

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)**

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

**Kamil Gabryjelski, Paweł Rybak, Paweł Walczak**

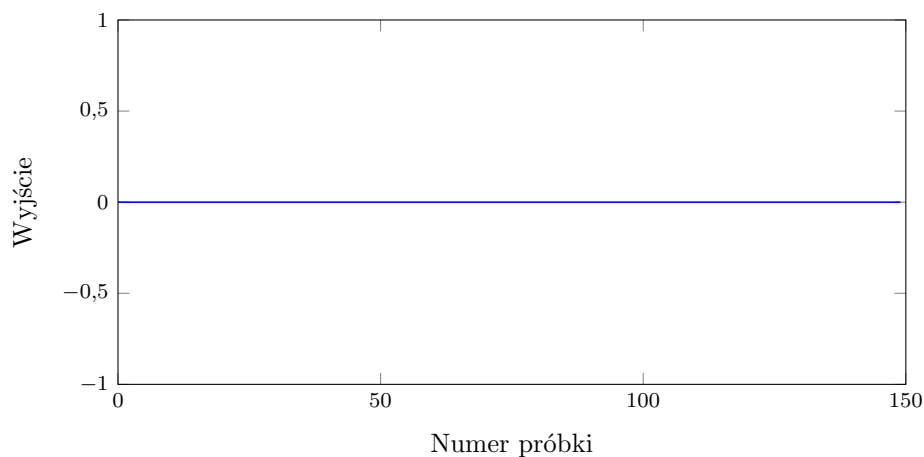
**Warszawa, 2017**

# Spis treści

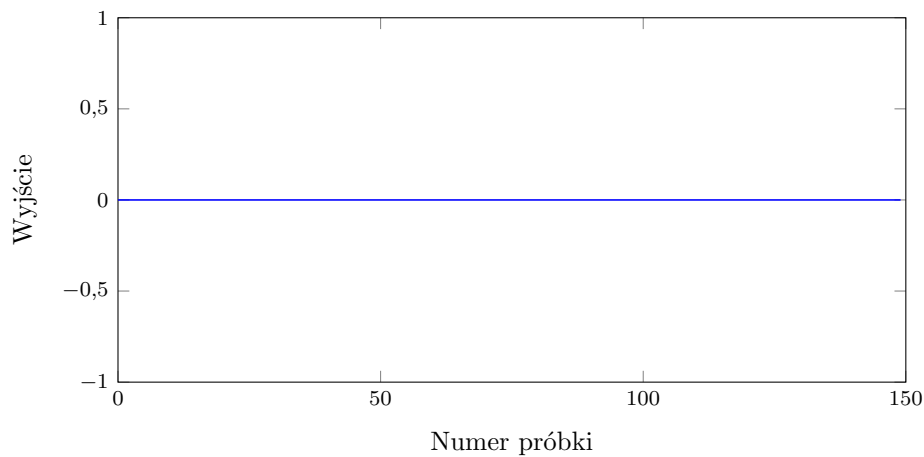
1. Punkt pracy . . . . .	2
2. Odpowiedzi skokowe . . . . .	4
3. PID . . . . .	6
4. DMC . . . . .	12
4.1. Dobór horyzontów predykcji i sterowania . . . . .	12
5. Parametry $\lambda$ i $\psi$ . . . . .	23
5.1. Parametr $\lambda$ . . . . .	23
5.2. Parametr $\psi$ . . . . .	30

# 1. Punkt pracy

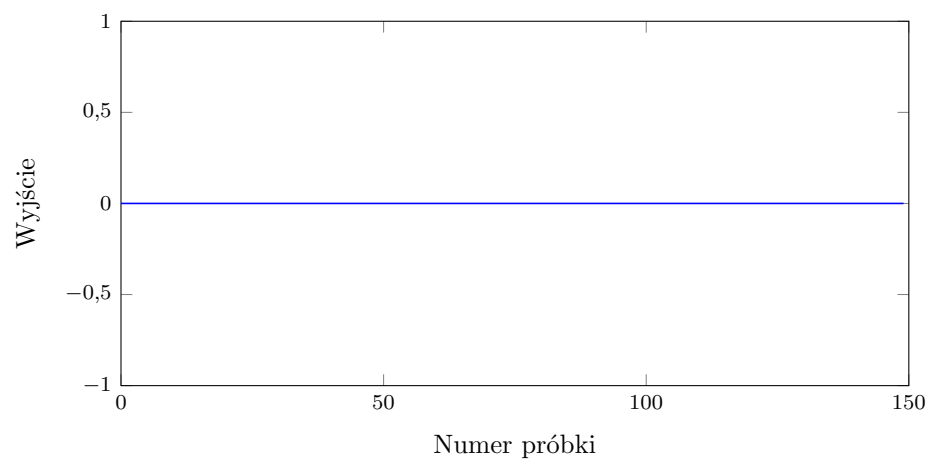
Celem zadania pierwszego było zweryfikowanie poprawności punktu pracy procesu. Podany punkt pracy to  $u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = y_1 = y_2 = y_3 = 0$ . Poprawność sprawdzimy, poprzez podanie na wejście obiektu  $u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = 0$  i sprawdzenie czy wyjścia obiektu stabilizują się na wartości 0. Eksperyment wykazał, że rzeczywiście obiekt stabilizuje się na wartościach wyjść  $y_1 = y_2 = y_3 = 0$ , a pokazują to wykresy 1.1, 1.2 oraz 1.3.



Rys. 1.1. Wyjście  $y_1$

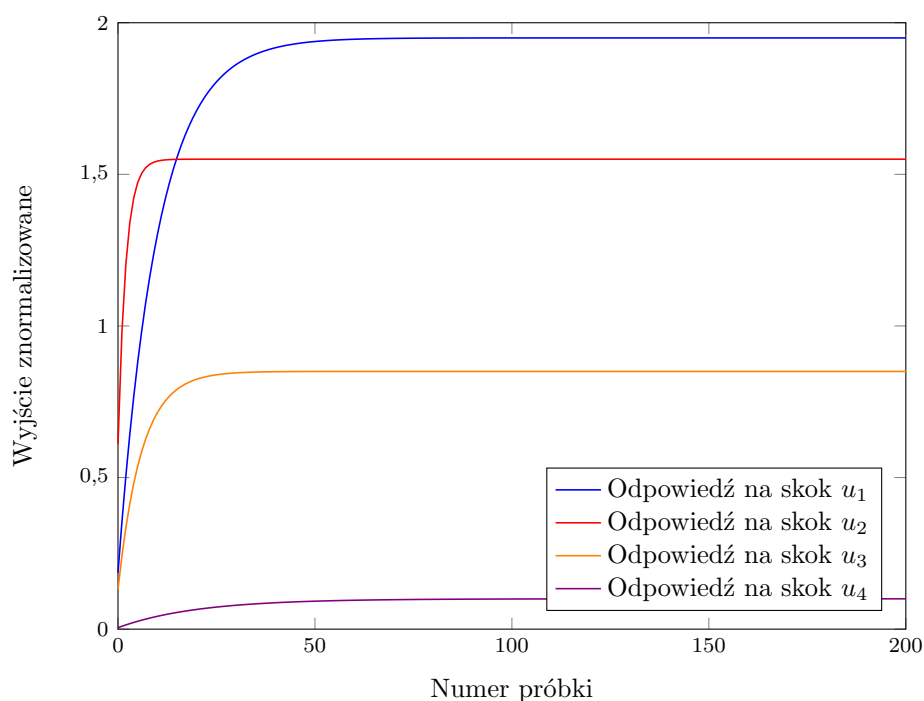


Rys. 1.2. Wyjście  $y_2$

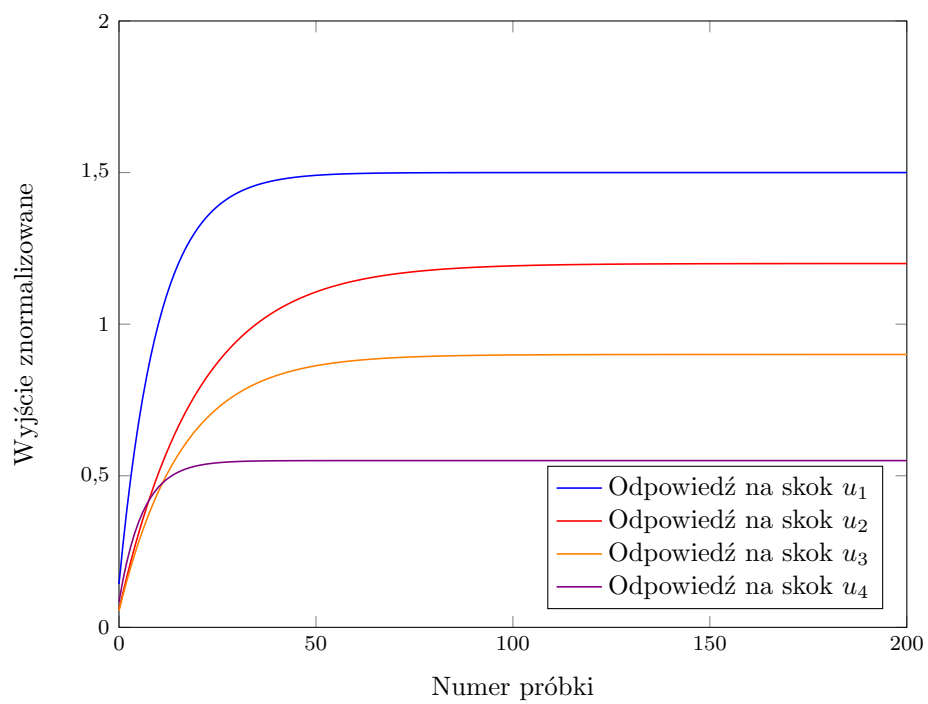
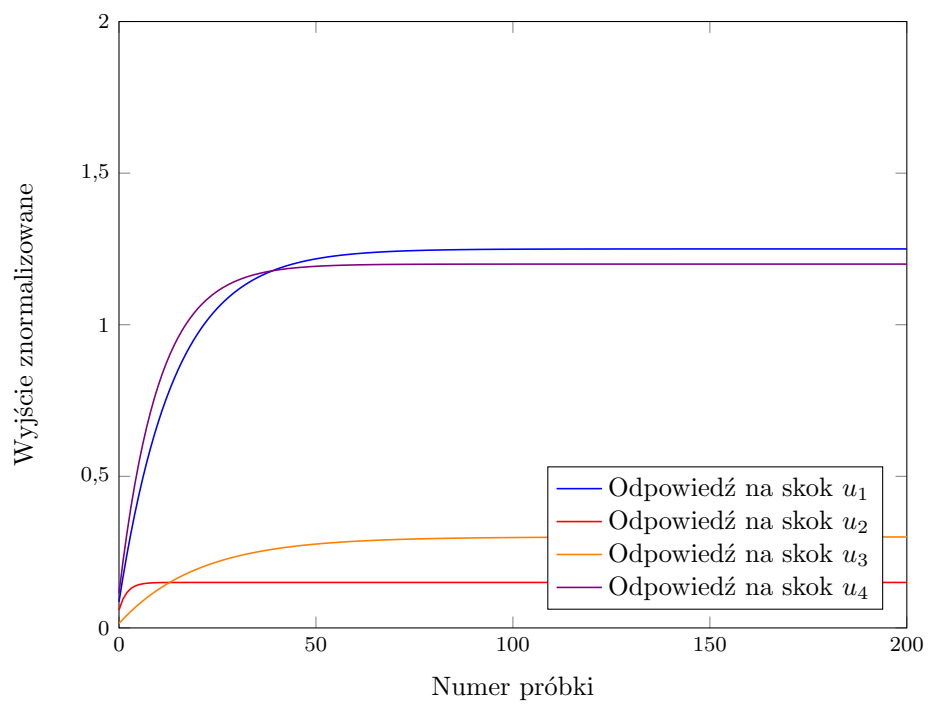
Rys. 1.3. Wyjście  $y_3$

## 2. Odpowiedzi skokowe

Celem zadania drugiego było symulacyjne wyznaczenie wszystkich odpowiedzi skokowych (każdego toru). Założyliśmy, że obiekt będzie znajdował się przed wykonaniem skoku w wyznaczonym w zadaniu 1. punkcie pracy, a skok będzie jednostkowy. Na podanych niżej wykresach znajdują się wykresy odpowiedzi skokowych dla każdego toru.



