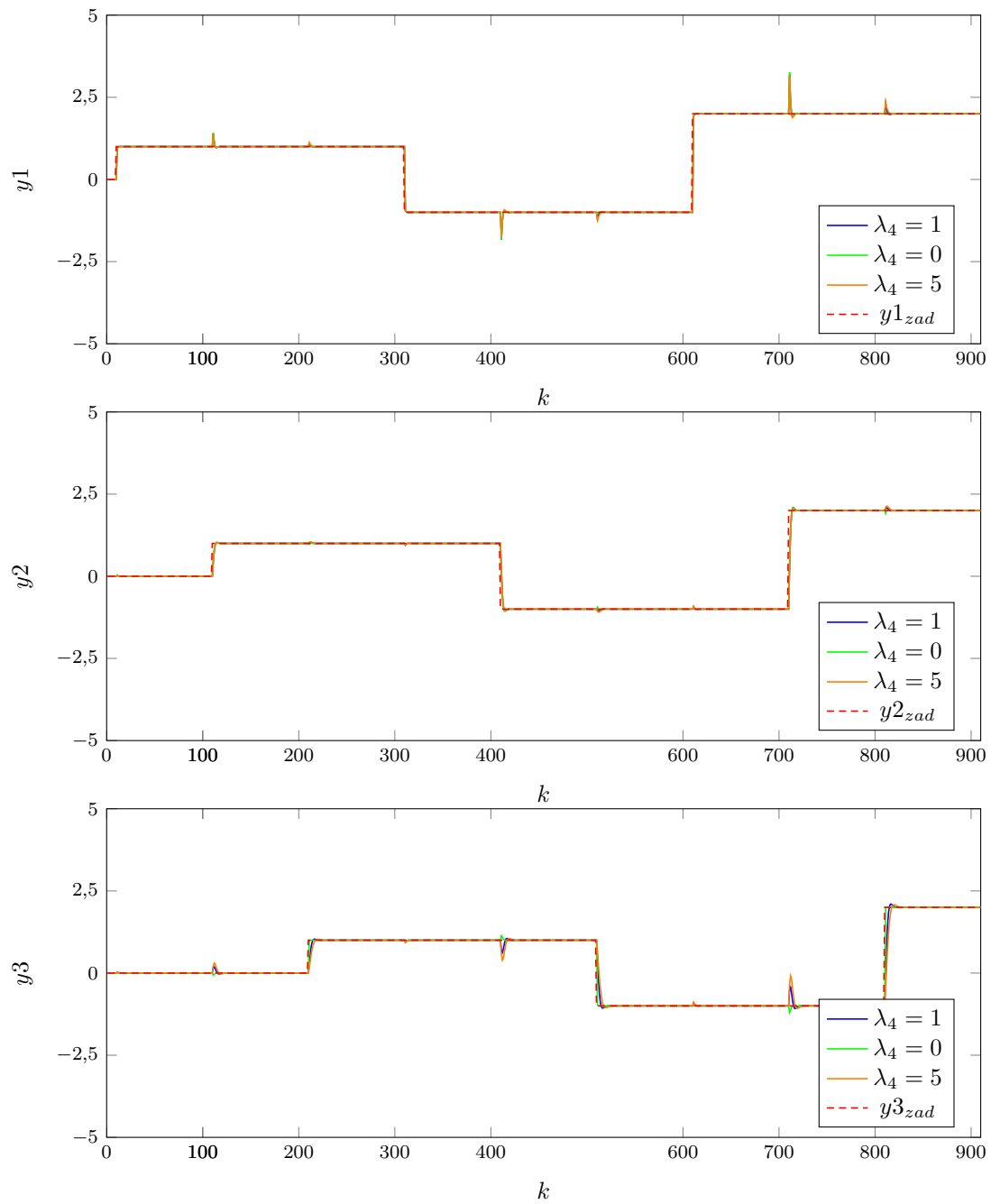
$\lambda_3$	$E$	$E1$	$E2$	$E3$
1	60,9477	16,5775	19,0707	25,2996
0	49,5733	16,8105	18,6579	14,1050
5	72,3782	16,5540	19,2844	36,5397

Tab. 5.38. Wartości błędów dla różnych wartości  $\lambda_3$

$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
2,7	40	7	20	1	0	0

Tab. 5.39. Ostateczne nastawy DMC

Rys. 5.45. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\lambda_4$

Rys. 5.46. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\lambda_4$

## 6. Zadanie 5: Automatyczne dobieranie nastaw

W tym zadaniu naszym zadaniem było automatyczne dobranie nastaw regulatorów w wyniku optymalizacji wskaźnika jakości. Użyliśmy w tym celu wbudowanej w pakiet Matlab funkcji `fmincon`, podając jako początkowe parametry wyliczone przez nas konfiguracje.

### 6.1. PID

#### 6.1.1. Konfiguracja pierwsza

Jak widzimy w tym przypadku wyliczone przez funkcję parametry są podobne do naszych, aczkolwiek dają nieco lepsze rozwiązanie pod kątem wielkości wskaźnika regulacji. Wizualnie przebiegi prawie się nie różnią.

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	6,6821	4,4592	2,6147
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	3	5	3
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	0	0	0

Tab. 6.1. Nasze nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
93,5137	47,3773	19,8595	26,2770

Tab. 6.2. Wartości błędów dla naszych nastaw

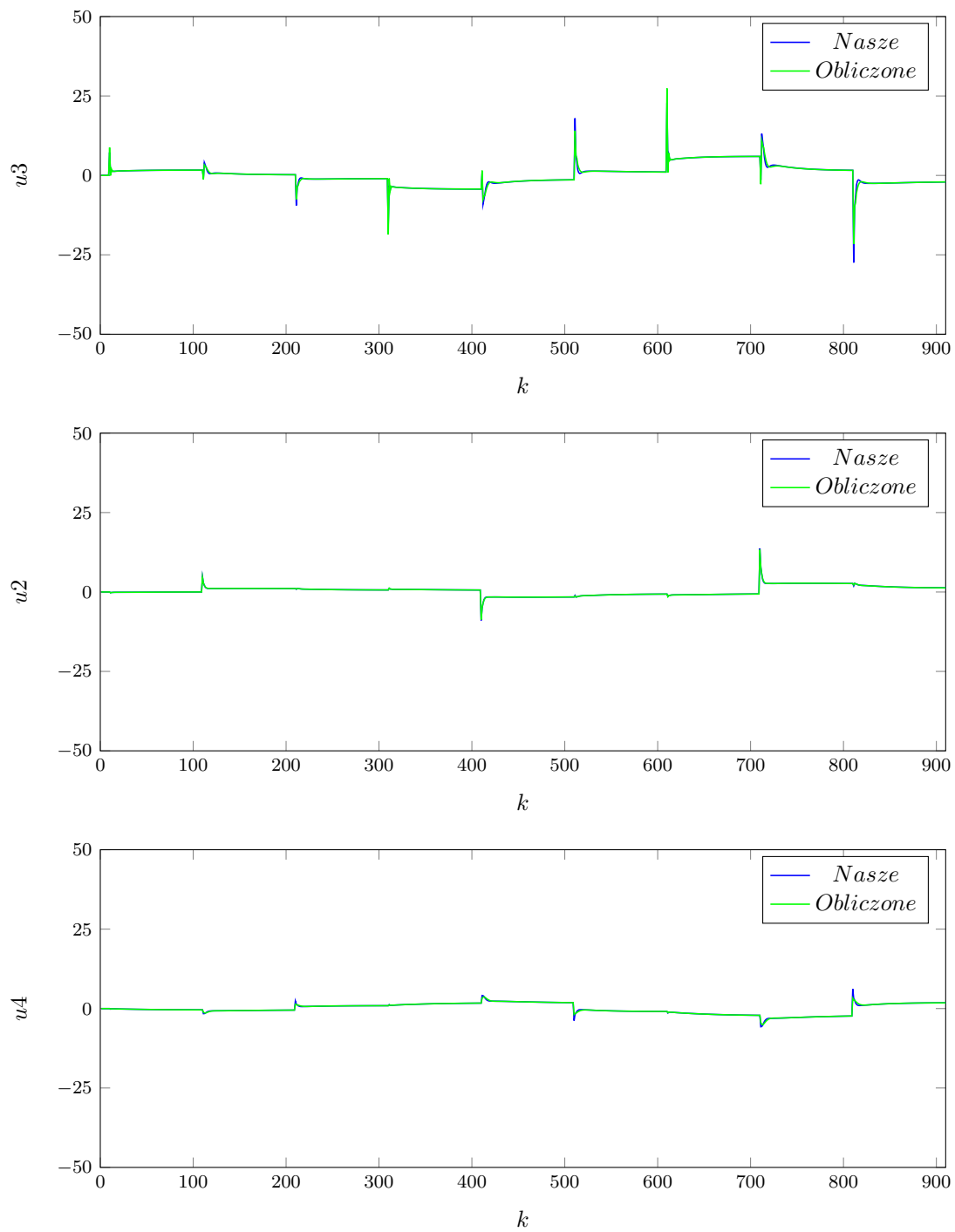
	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	7,8600	4,2845	1,6460
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	2,1371	4,3444	1,8913
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	9,0673e-9	0,0132	1,4253e-7

Tab. 6.3. Wyliczone nastawy

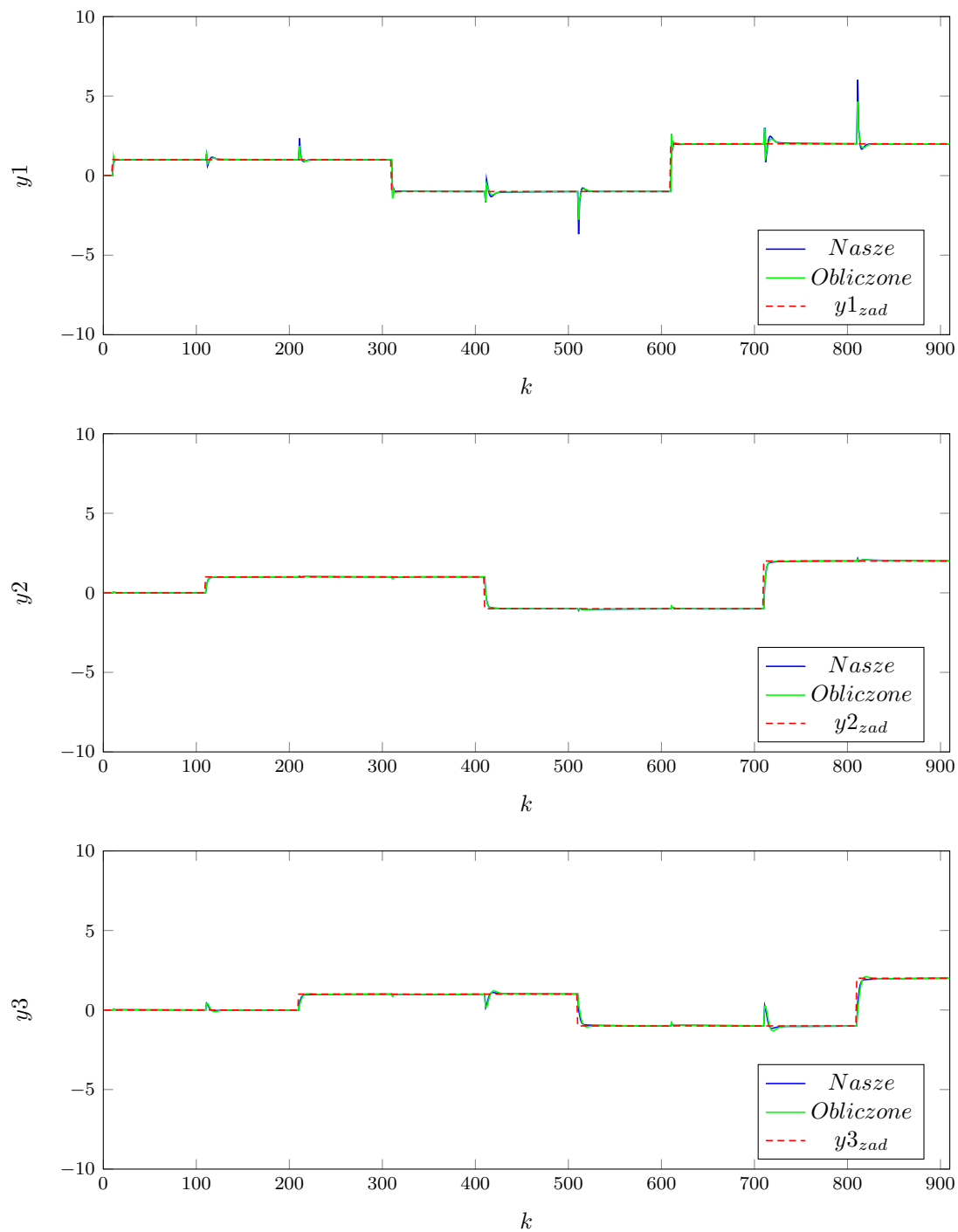
<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
85,3434	30,8617	19,8453	34,6364

Tab. 6.4. Wartości błędów dla wyliczonych nastaw





Rys. 6.1. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji pierwszej - sterowanie



Rys. 6.2. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji pierwszej - wyjścia

### 6.1.2. Konfiguracja druga

Parametry obliczone przez program nie są bardzo oddalone od naszych, ale gwarantują mniejszą wartość błędu. Choć przebiegi sterowań są prawie identyczne, na wykresach wyjść w definitywnie widać poprawę.