Rys. 2.1. Odpowiedzi skokowe wyjścia  $y_1$

Rys. 2.2. Odpowiedzi skokowe wyjścia  $y_2$ Rys. 2.3. Odpowiedzi skokowe wyjścia  $y_3$

### 3. PID

Na początku strojenia wyznaczona została macierz wzmocnień, zawierająca wzmocnienie każdego z wyjść w zależności od wejścia. Macierz ta jest następująca:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1.9500 & 1.5000 & 1.2500 \\ 1.5500 & 1.2000 & 0.1500 \\ 0.8500 & 0.9000 & 0.3000 \\ 1.0000 & 0.5500 & 1.2000 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Następnie otrzymujemy z tego cztery macierze  $\mathbf{K}_i$ . Każda z nich powstaje poprzez usunięcie  $i$ -tego wiersza z macierzy  $\mathbf{K}$ . Macierze te są następujące:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 1.5500 & 1.2000 & 0.1500 \\ 0.8500 & 0.9000 & 0.3000 \\ 1.0000 & 0.5500 & 1.2000 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 1.9500 & 1.5000 & 1.2500 \\ 0.8500 & 0.9000 & 0.3000 \\ 1.0000 & 0.5500 & 1.2000 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 1.9500 & 1.5000 & 1.2500 \\ 1.5500 & 1.2000 & 0.1500 \\ 1.0000 & 0.5500 & 1.2000 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} 1.5500 & 1.2000 & 0.1500 \\ 0.8500 & 0.9000 & 0.3000 \\ 1.0000 & 0.5500 & 1.2000 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Następnie obliczane są wskaźniki uwarunkowania każdej z czterech macierzy:

$$\text{cond}(\mathbf{K}_1) = 14.0133 \quad (3.6)$$

$$\text{cond}(\mathbf{K}_2) = 46.4314 \quad (3.7)$$

$$\text{cond}(\mathbf{K}_3) = 35.4269 \quad (3.8)$$

$$\text{cond}(\mathbf{K}_4) = 20.1116 \quad (3.9)$$

Następnie wylicza się macierz  $\mathbf{K}\mathbf{K}_i = \mathbf{K}_i * \mathbf{K}_i^{-1}$ . Z tej macierzy wybiera się tory sterowania, poprzez wybranie najmniejszych wartości dodatnich z macierzy  $\mathbf{K}\mathbf{K}_i$ , tak aby wybrana była tylko jedna wartość w danym wierszu i kolumnie. Wartości ujemne są wykluczone. Tory sterowania są wyznaczane poprzez numer kolumny i wiersza wybranych wartości. Numer kolumny odpowiada wyjściu, a numer wiersza sterowaniu. Teoretycznie najlepszy wynik będzie osiągnięty dla macierzy  $\mathbf{K}\mathbf{K}_i$ , dla której wskaźnik uwarunkowania  $\mathbf{K}_i$  był najmniejszy, czyli w naszym wypadku  $\mathbf{K}_1$ , ale mimo to sprawdzimy wszystkie cztery opcje. Macierze wychodzą następujące:

$$\mathbf{K}\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 2.8981 & -1.7655 & -0.1326 \\ -2.3579 & 3.1448 & 0.2130 \\ 0.4598 & -0.3793 & 0.9195 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 10.9045 & -6.6005 & -3.3040 \\ -5.7792 & 5.9954 & 0.7838 \\ -4.1253 & 1.6050 & 3.5202 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} -7.5149 & 7.2818 & 1.2331 \\ 4.8953 & -3.7133 & -0.1820 \\ 3.6196 & -2.5685 & -0.0511 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 1.0935 & -1.2617 & 1.1682 \\ 2.6075 & -1.4280 & -0.1794 \\ -2.7009 & 3.6897 & 0.0112 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Stąd wybieramy cztery opcje torów sterowania. Dla  $\mathbf{K}\mathbf{K}_1$ :

- $y_1 - u_2$
- $y_2 - u_3$
- $y_3 - u_4$

Zgodnie z wyznaczonymi wskaźnikami uwarunkowania te tory powinny być najlepsze. Dla  $\mathbf{K}\mathbf{K}_2$ :

- $y_1 - u_1$
- $y_2 - u_3$
- $y_3 - u_4$

Dla  $\mathbf{K}\mathbf{K}_3$  nie udało się wyznaczyć torów. Dla  $\mathbf{K}\mathbf{K}_4$ :

- $y_1 - u_2$
- $y_2 - u_3$
- $y_3 - u_1$

Mając teoretycznie najlepsze tory sterowania przystąpiliśmy do dobierania nastaw dla regulatorów. Nasza taktyka polegała na wyłączeniu wszelkich regulatorów, a następnie znalezieniu wartości wzmocnienia pierwszego regulatora, dla którego oscylacje są niegasnące. Mając tę wartość wzmocnienia dzielona była ona przez dwa i dołączany był regulator drugi. Znowś szukaliśmy wartości oscylacji niegasnących i po znalezieniu dzieliliśmy wzmocnienie drugiego regulatora na dwa. Następnie dołączaliśmy trzeci regulator i postępowaliśmy tak samo. Następnie dobieraliśmy wartości całkowania, metodą prób i błędów, a na końcu tak samo dobieraliśmy wartości członów różniczkujących dla regulatorów. Zaskakująco metoda ta okazała się przynosić zadowalające rezultaty. Dla toru otrzymanego na podstawie macierzy  $\mathbf{K}\mathbf{K}_1$  ta metoda dała nastawy:

$$\begin{aligned} K_1 &= 1,3170 & T_{i1} &= 5, & T_{d1} &= 0 \\ K_2 &= 14,8350 & T_{i2} &= 10, & T_{d2} &= 0 \\ K_3 &= 6,2700 & T_{i3} &= 8, & T_{d3} &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Wskaźnik jakości regulacji dla takich nastaw wynosił  $E_1 = 301,8303$ . Co ciekawe włączenie różniczki nie dawało poprawy wskaźnika jakości, więc z niej zrezygnowaliśmy. Wyniki działania takiego regulatora dla tych nastaw przedstawiają wykresy 3.1, 3.2 oraz 3.3.

Następnie sprawdzony został tor otrzymany na podstawie macierzy  $\mathbf{K}\mathbf{K}_2$ . Po kilku eksperymentach otrzymaliśmy następujące nastawy:

$$\begin{aligned} K_1 &= 5,1325 & T_{i1} &= 9, & T_{d1} &= 0 \\ K_2 &= 3,1150 & T_{i2} &= 10, & T_{d2} &= 0 \\ K_3 &= 7,2400 & T_{i3} &= 10, & T_{d3} &= 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Wskaźnik jakości regulacji dla takich nastaw wynosił  $E_2 = 134,8370$ , czyli wbrew temu co wyszło z wyliczeń wskaźników jakości — lepszy niż ten dla pierwszego toru sterowania. Podobnie jak wcześniej, dodanie różniczkowania nie poprawiało wyników w sensie wskaźnika jakości, więc z niego zrezygnowaliśmy. Działanie tych regulatorów przedstawiają wykresy 3.4, 3.5 oraz 3.6.

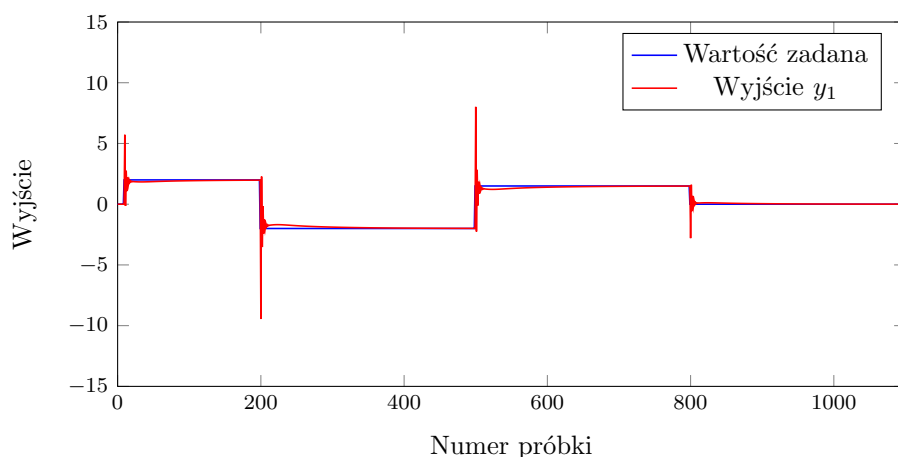


Dla ułatwienia porównania zastosowano tą samą skalę co w przypadku poprzedniego zestawu regulatorów.

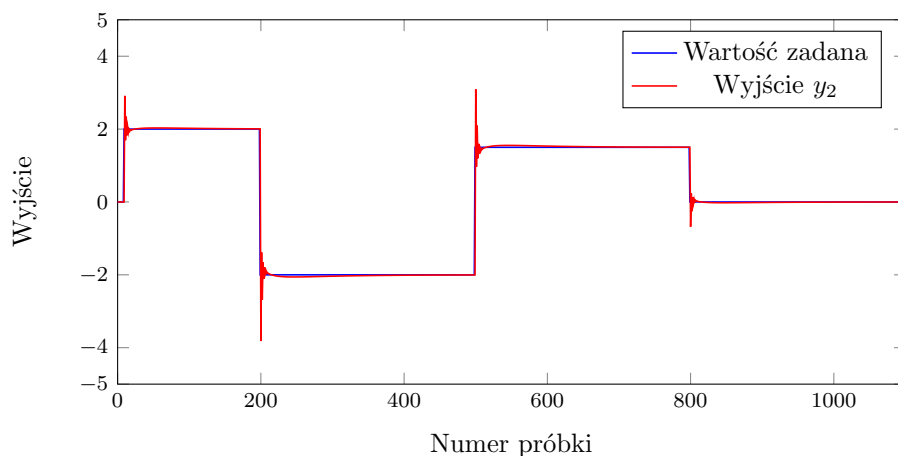
Macierz  $\mathbf{K}\mathbf{K}_3$  nie dała nam żadnego toru sterowania wyjściami, więc przeszliśmy od razu do zestawu który wynił z macierzy  $\mathbf{K}\mathbf{K}_4$ . Otrzymane nastawy były następujące:

$$\begin{aligned} K_1 &= 1,3170 & T_{i1} &= 4, & T_{d1} &= 0 \\ K_2 &= 14,8350 & T_{i2} &= 9, & T_{d2} &= 0 \\ K_3 &= 5,6000 & T_{i3} &= 6, & T_{d3} &= 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

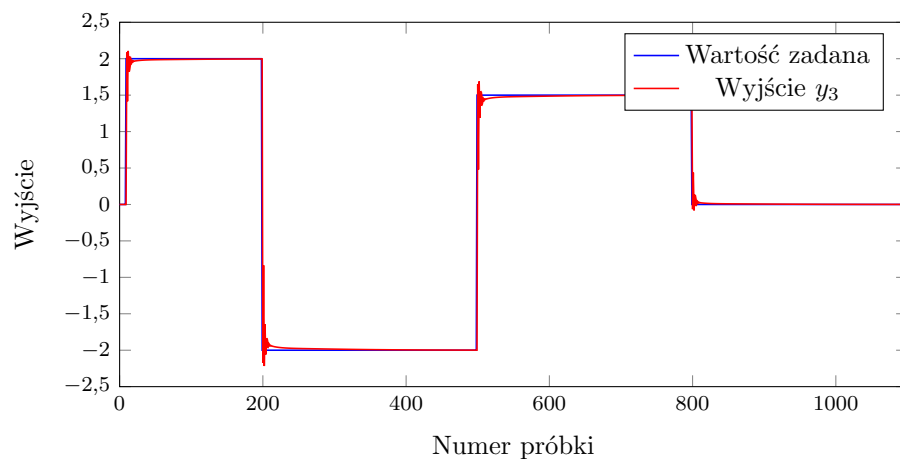
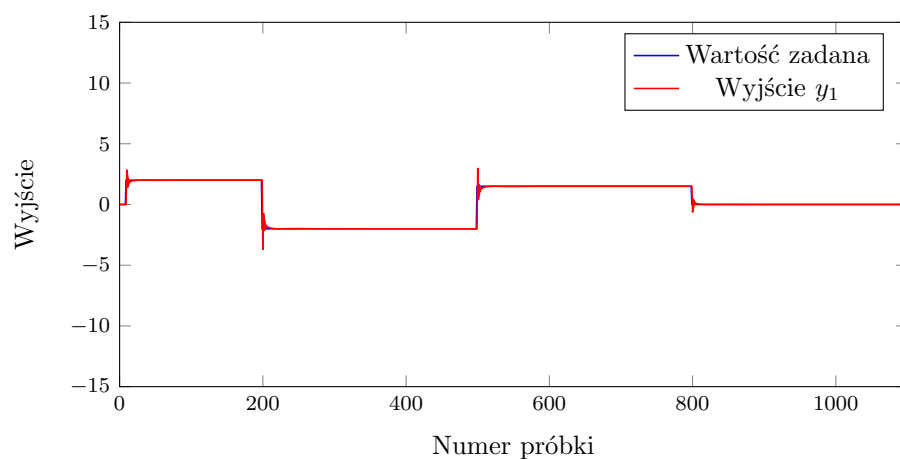
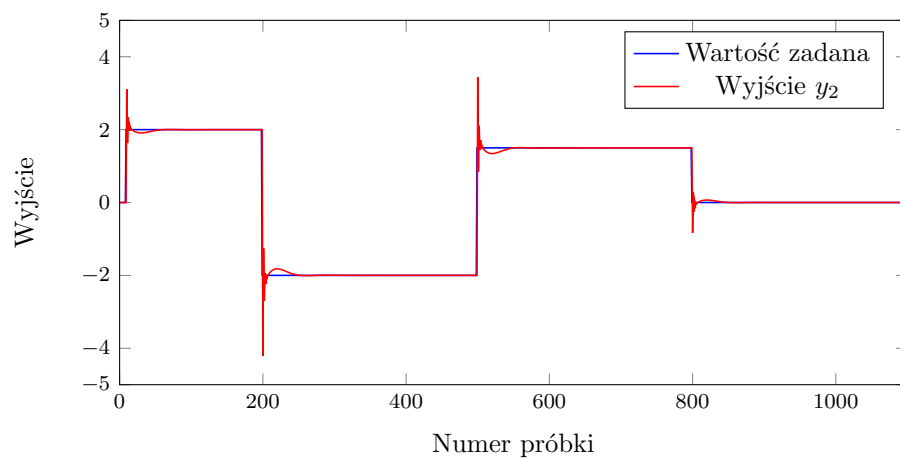
Wskaźnik jakości wynosił 565,3247, czyli był najgorszy ze wszystkich. Znow, dodanie różniczkowania jedynie pogarszało wyniki. Działanie tych regulatorów ukazują wykresy 3.7, 3.8 oraz 3.9.