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	6,6821	2,6806	1,7432
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	3	2	1
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	0	0	0

Tab. 6.5. Nasze nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
84,5872	43,0392	14,1660	27,3819

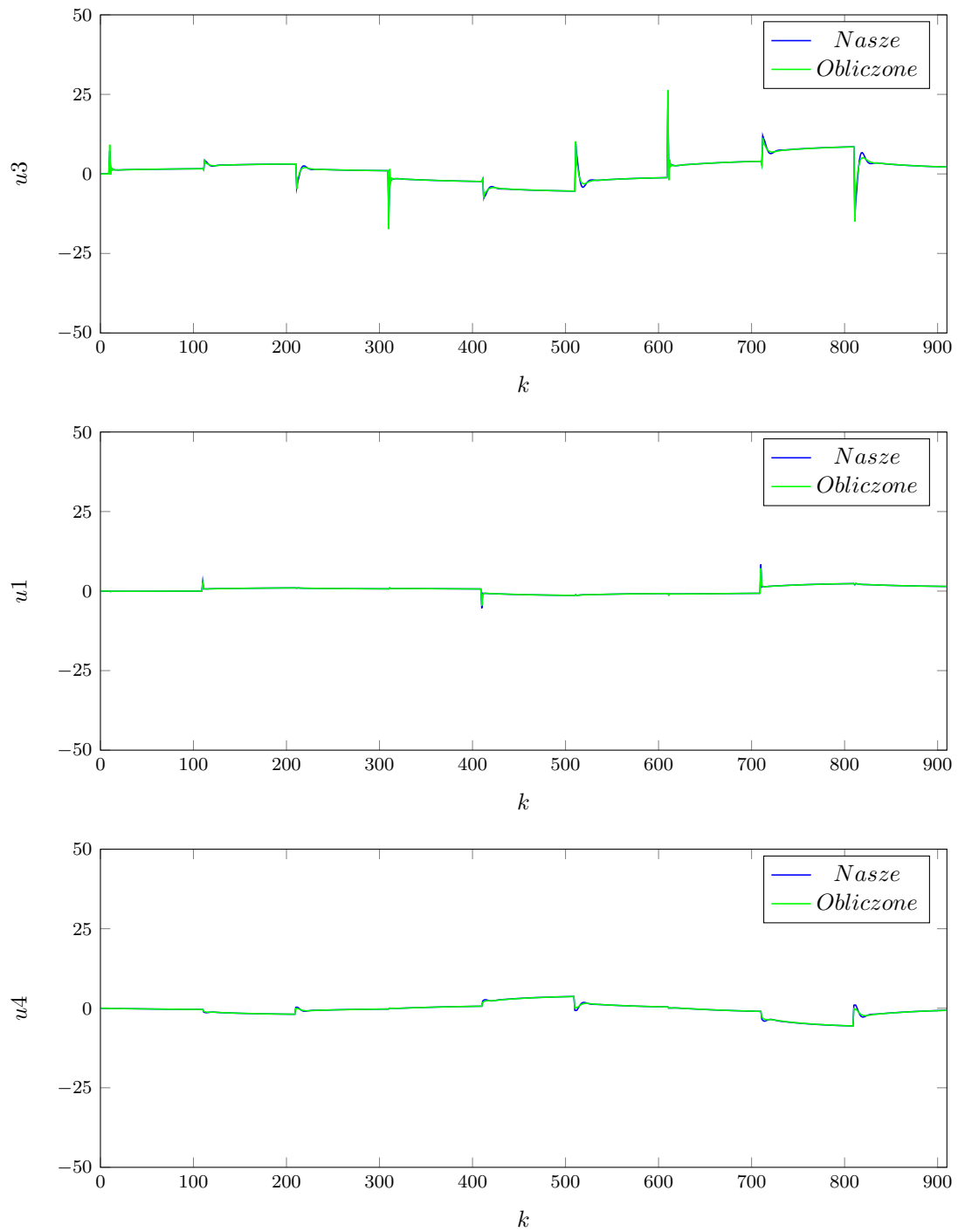
Tab. 6.6. Wartości błędów dla naszych nastaw

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	8,0752	2,3354	1,5439
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	1,8399	2,3517	1,4822
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	4,3152e-9	0,0086	8,0777e-7

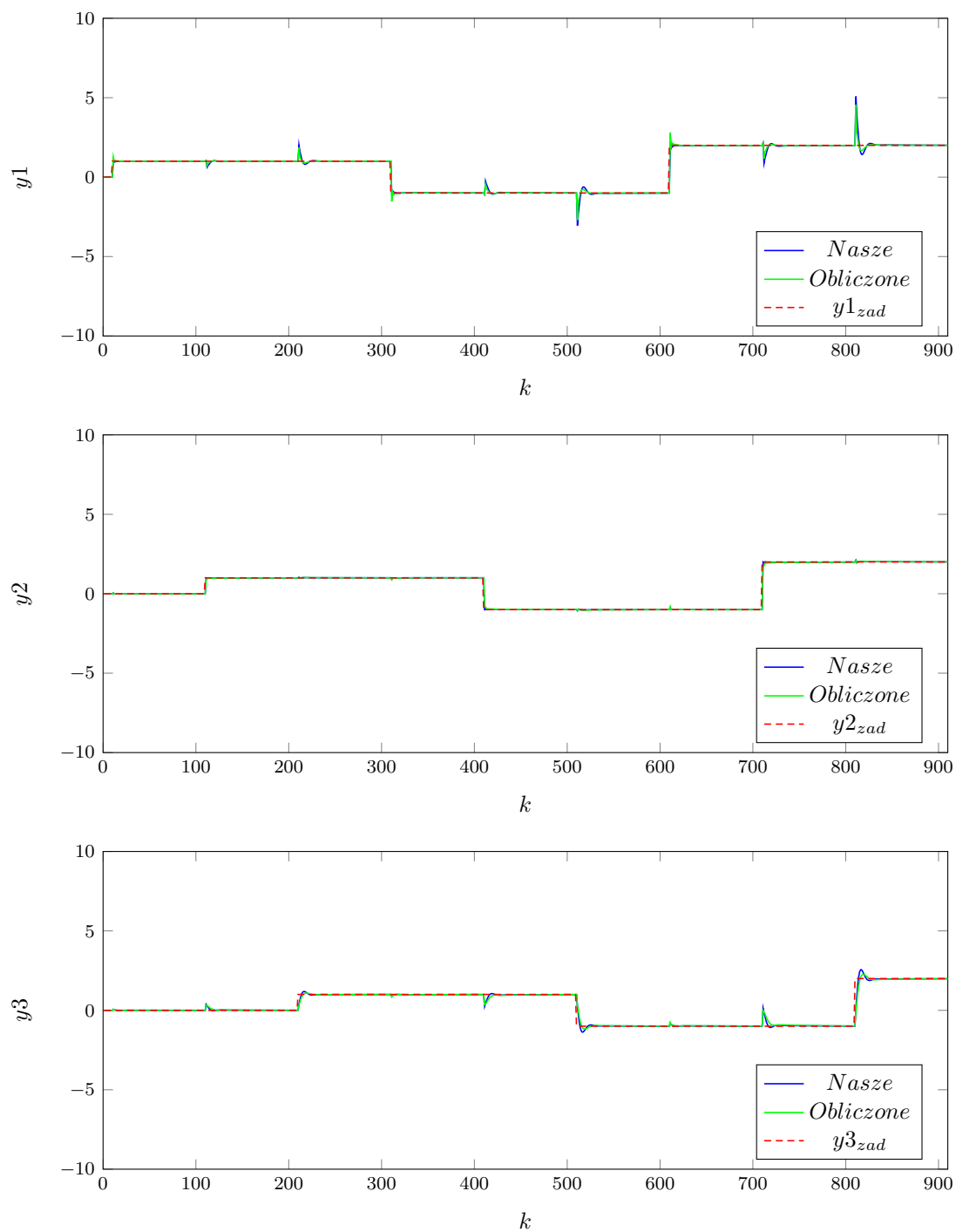
Tab. 6.7. Wyliczone nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
74,8601	28,8221	14,6279	31,4101

Tab. 6.8. Wartości błędów dla wyliczonych nastaw



Rys. 6.3. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji drugiej - sterowanie



Rys. 6.4. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji drugiej - wyjścia

### 6.1.3. Konfiguracja trzecia

Przy nastawach wyliczonych za pomocą optymalizacji poprawiły się zarówno błędy jak i przebiegi wykresów wyjść. Mimo wszystko wartości błędów wciąż są dość duże w porównaniu do dwóch pierwszych konfiguracji. Wzbudziło to w nas pewne zdumienie, bo to właśnie ta konfiguracja była wskazywana przez wskaźnik uwarunkowania jako potentat do bycia najlepszą ze wszystkich.