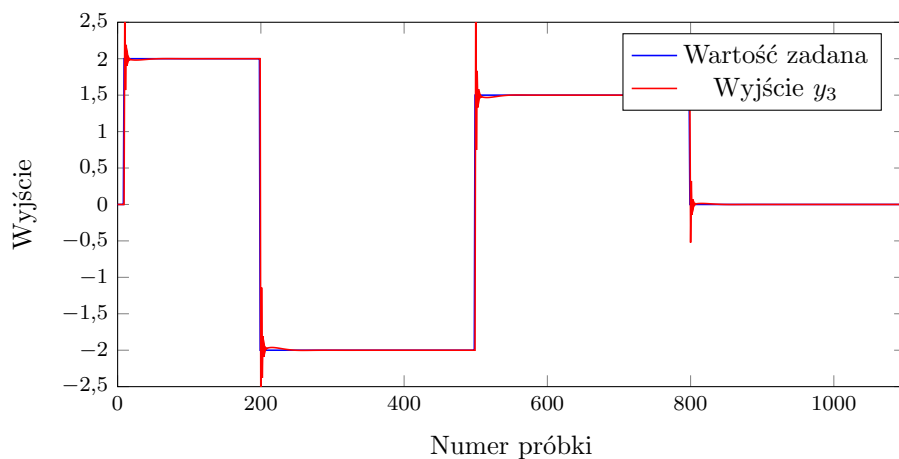
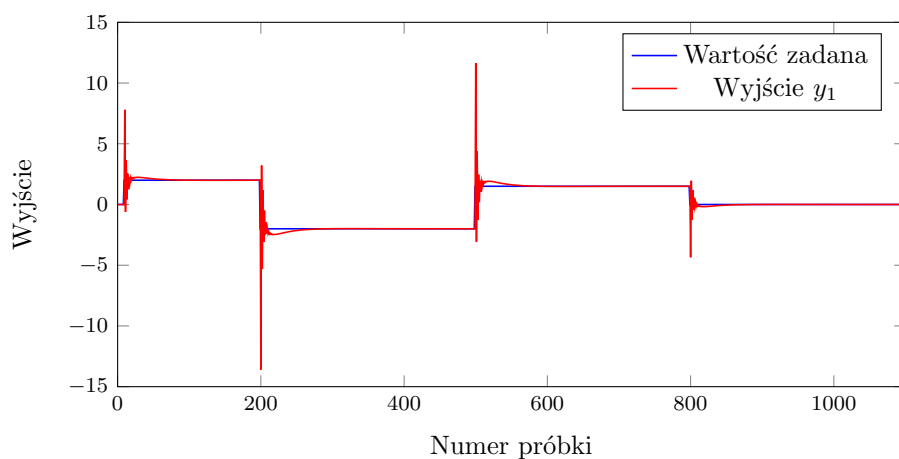
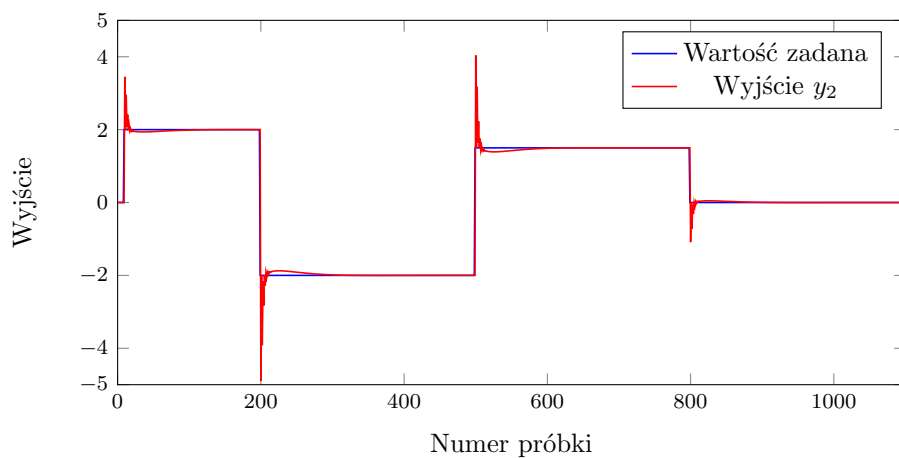


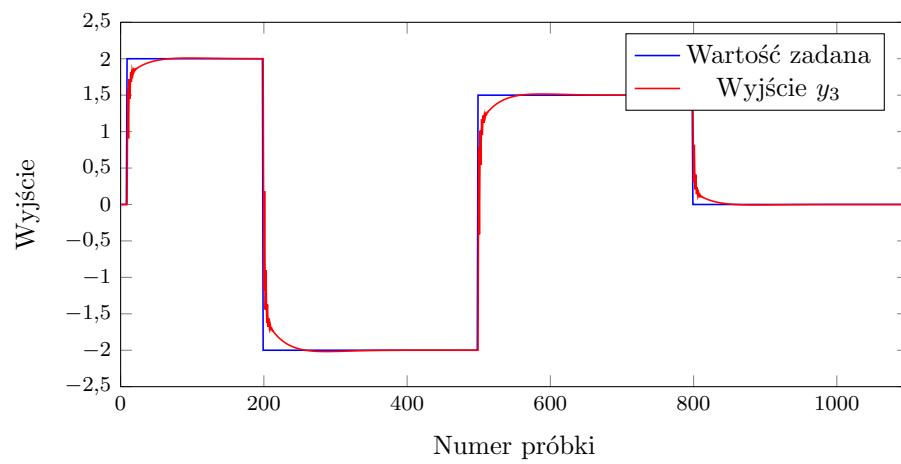
Rys. 3.1. Trajektoria wyjścia  $y_1$ , dla pierwszego zestawu regulatorów PID



Rys. 3.2. Trajektoria wyjścia  $y_2$ , dla pierwszego zestawu regulatorów PID

Rys. 3.3. Trajektoria wyjścia  $y_3$ , dla pierwszego zestawu regulatorów PIDRys. 3.4. Trajektoria wyjścia  $y_1$ , dla drugiego zestawu regulatorów PIDRys. 3.5. Trajektoria wyjścia  $y_2$ , dla drugiego zestawu regulatorów PID

Rys. 3.6. Trajektoria wyjścia  $y_3$ , dla drugiego zestawu regulatorów PIDRys. 3.7. Trajektoria wyjścia  $y_1$ , dla trzeciego zestawu regulatorów PIDRys. 3.8. Trajektoria wyjścia  $y_2$ , dla trzeciego zestawu regulatorów PID



Rys. 3.9. Trajektoria wyjścia  $y_3$ , dla trzeciego zestawu regulatorów PID

## 4. DMC

Na podstawie analizy odpowiedzi skokowych przyjęliśmy horyzont dynamiki  $D = 80$ . Przez  $E_i$  oznaczyliśmy wartość wskaźnika błędu dla wyjścia  $i$ , natomiast  $E$  jest sumą błędów dla wszystkich wyjść obiektu.

### 4.1. Dobór horyzontów predykcji i sterowania

Dobór horyzontów przeprowadzaliśmy korzystając z parametrów  $\psi$  i  $\lambda$  równymi 1. Rozpoczęliśmy od nastaw  $N = N_u = D = 80$ . Dla tych parametrów błędy wynosiły:

- $E_1 = 45,0725$
- $E_2 = 45,9624$
- $E_3 = 24,6561$
- $E = 115,6910$

Przebieg wyjść obiektu przedstawia wykres 4.1, a sterowań wykres 4.2.

Postanowiliśmy skrócić horyzonty do wartości  $N = N_u = 50$ . Otrzymane błędy wyniosły:

- $E_1 = 45,0726$
- $E_2 = 45,962$
- $E_3 = 24,6562$
- $E = 115,6908$

Błędy regulacji były więc praktycznie jednakowe jak dla dłuższych horyzontów. Przebiegi wyjść i sterowań przedstawiają wykresy 4.3 i 4.4.

W kolejnym kroku skróciliśmy horyzont predykcji do wartości  $N = 40$ , a sterowania  $N_u = 10$ . Taka zmiana przyniosła niewielką poprawę wskaźników błędu:

- $E_1 = 45,0801$
- $E_2 = 45,933$
- $E_3 = 24,6021$
- $E = 115,6152$

Przebieg wyjść obiektu przedstawiają wykresy 4.5 i 4.6.

Jak się okazało, dalsze skracanie horyzontu sterowania przyniosło znacznie bardziej wymierne rezultaty - dla  $N_u = 5$  wskaźniki błędów zmalały do wartości:

- $E_1 = 44,4289$
- $E_2 = 44,1988$
- $E_3 = 23,0761$
- $E = 111,7038$

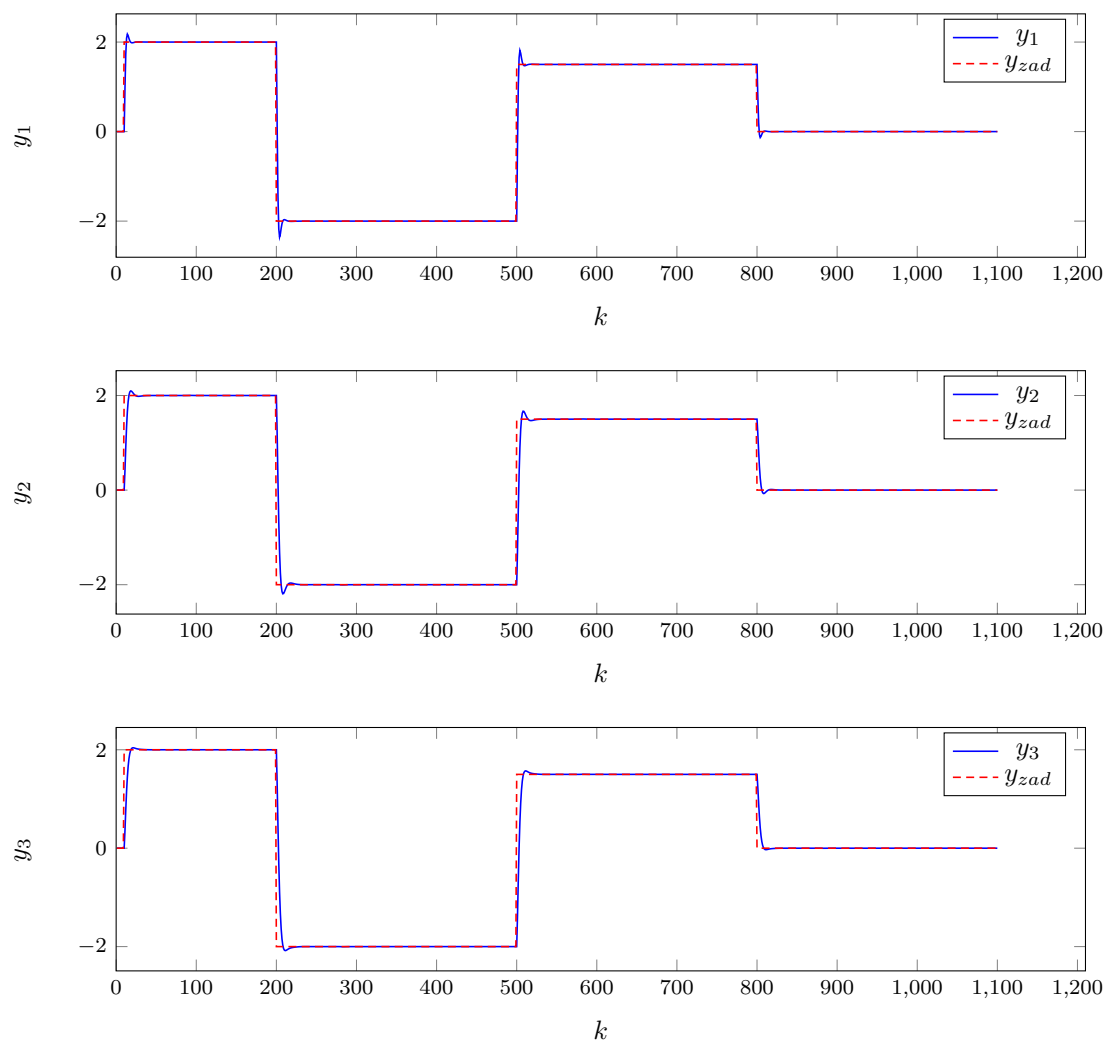
Przebieg wyjść obiektu przedstawiają wykresy 4.7 i 4.8.