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	1,1337	2,6806	0,5811
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	6	1	4
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	2	0	0

Tab. 6.9. Nasze nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
295,8916	139,8703	21,7816	134,2398

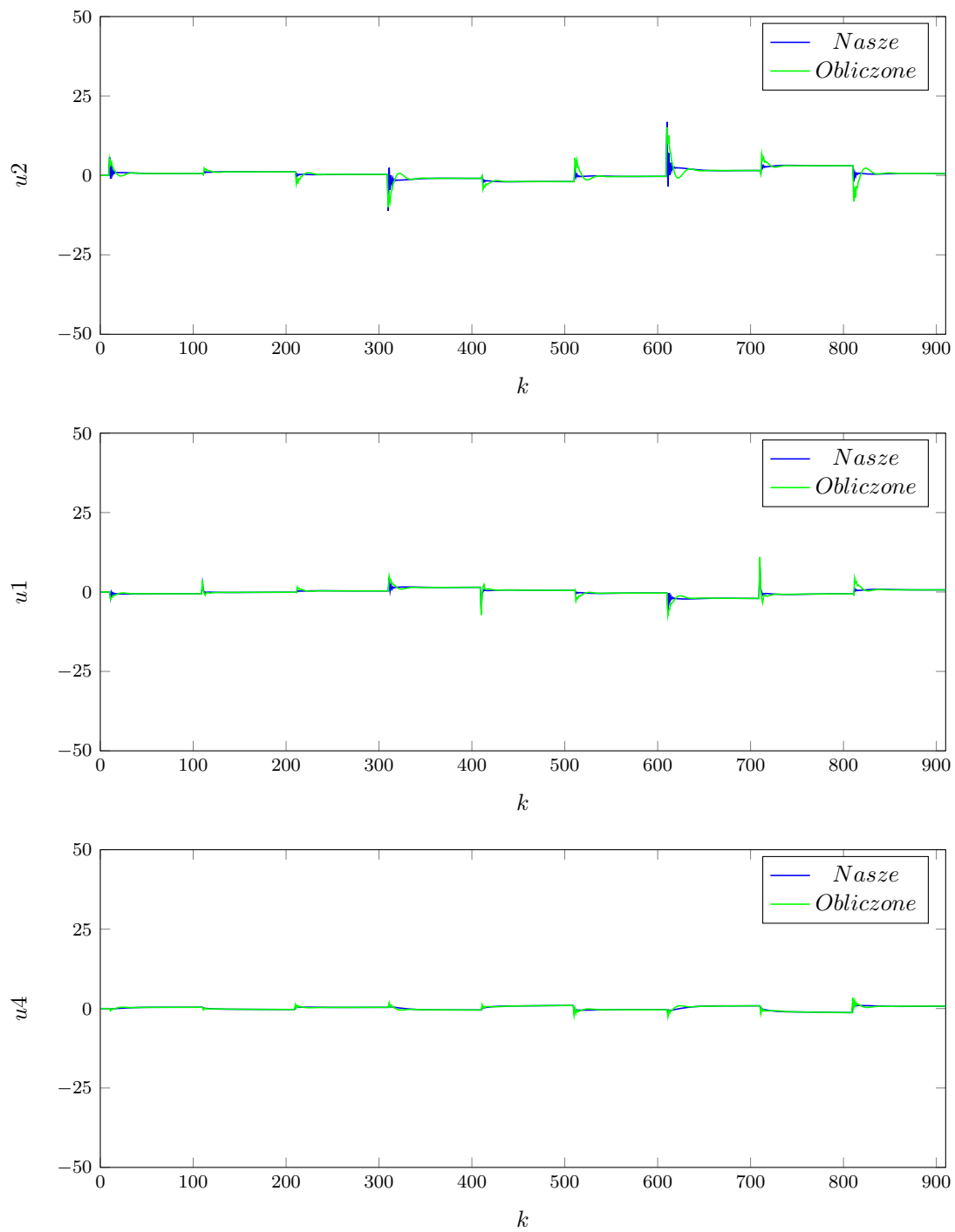
Tab. 6.10. Wartości błędów dla naszych nastaw

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	5,0737	2,9191	0,7908
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	16,1926	0,5115	3,9598
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	3,8791e-6	6,1826e-6	0,4474

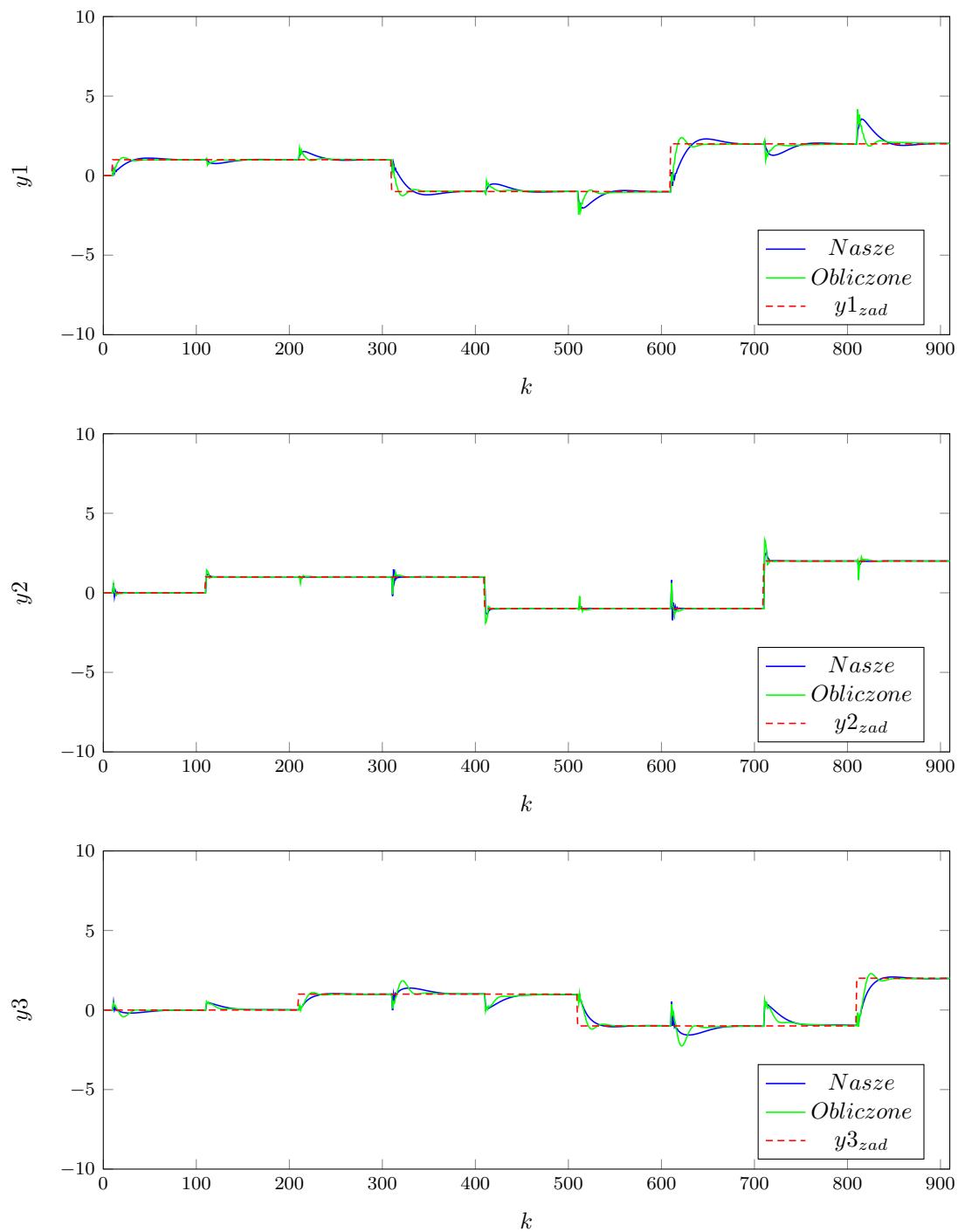
Tab. 6.11. Wyliczone nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
205,9376	63,2208	26,6137	116,1032

Tab. 6.12. Wartości błędów dla wyliczonych nastaw



Rys. 6.5. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji trzeciej - sterowanie



Rys. 6.6. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji trzeciej - wyjścia



#### 6.1.4. Konfiguracja czwarta

Wyliczenie nastaw za pomocą optymalizacji nie dało dużej poprawy zarówno w wartościach błędów jak i w wyglądzie przebiegów. Najwyraźniej akurat ta konfiguracja nie jest najlepszym wyborem jeśli chodzi o sterowanie posiadanym obiektem.

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	6,6821	3,0328	0,7699
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	1	7	5
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	0	0	1

Tab. 6.13. Nasze nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
279,8519	17,2126	84,7003	177,9390

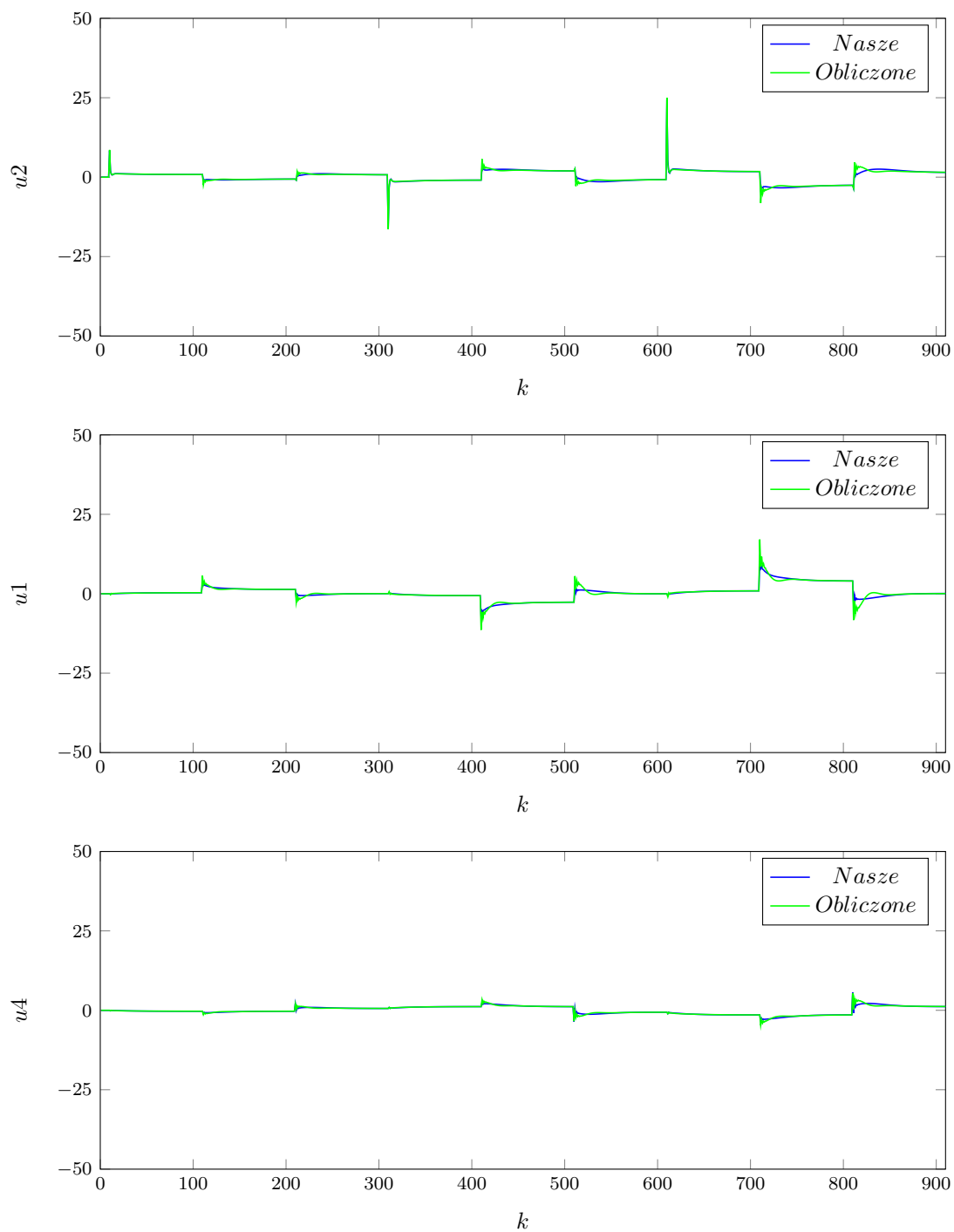
Tab. 6.14. Wartości błędów dla naszych nastaw

	<b><i>y1</i></b>	<b><i>y2</i></b>	<b><i>y3</i></b>
<b><i>K</i></b>	6,9911	5,2839	1,1192
<b><i>T<sub>i</sub></i></b>	1,0949	12,0669	0,5076
<b><i>T<sub>d</sub></i></b>	8,8144e-5	3,1067e-6	0,5076