Dalsze skracanie horyzontu predykcji nie przyniosło pozytywnych rezultatów. Dla  $N_u = 2$  wskaźniki błędów wyniosły:

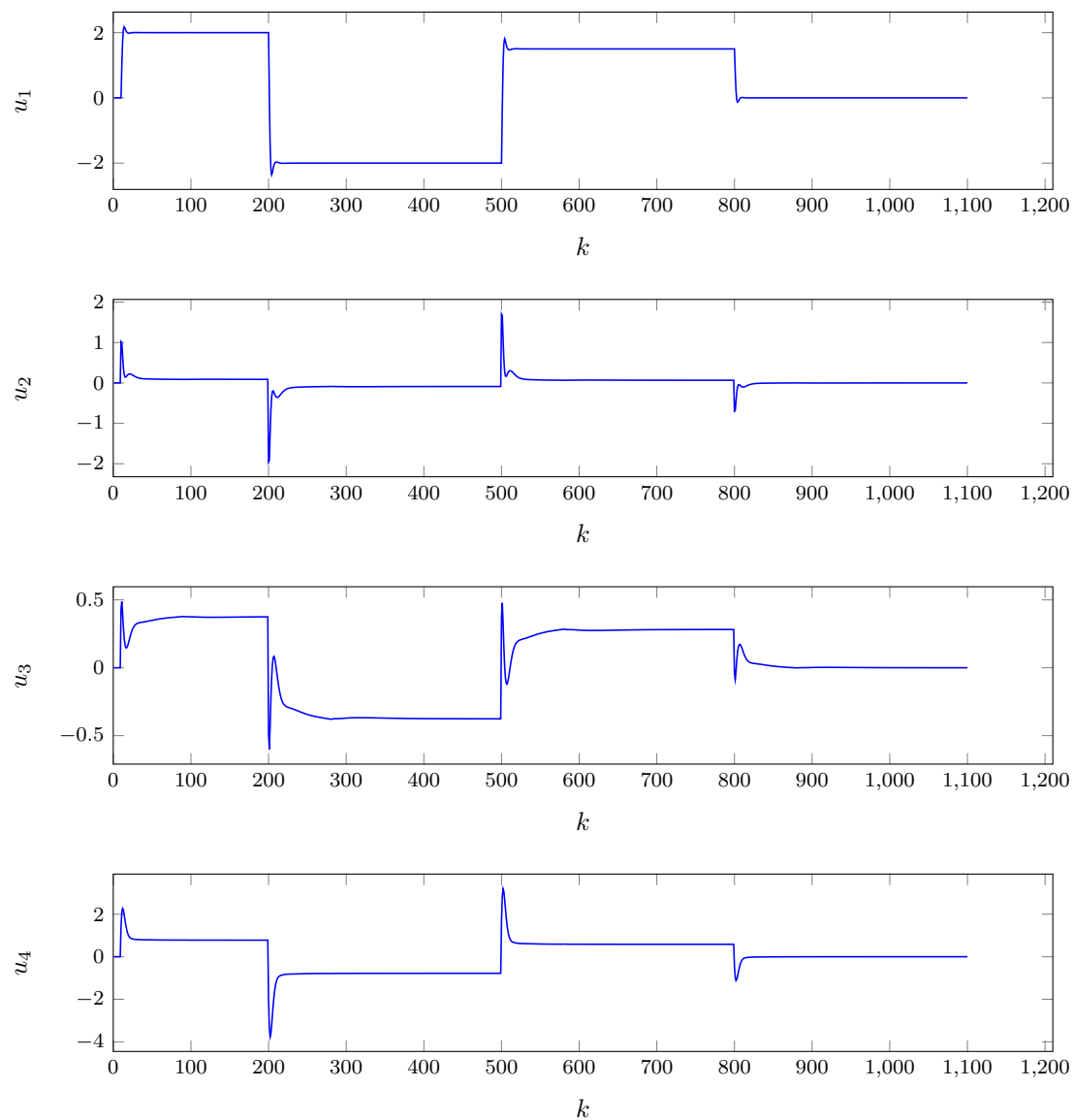
- $E_1 = 46,6684$
- $E_2 = 50,4711$
- $E_3 = 27,023$
- $E = 124,1625$

Można więc przypuszczać, że jeszcze mniejsze wartości horyzontu sterowania przyniosłyby pogorszenie jakości regulacji. Przebieg wyjść obiektu przedstawiają wykresy 4.9 i 4.10.

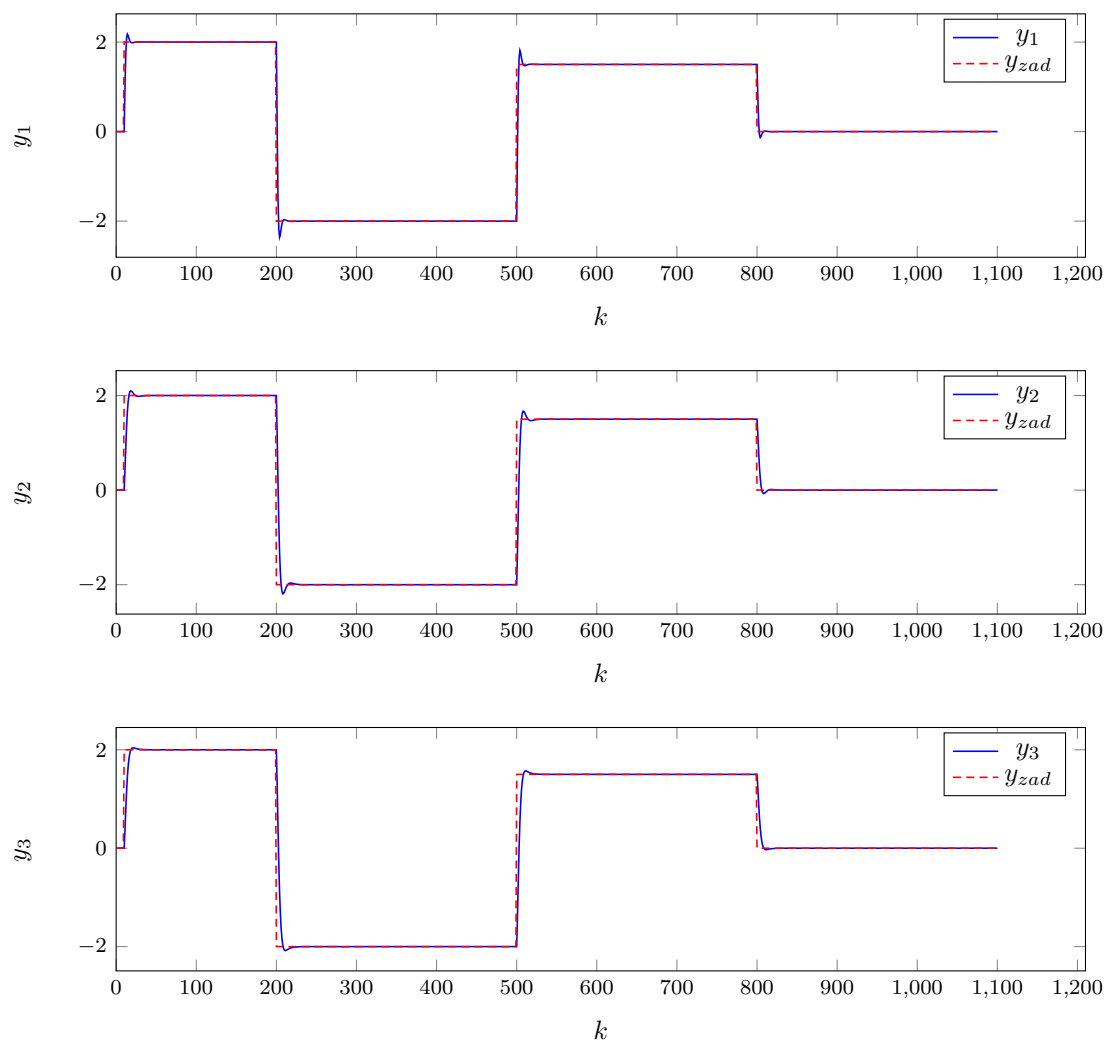
W kolejnych zadaniach używane będą horyzonty  $N = 40$  i  $N_u = 5$ .



Rys. 4.1. Przebiegi wyjść obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 80$ ,  $N_u = 80$ .

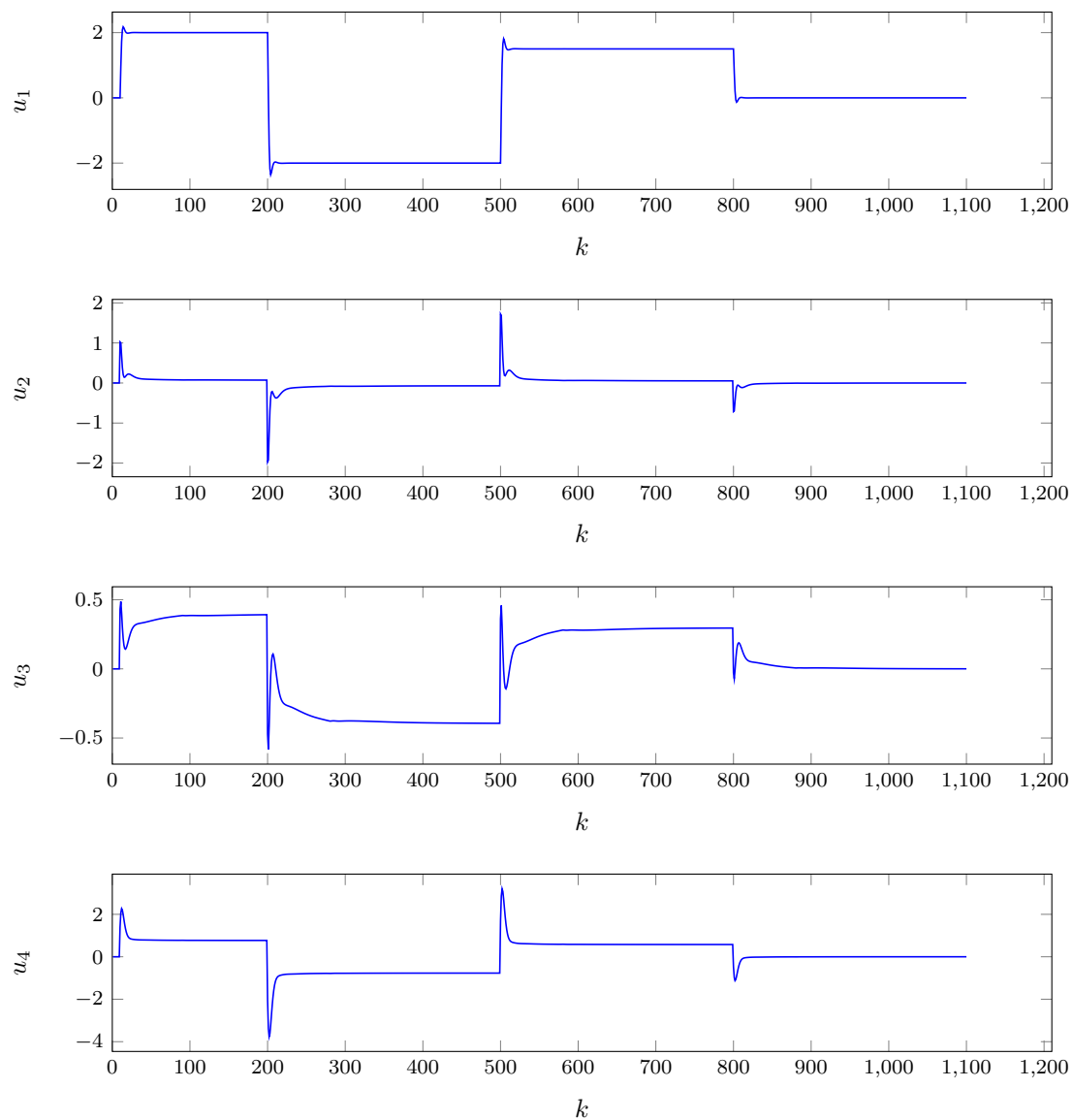


Rys. 4.2. Przebiegi sterowań obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 80$ ,  $N_u = 80$ .

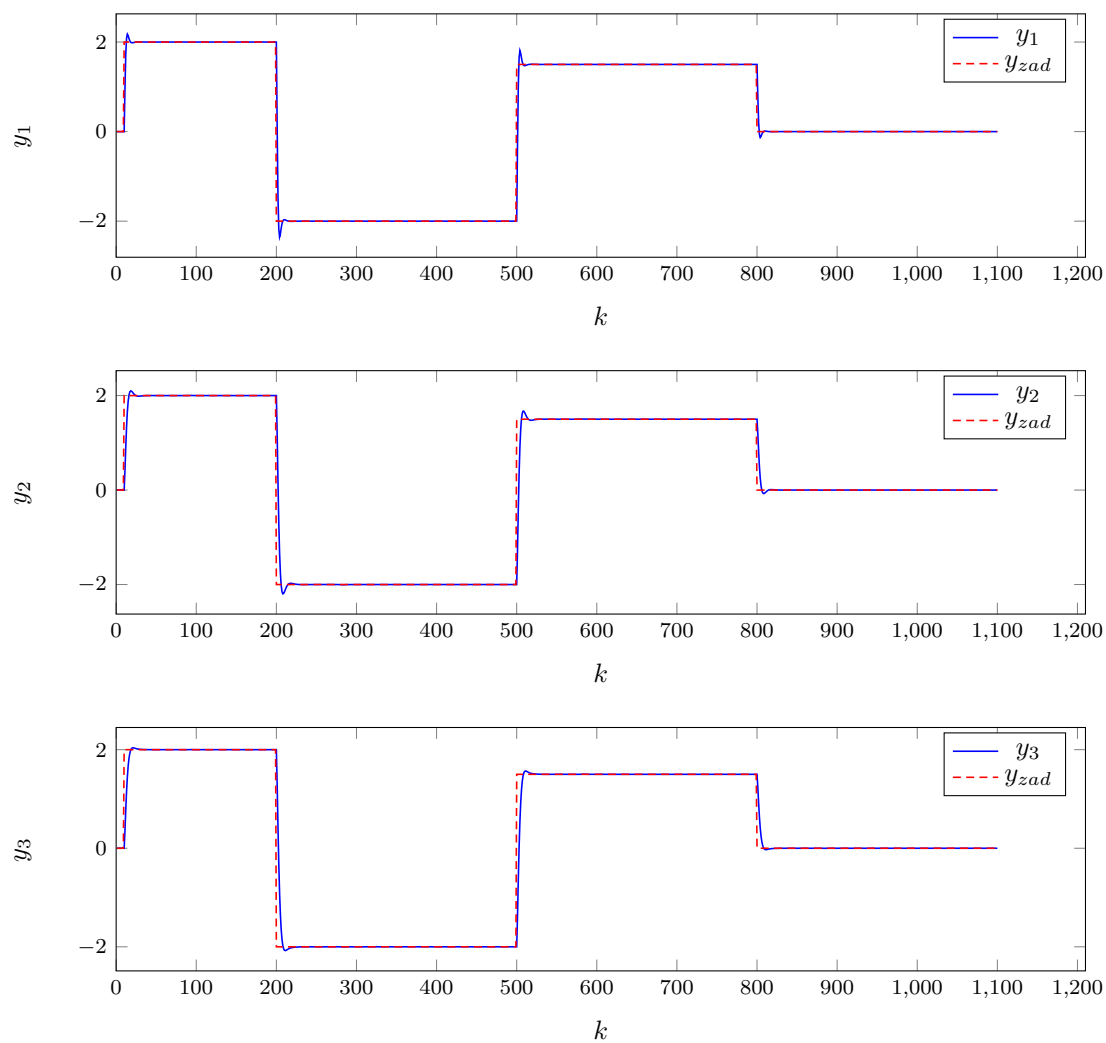


Rys. 4.3. Przebiegi wyjść obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 50$ ,  $N_u = 50$ .