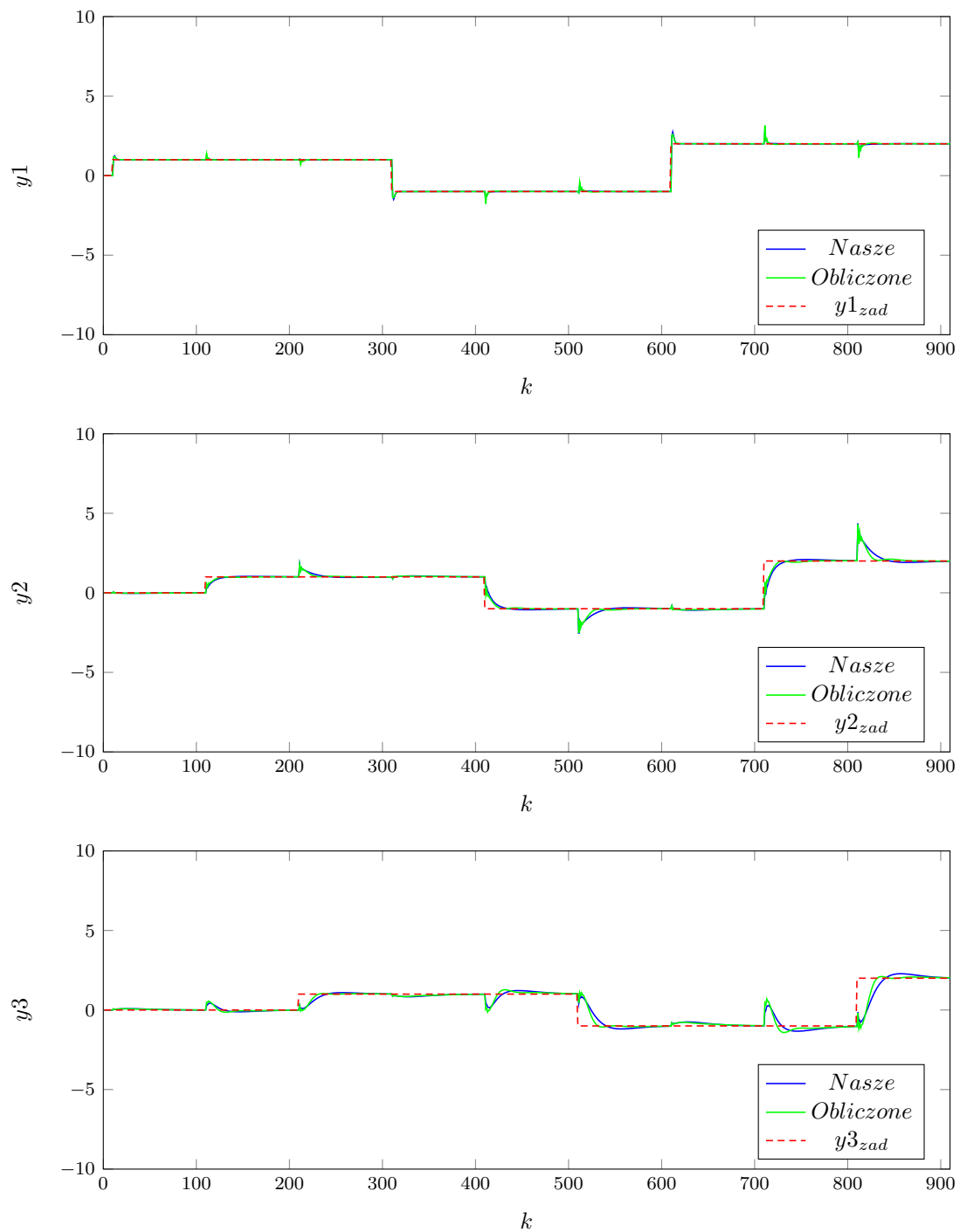
Tab. 6.15. Wyliczone nastawy

<b><i>E</i></b>	<b><i>E1</i></b>	<b><i>E2</i></b>	<b><i>E3</i></b>
259,3231	19,3182	65,3477	174,6572

Tab. 6.16. Wartości błędów dla wyliczonych nastaw



Rys. 6.7. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji czwartej - sterowanie



Rys. 6.8. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla konfiguracji czwartej - wyjścia

## 6.2. DMC

Ostatnią optymalizacją jaką należy przeprowadzić jest optymalizacja DMC. Większość nastaw obliczonych w wyniku optymalizacji jest podobna do wyliczonych przez nas. Mimo wszystko optymalizacja zmniejszyła już małe błędy przebiegów i definitywnie poprawiła wykresy wyjść.

$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
2,7	40	7	20	1	0	0

Tab. 6.17. Nasze nastawy

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
49,5733	16,8105	18,6579	14,1050

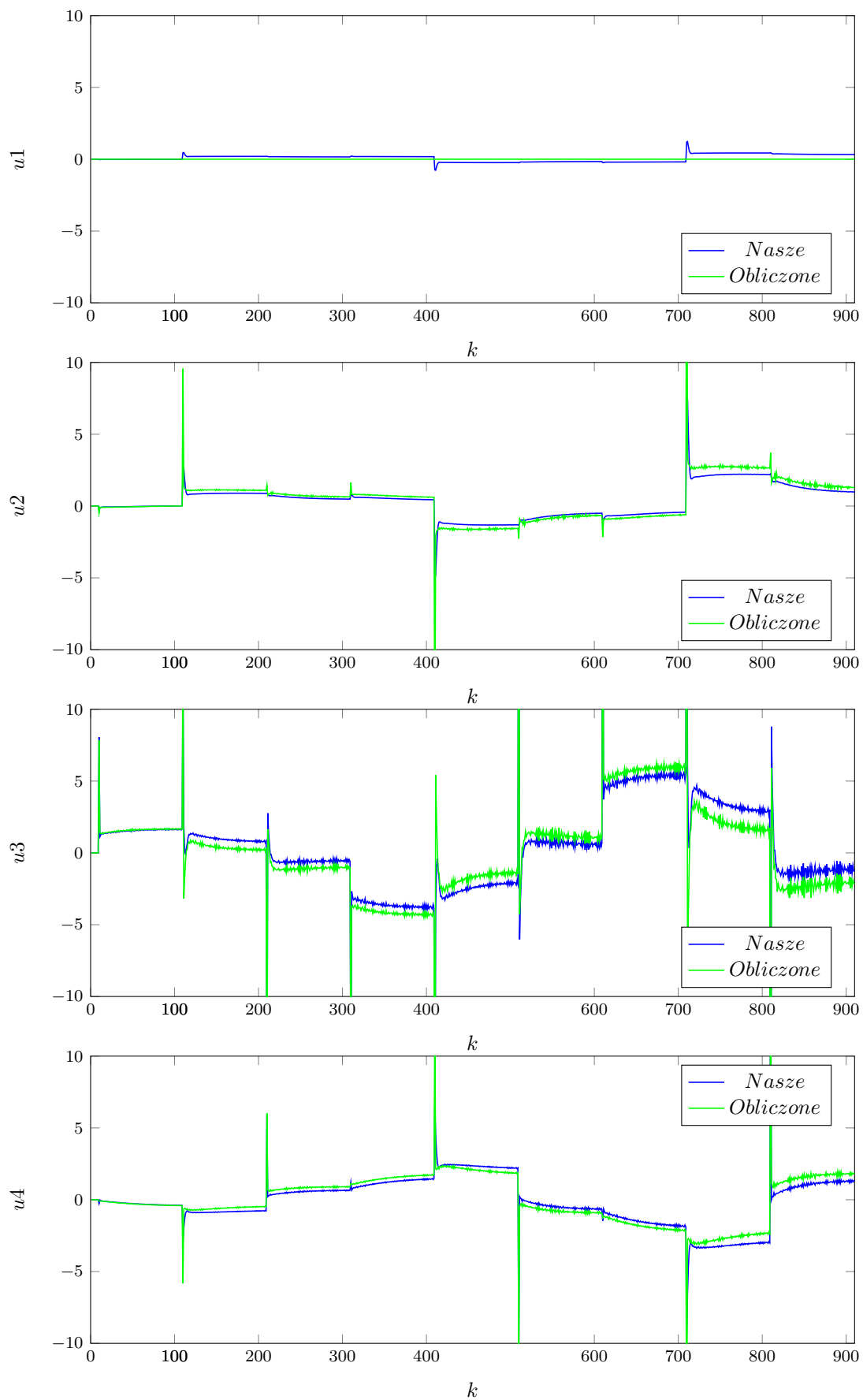
Tab. 6.18. Wartości błędów dla naszych nastaw

$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
6,7137	40,1488	7,3852	20,0812	0,0007	2,1222e-5	6,7126e-5

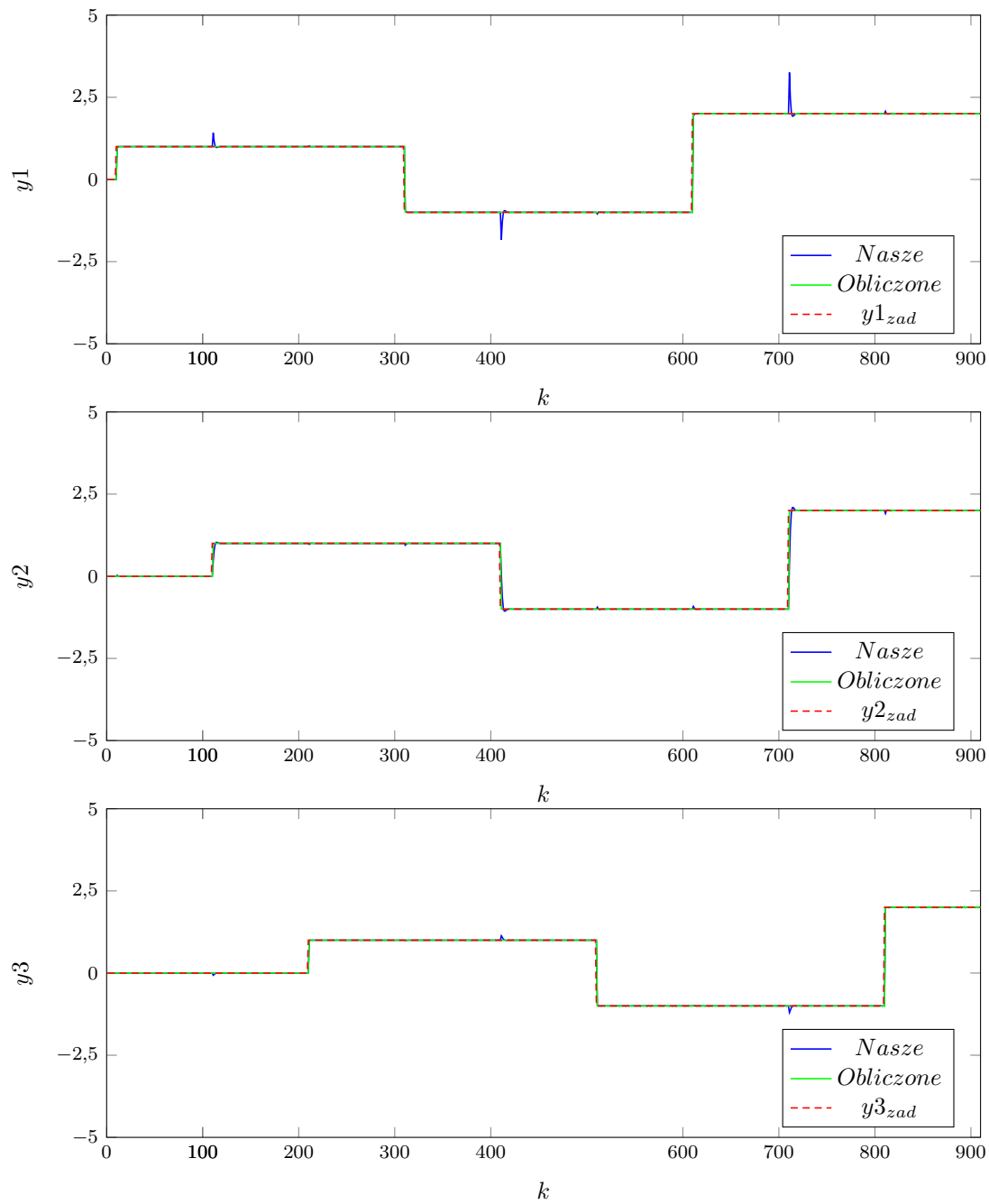
Tab. 6.19. Wyliczone nastawy

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
42,0328	14,0032	14,0061	14,0235

Tab. 6.20. Wartości błędów dla wyliczonych nastaw



Rys. 6.9. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla DMC - sterowanie



Rys. 6.10. Porównanie wyliczonych i optymalnych nastaw dla DMC - wyjścia

### 6.3. Wnioski

Optymalizacja wskaźnika jakości poprawiła przebiegi wszystkich regulatorów. Regulacja uzyskana z użyciem regulatora DMC uzyskała definitywnie lepsze wyniki niż którykolwiek PID, jeśli chodzi o błąd regulacji i wygląd przebiegów wyjść. Mimo to tak gwałtowny regulator mógłby być niemożliwy do wykorzystania w realnym życiu ze względu na duże wachania sterowań.

## 7. Zadanie 6: Uproszczony obliczeniowo DMC

Ostatnim zadaniem było zaimplementowanie DMC w postaci wymagającej jak najmniejszego nakładu obliczeń. Sposób implementacji został opisany w zadaniu trzecim. Następnie należało sprawdzić, czy wersja ta zwraca takie same wyniki co wersja z zadania czwartego. W tym celu wywołaliśmy ją z obliczonymi przez nas końcowymi nastawami DMC. Parametry błędów uzyskanych za pomocą obydwu tych implementacji zamieściliśmy poniżej w tabelach 7.2 i 7.3. Jak widać są one identyczne. Zamieściliśmy również wykresy porównujące przebiegi sterowań i wyjść obiektu dla obydwu implementacji. Widać na nich wyraźnie, że wykresy nakładają się.