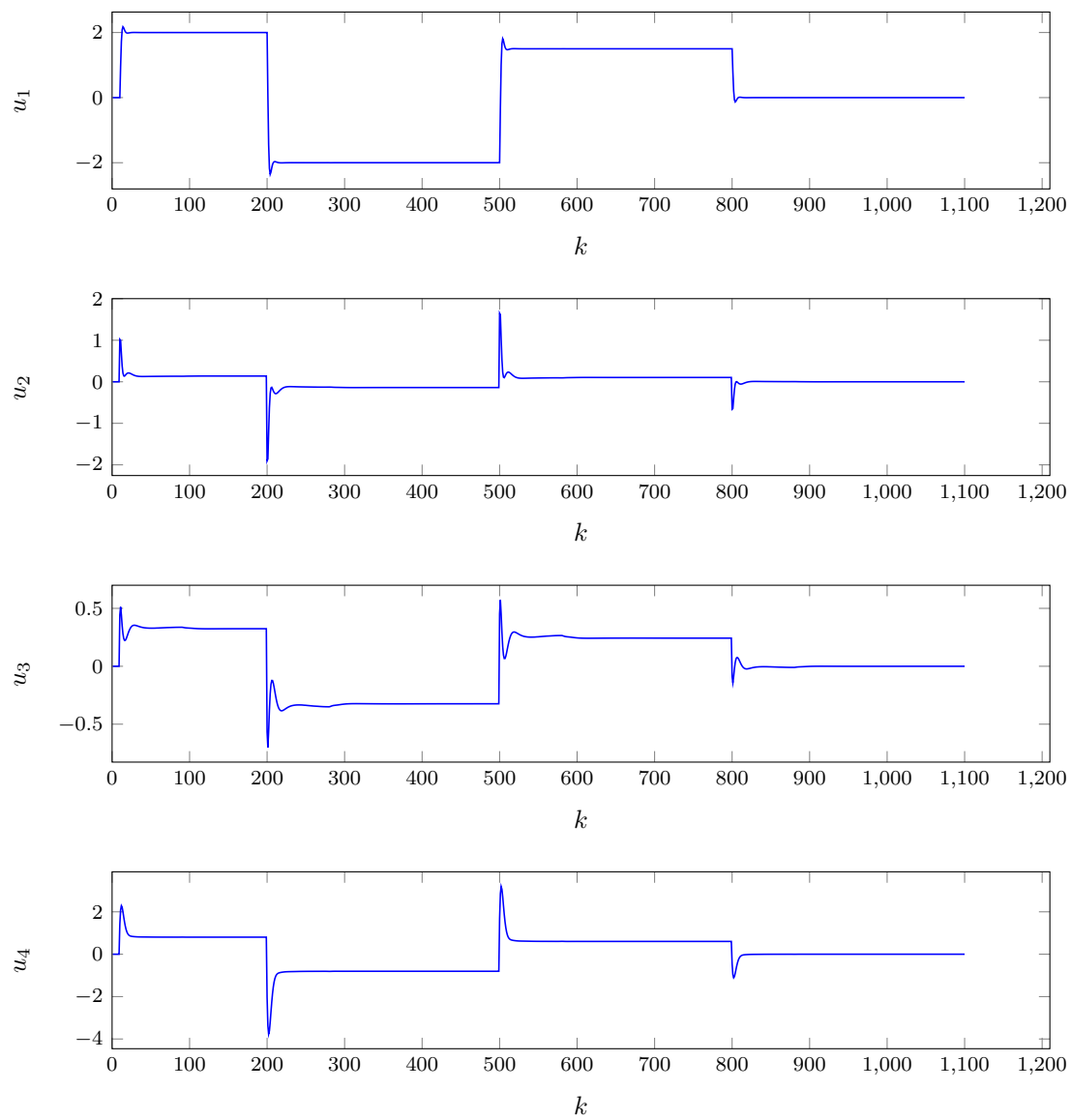




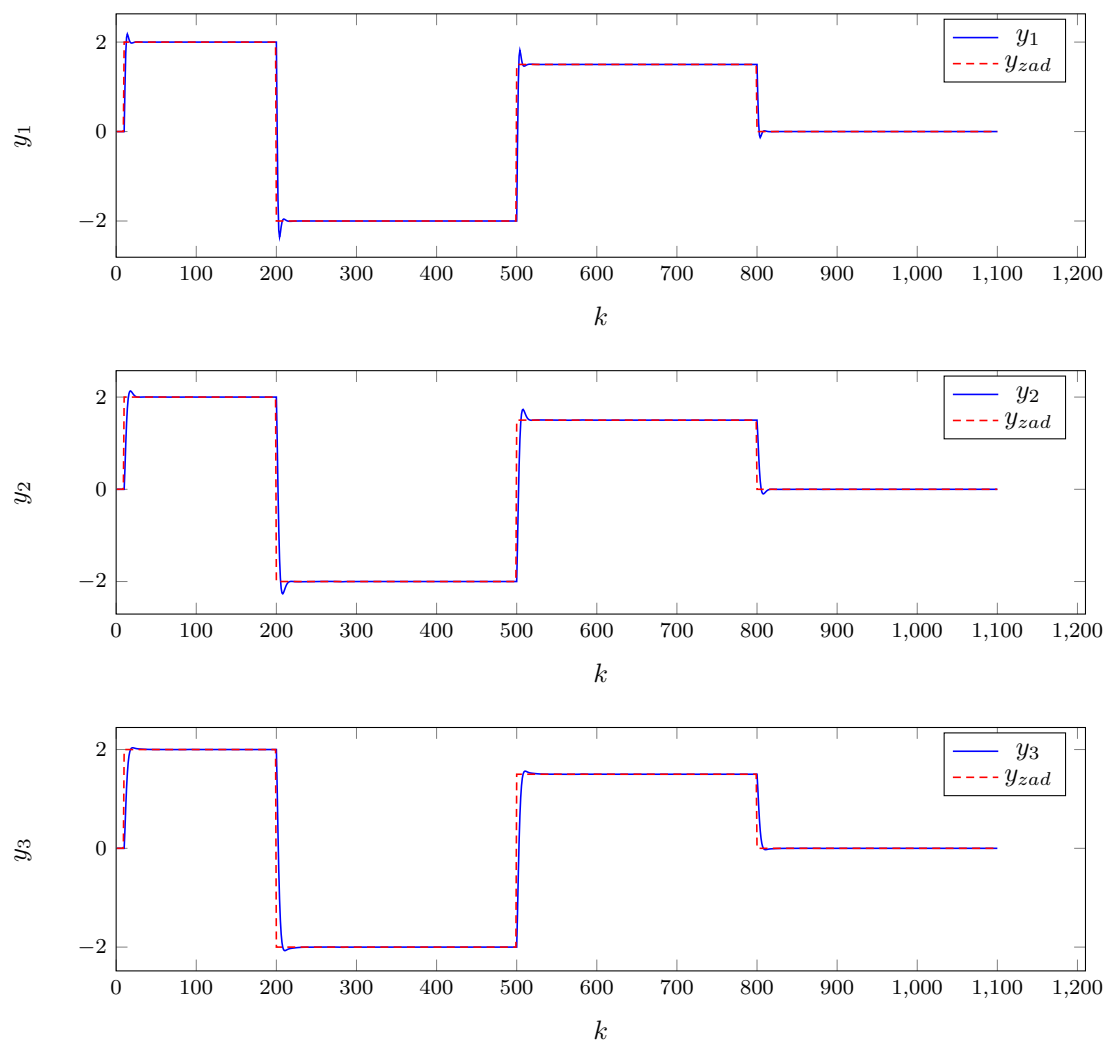
Rys. 4.4. Przebiegi sterowań obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 50$ ,  $N_u = 50$ .



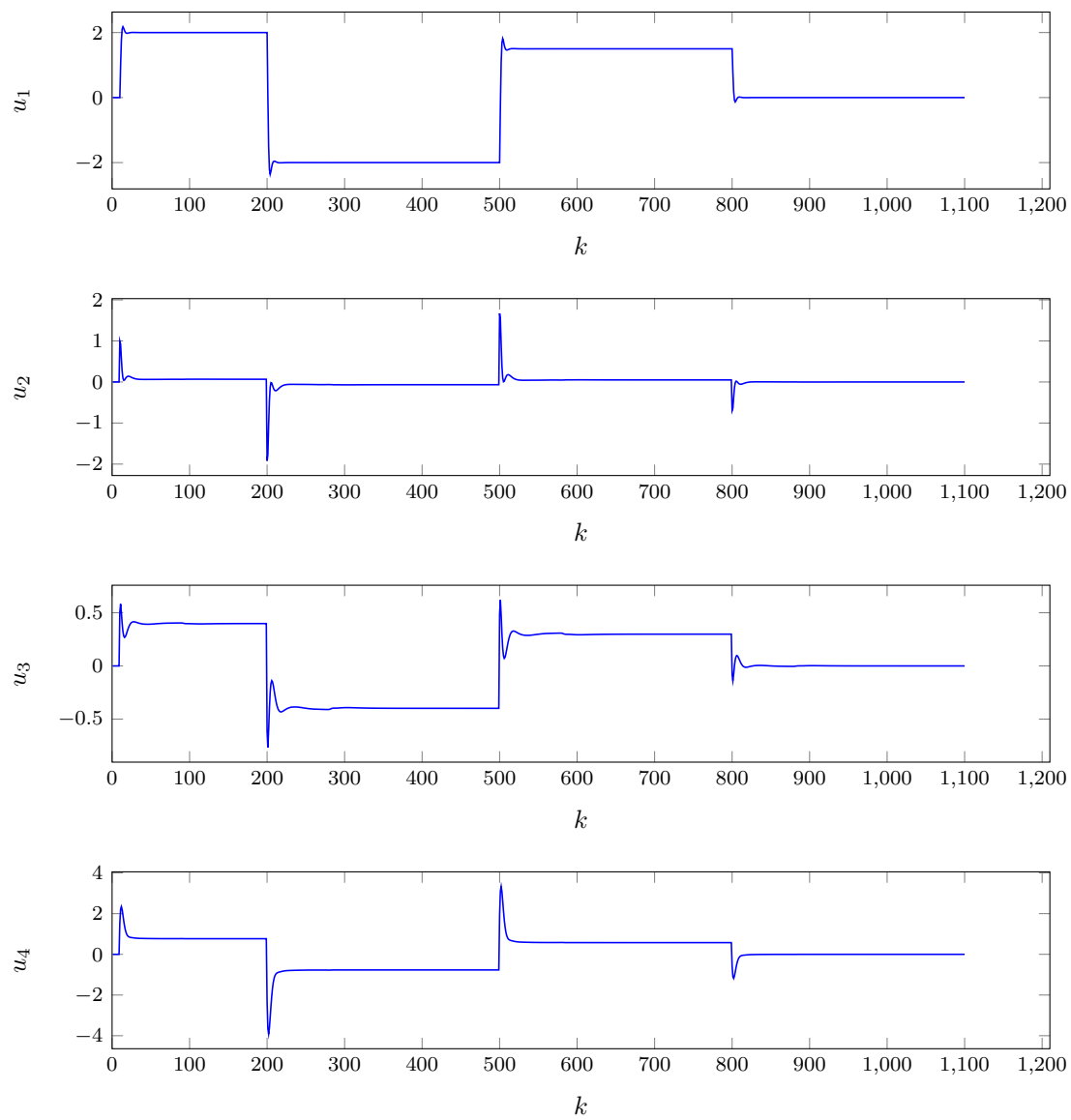
Rys. 4.5. Przebiegi wyjść obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 40$ ,  $N_u = 10$ .



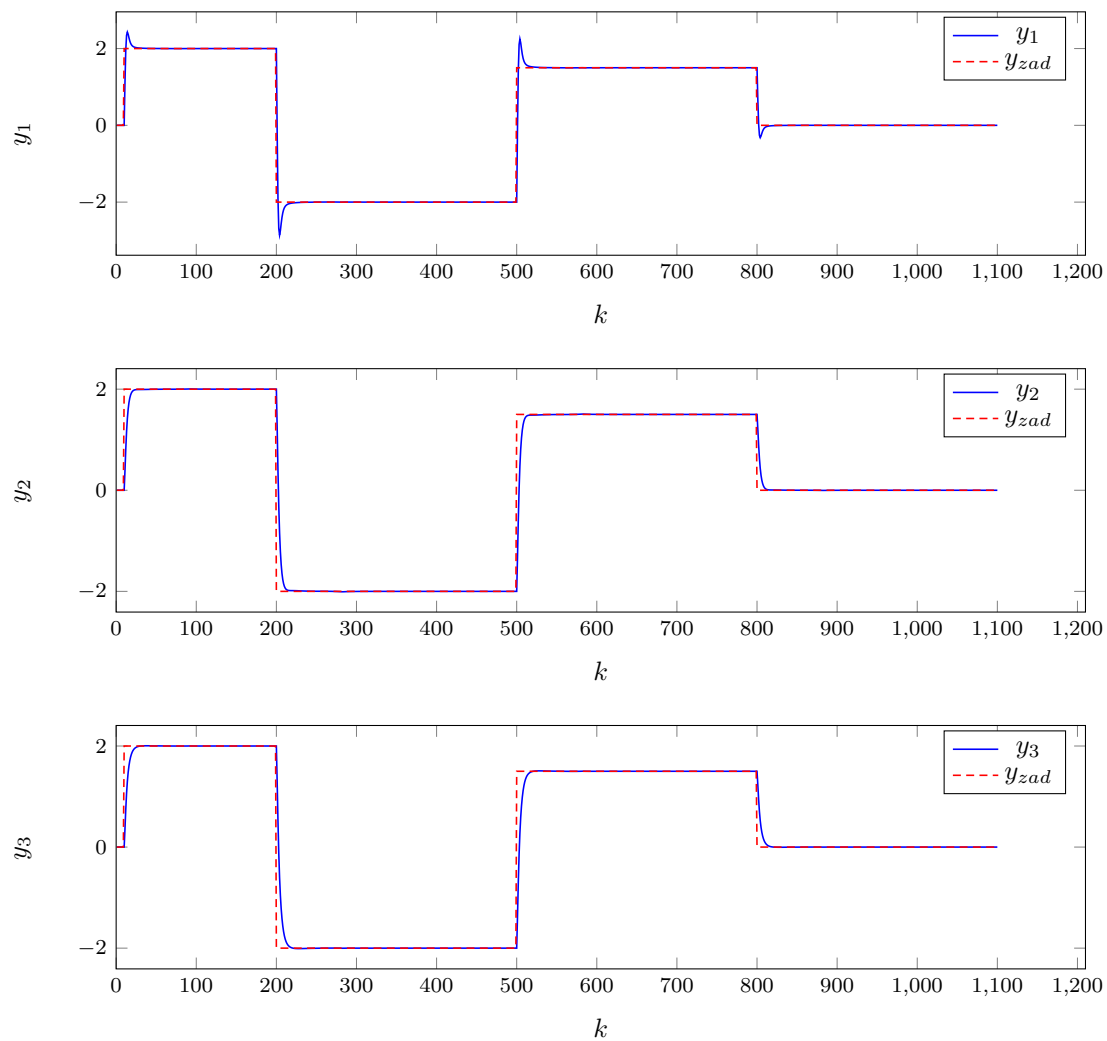
Rys. 4.6. Przebiegi sterowań obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 40$ ,  $N_u = 10$ .



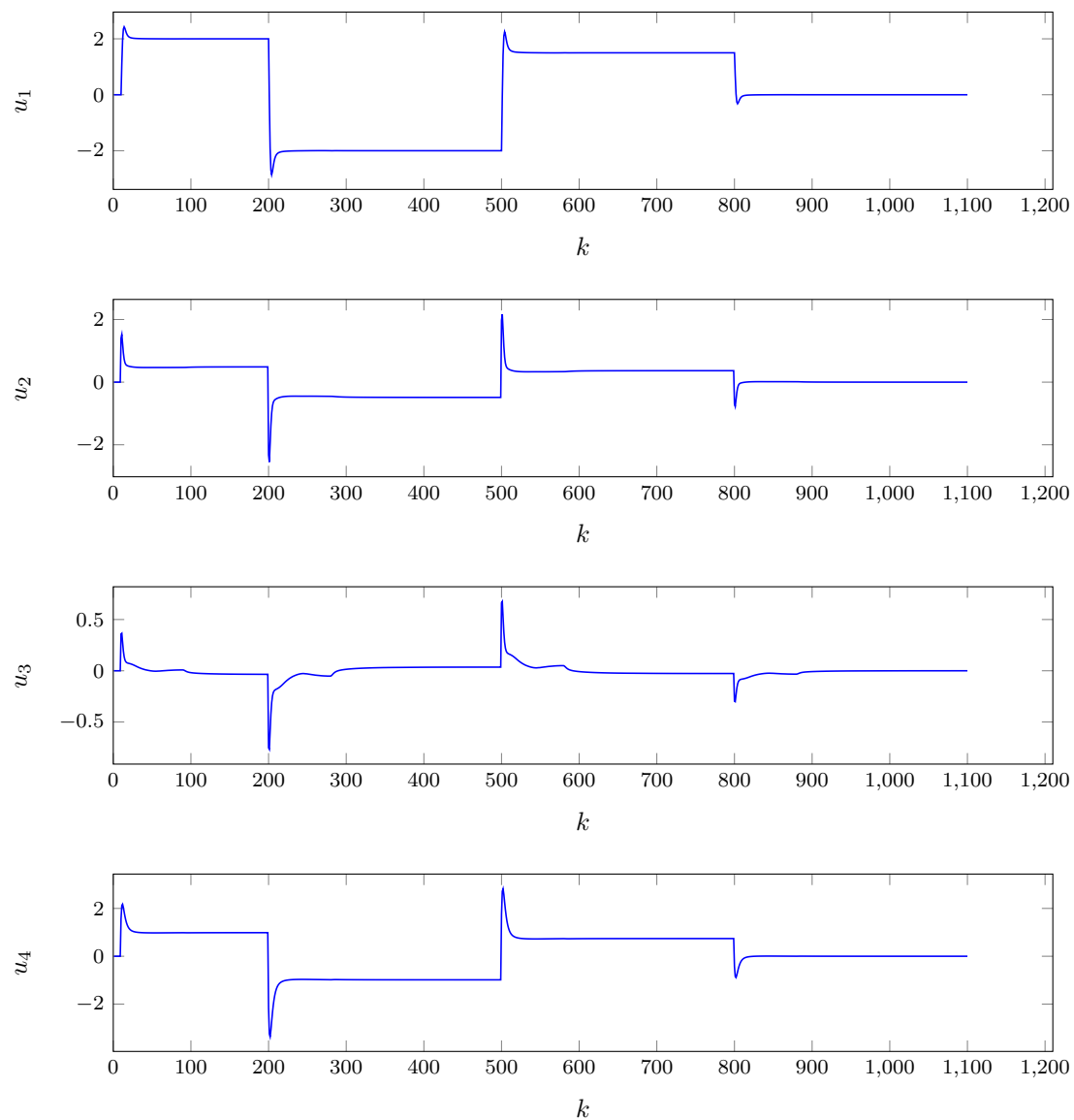
Rys. 4.7. Przebiegi wyjść obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 40$ ,  $N_u = 5$ .



Rys. 4.8. Przebiegi sterowań obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 40$ ,  $N_u = 5$ .



Rys. 4.9. Przebiegi wyjść obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 40$ ,  $N_u = 5$ .



Rys. 4.10. Przebiegi sterowań obiektu dla horyzontów predykcji i sterowania  $N = 40$ ,  $N_u = 2$ .

## 5. Parametry $\lambda$ i $\psi$

### 5.1. Parametr $\lambda$

W wyniku testowania różnych wartości współczynnika  $\lambda$  zaobserwowaliśmy, że błąd regulacji jest najmniejszy dla bardzo małych wartości  $\lambda$ . Trzeba jednak zauważyć, że niskie wartości parametru powodują, że przebieg sterowania jest znacznie "ostrzejszy", występują duże i nagłe skoki  $u$  przy zmianach wartości zadanej. W przypadku rzeczywistego obiektu, zjawisko to mogłoby mieć negatywny efekt, na przykład uszkodzenie części sterujących. Staraliśmy się więc doprowadzić do kompromisu między niskim wskaźnikiem błędu a łagodnym przebiegiem sterowania.

Testując różne wartości parametru  $\lambda$ , przyjęliśmy długości horyzontów  $N = 40$  i  $N_u = 5$ , a parametry  $\psi = 1$ .

Próba zwiększenia wartości parametrów  $\lambda$  okazała się przynosić znacznie wyższe współczynniki błędu.

- $E_1 = 49,4821$
- $E_2 = 49,361$
- $E_3 = 28,0998$
- $E = 126,9428$

Zdecydowaliśmy więc w kolejnych testach skupić się na parametrach  $\lambda$  poniżej 1. Przebiegi wyjść i sterowań przedstawiają wykresy 5.1 i 5.2.

Ustawienie parametrów na wartości  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,2$  dało w rezultacie bardzo dużą poprawę wskaźników błędu regulacji.

- $E_1 = 37,0136$
- $E_2 = 37,5058$
- $E_3 = 14,446$
- $E = 88,9654$

Charakterystykę sterowania uznaliśmy za akceptowalną. Przebiegi wyjść i sterowań przedstawiają wykresy 5.3 i 5.4.

Parametry  $\lambda$  o wartościach 0,1 dały w rezultacie jeszcze mniejsze wskaźniki błędów. Można jednak dostrzec, że skoki sterowania na torach 1 i 4 mają znacznie większe wartości, niż na torach 2 i 3. Tor sterowania 3 natomiast ma łagodniejszy przebieg niż pozostałe. Z tego powodu przetestujemy, jak zachowuje się obiekt w przypadku, gdy parametry  $\lambda_1$  i  $\lambda_4$  mają wyższe wartości niż  $\lambda_2$ , a  $\lambda_3$  ma niższą wartość.

Przyjęliśmy parametry o następujących wartościach:

- $\lambda_1 = 0,3$
- $\lambda_2 = 0,2$
- $\lambda_3 = 0,1$
- $\lambda_4 = 0,3$

Błędy regulacji:

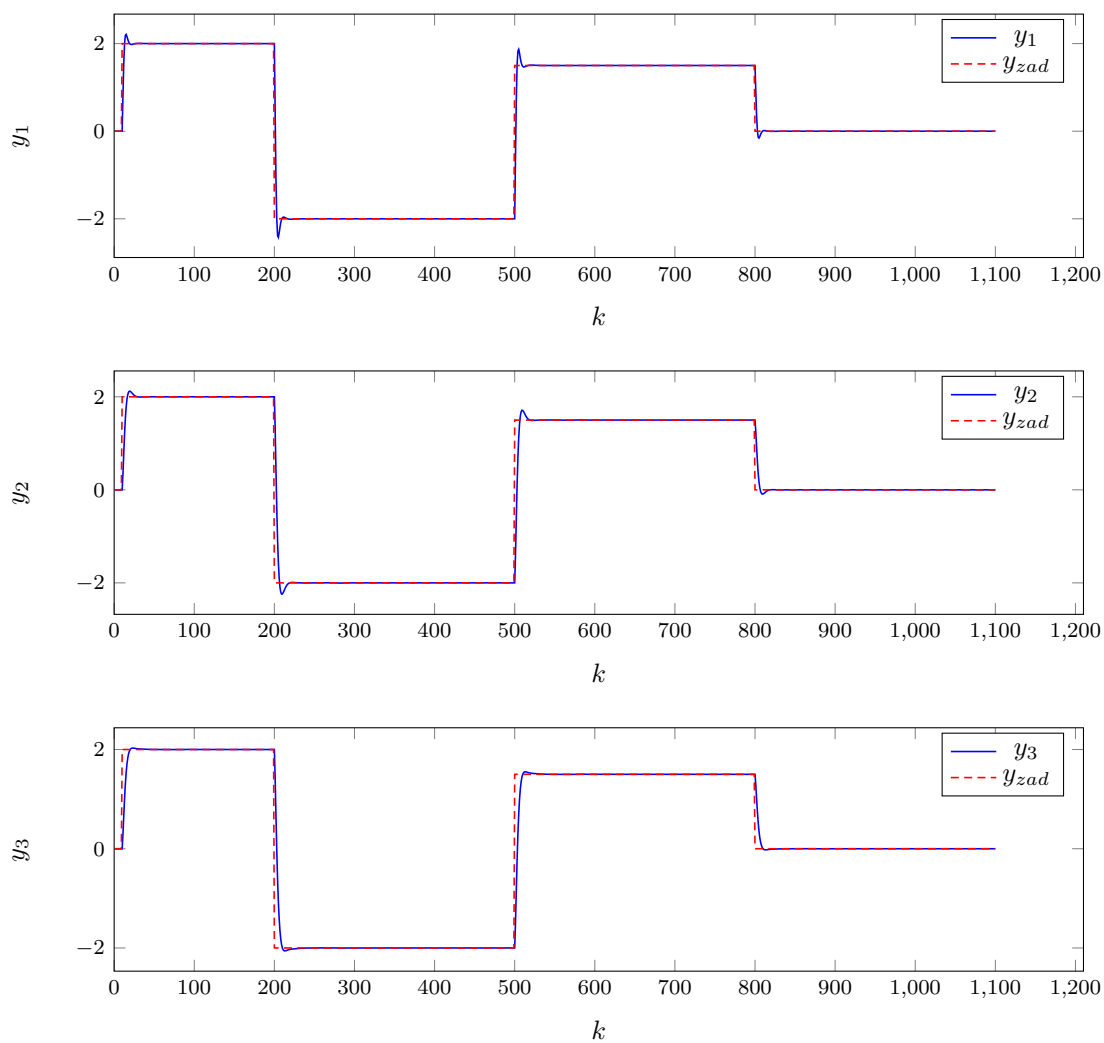
- $E_1 = 36,357$
- $E_2 = 38,3743$
- $E_3 = 16,2287$
- $E = 90,9600$

Jak widać odnotowaliśmy nieznaczne pogorszenie jakości regulacji. Można jednak zaobserwować na wykresie sterowań 5.6, że tory 1 i 4 mają łagodniejsze przebiegi. Uznaliśmy więc, że te wartości  $\lambda$  są w naszym przypadku optymalne. Przebiegi wyjść przedstawia wykres 5.5.