$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
2,7	40	7	20	1	0	0

Tab. 7.1. Nasze

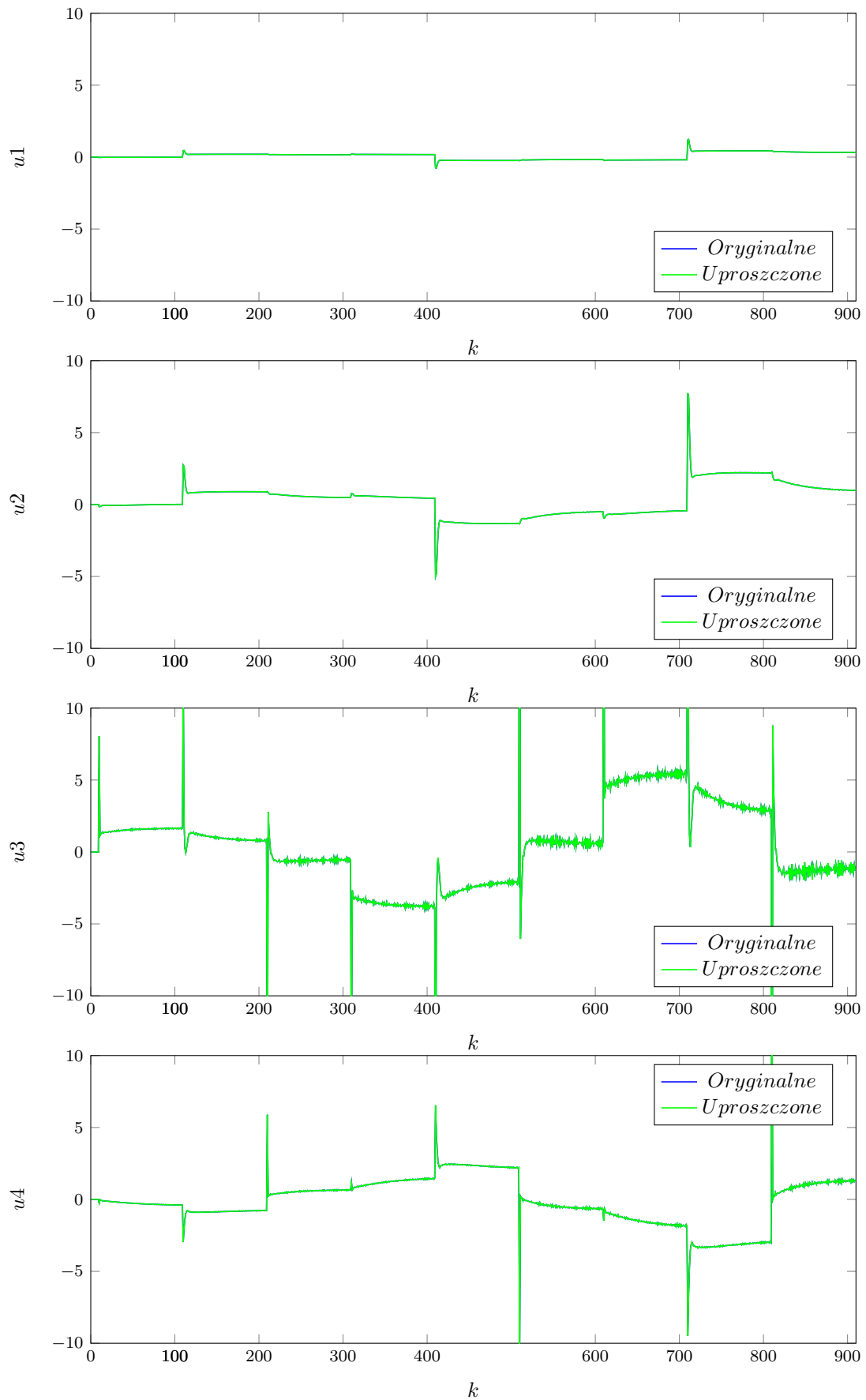
$E$	$E1$	$E2$	$E3$
49,5733	16,8105	18,6579	14,1050

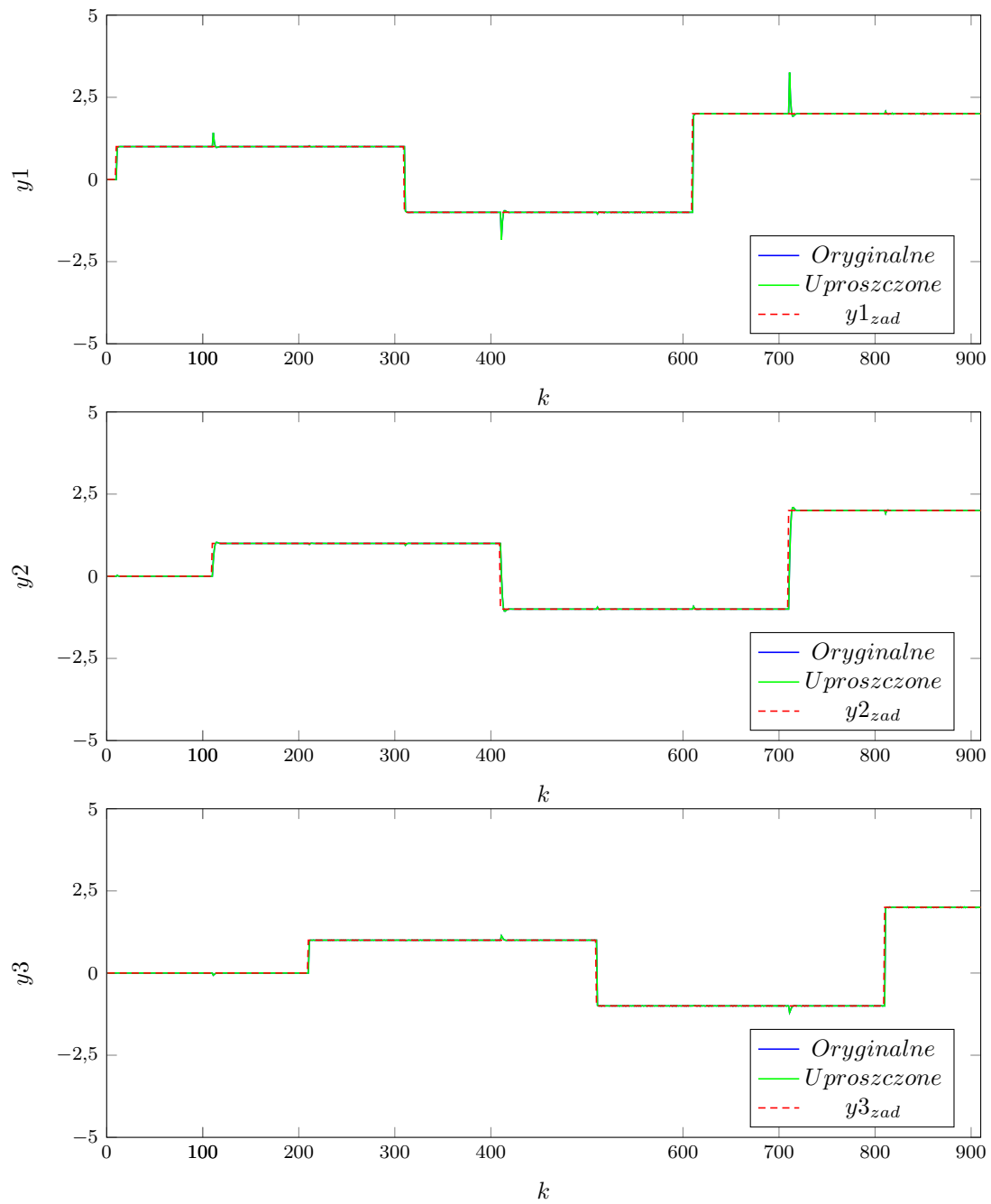
Tab. 7.2. Wartości błędów dla oryginalnej wersji

$E$	$E1$	$E2$	$E3$
49,5733	16,8105	18,6579	14,1050

Tab. 7.3. Wartości błędów dla uproszczonej obliczeniowo wersji



Rys. 7.1. Wartości wejść przy różnych wartościach  $\lambda_4$

Rys. 7.2. Wartości wyjść przy różnych wartościach  $\lambda_4$