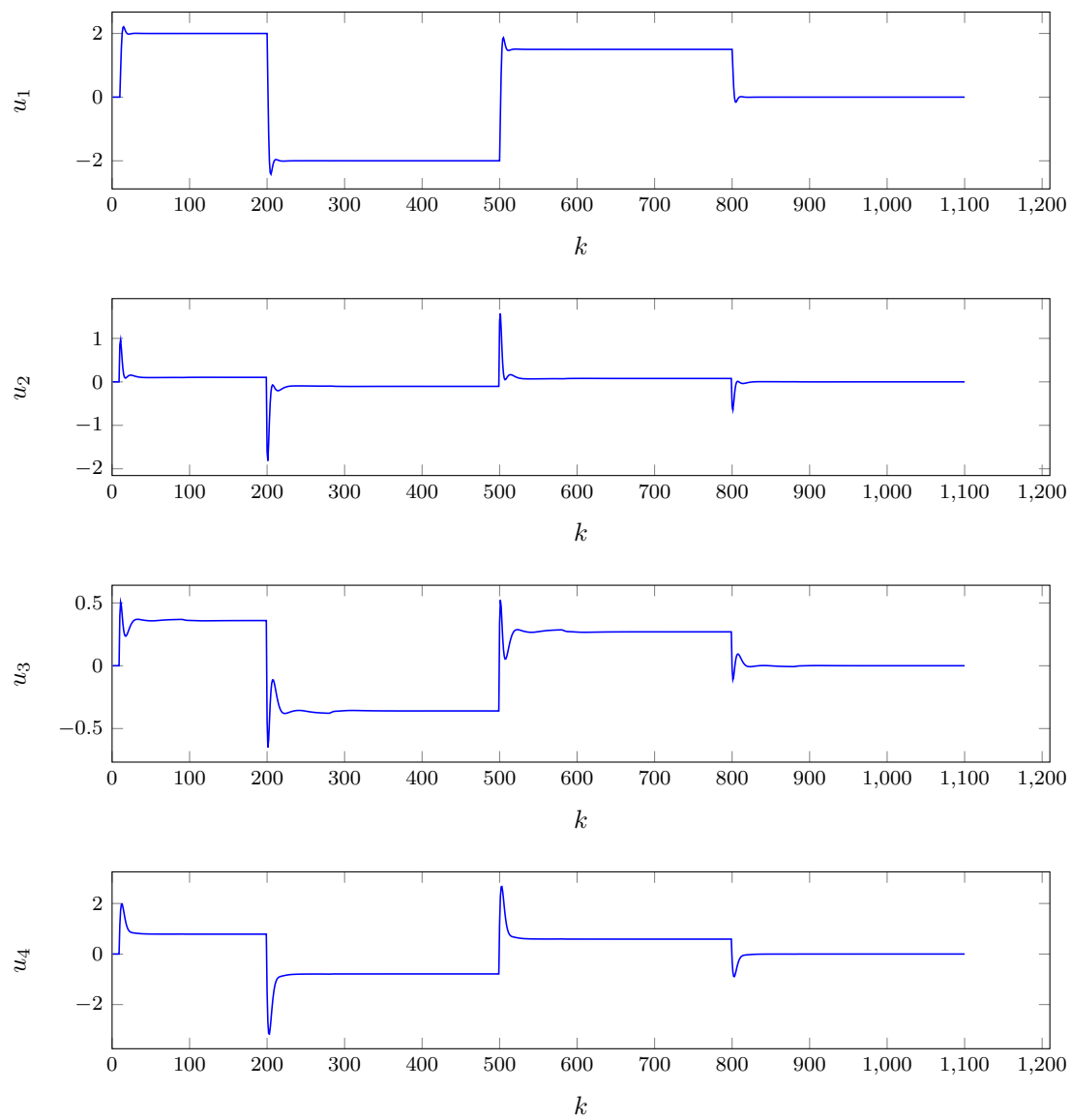


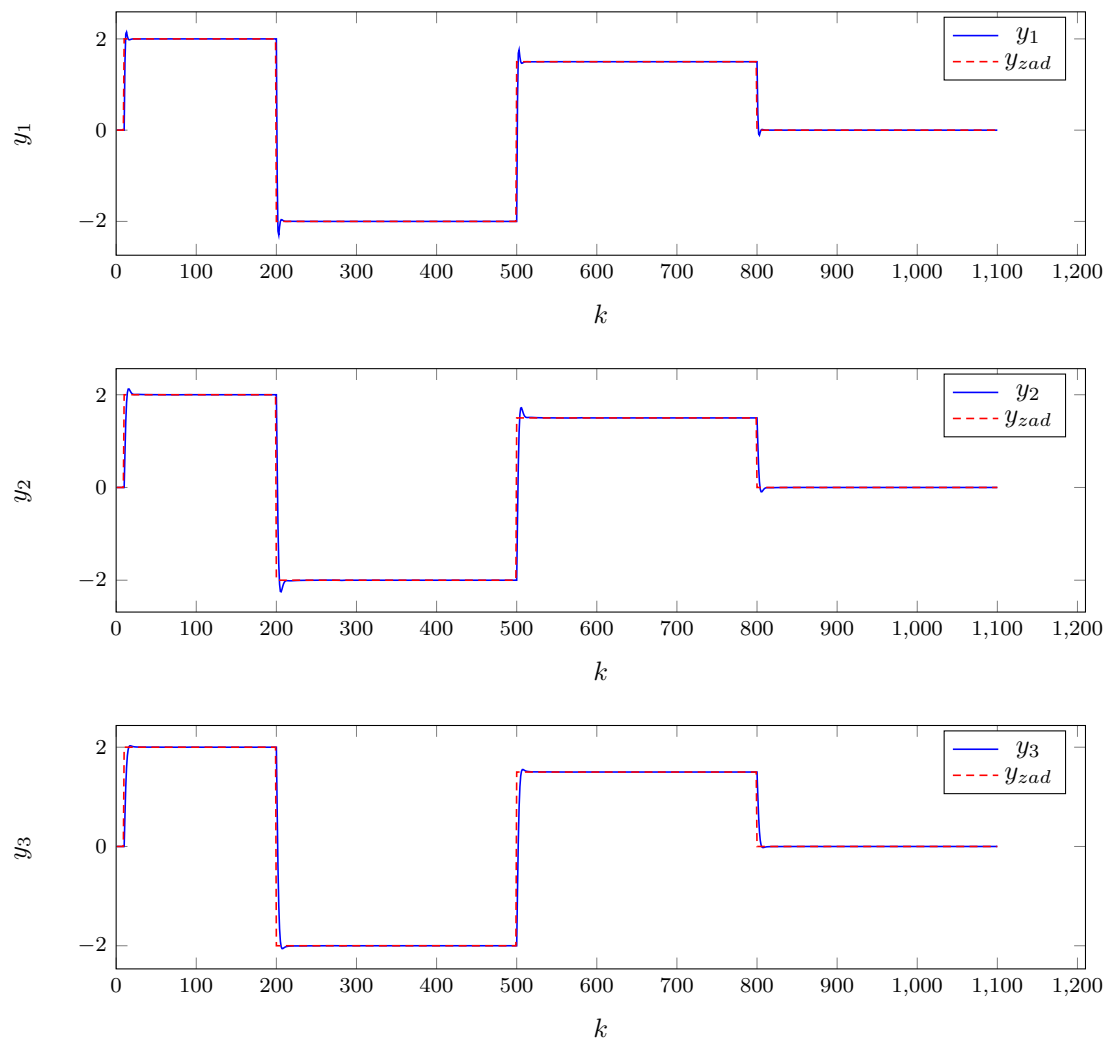
W kolejnych testach używane będą parametry  $\lambda$  o wartościach:

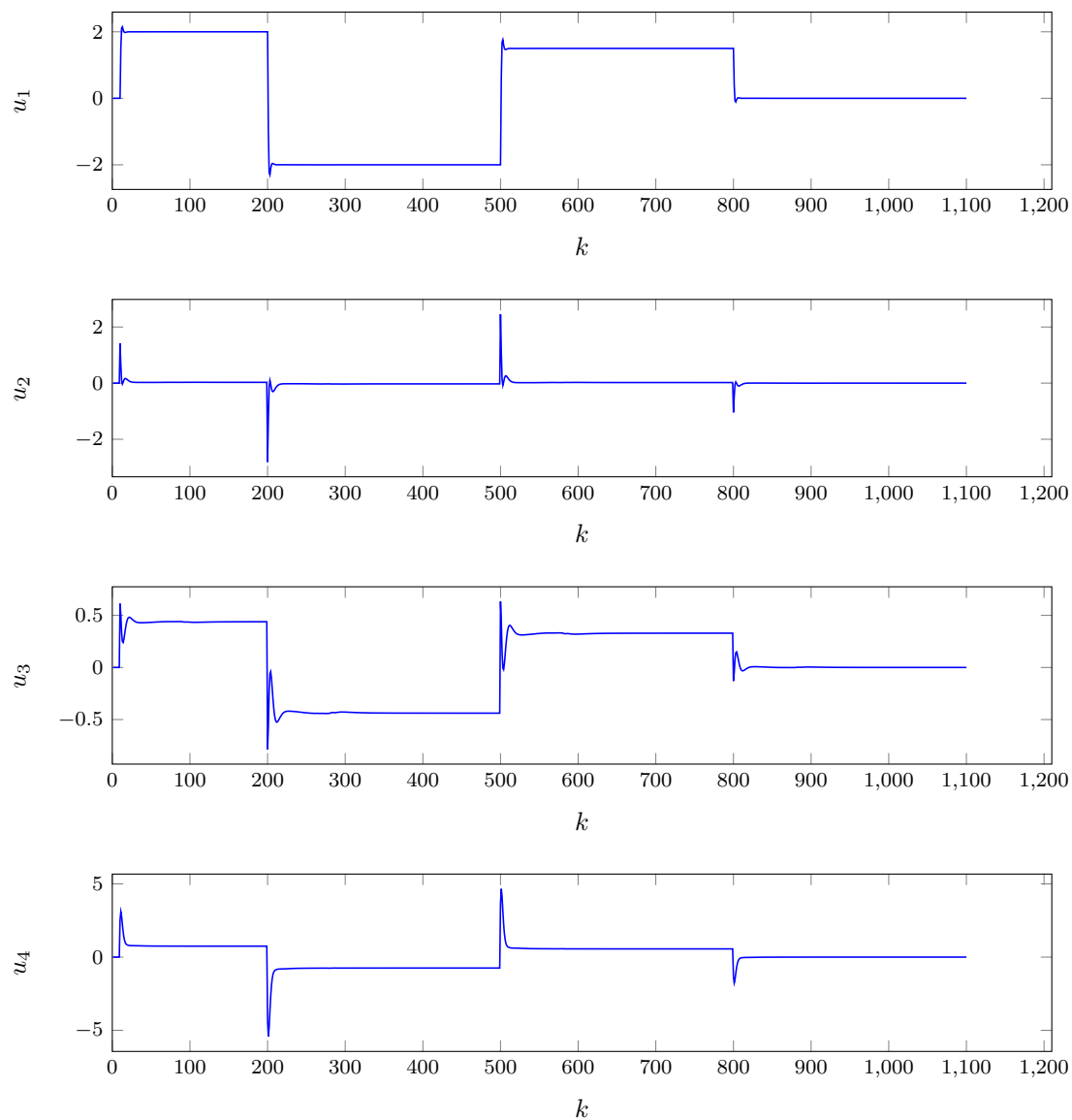
- $\lambda_1 = 0,3$
- $\lambda_2 = 0,2$
- $\lambda_3 = 0,1$
- $\lambda_4 = 0,3$



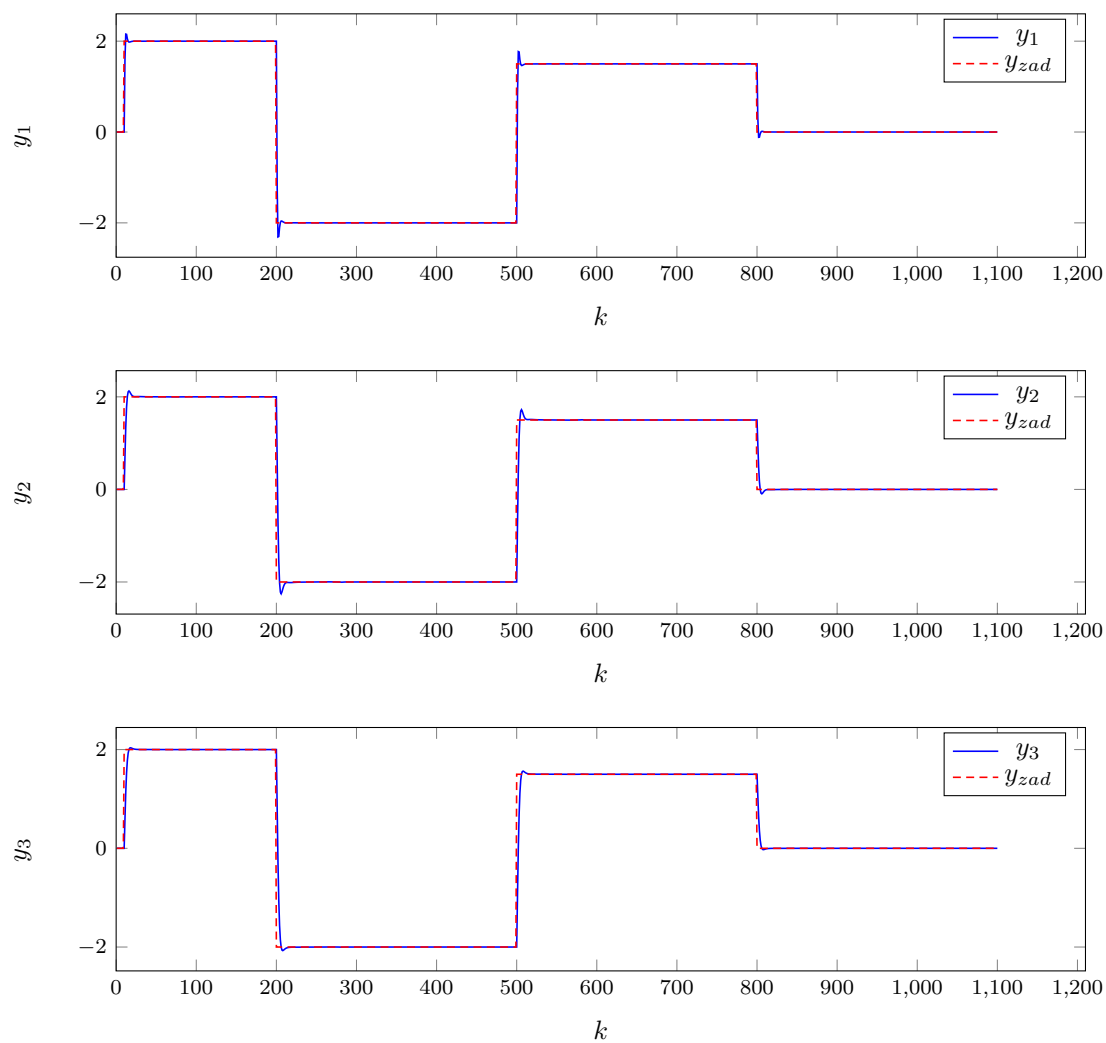
Rys. 5.1. Przebiegi wyjść obiektu dla  $\lambda_1 = 2$ ,  $\lambda_2 = 2$ ,  $\lambda_3 = 2$  i  $\lambda_4 = 2$ .

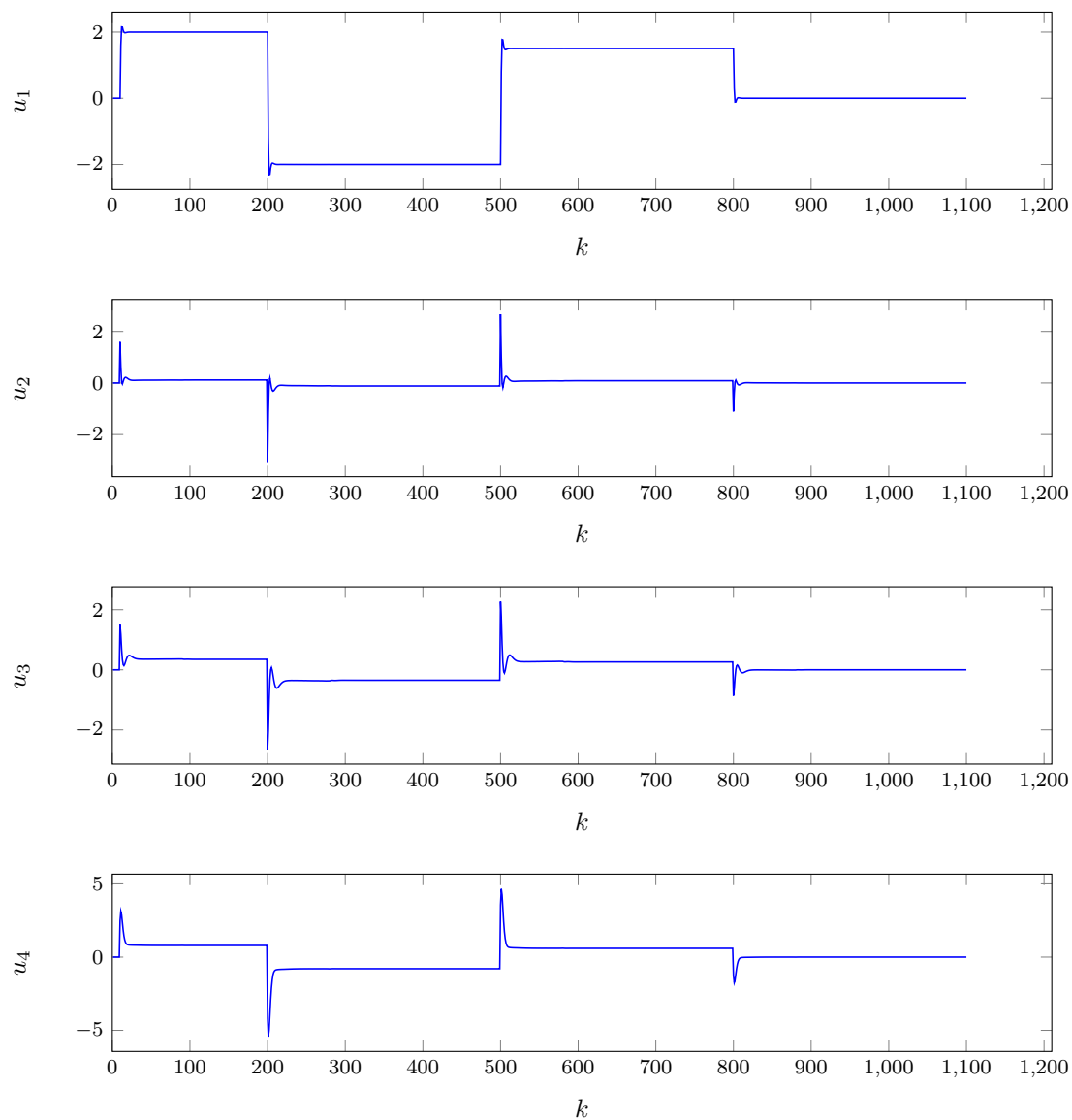
Rys. 5.2. Przebiegi sterowań obiektu dla  $\lambda_1 = 2$ ,  $\lambda_2 = 2$ ,  $\lambda_3 = 2$  i  $\lambda_4 = 2$ .

Rys. 5.3. Przebiegi wyjść obiektu dla  $\lambda_1 = 0,2$ ,  $\lambda_2 = 0,2$ ,  $\lambda_3 = 0,2$  i  $\lambda_4 = 0,2$ .



Rys. 5.4. Przebiegi sterowań obiektu dla  $\lambda_1 = 0,2$ ,  $\lambda_2 = 0,2$ ,  $\lambda_3 = 0,2$  i  $\lambda_4 = 0,2$ .

Rys. 5.5. Przebiegi wyjść obiektu dla  $\lambda_1 = 0,3$ ,  $\lambda_2 = 0,2$ ,  $\lambda_3 = 0,1$  i  $\lambda_4 = 0,3$ .

Rys. 5.6. Przebiegi sterowań obiektu dla  $\lambda_1 = 0,3$ ,  $\lambda_2 = 0,2$ ,  $\lambda_3 = 0,1$  i  $\lambda_4 = 0,3$ .

## 5.2. Parametr $\psi$

W wyniku testowania różnych wartości współczynnika  $\psi$  zaobserwowaliśmy, że błąd regulacji jest najmniejszy dla dużych wartości  $\psi$ . Podobnie jednak jak w przypadku dobierania  $\lambda$  zauważamy, że wysokie wartości parametru powodują, że przebieg sterowania jest znacznie "ostrzejszy", występują duże i nagłe skoki  $u$  przy zmianach wartości zadanej. W przypadku rzeczywistego obiektu, zjawisko to mogłoby mieć negatywny efekt, na przykład uszkodzenie części sterujących. Staraliśmy się więc doprowadzić do kompromisu między niskim wskaźnikiem błędu a łagodnym przebiegiem sterowania.

Testując różne wartości parametru  $\psi$ , przyjęliśmy długości horyzontów  $N = 40$  i  $N_u = 5$  oraz współczynniki  $\lambda_1 = 0,3$ ,  $\lambda_2 = 0,2$ ,  $\lambda_3 = 0,1$ ,  $\lambda_4 = 0,3$ .

Próba ustawienia parametrów  $\psi$  na wartość poniżej 1 dała w rezultacie wyższe błędy regulacji. Próba zmniejszenia wartości parametrów  $\psi$  do 0,8 okazała się przynosić wyższe współczynniki błędu.

- $E_1 = 36,9114$
- $E_2 = 39,0784$
- $E_3 = 17,3408$
- $E = 93,3306$

Zdecydowaliśmy więc, że kolejne testy przeprowadzane będą na wartościach  $\psi$  powyżej 1. Przebiegi wyjść i sterowań przedstawiają wykresy 5.7 i 5.7.

Zwiększenie współczynników  $\psi$  do wartości 5 dało w rezultacie bardzo dużą poprawę błędu regulacji.

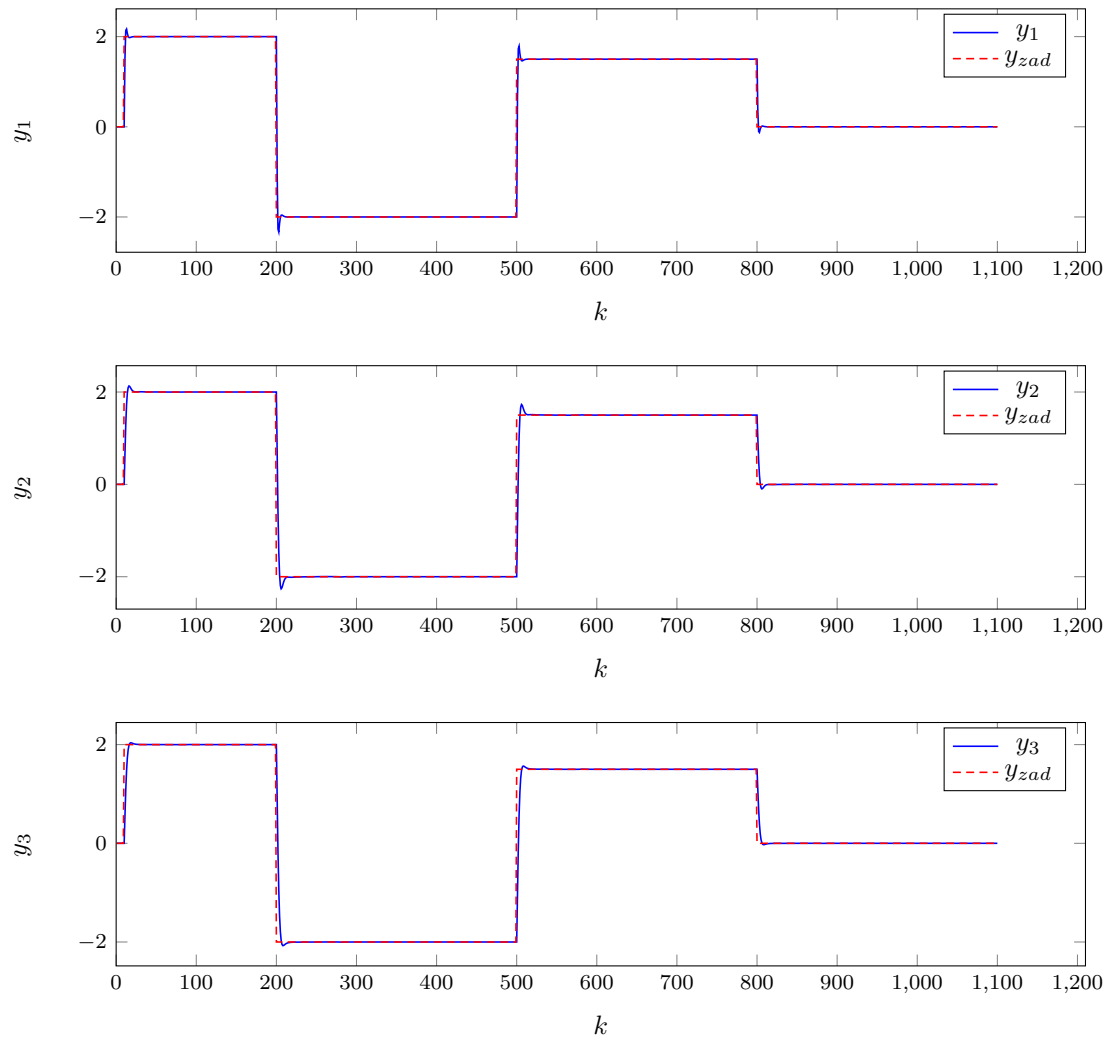
- $E_1 = 34,6604$
- $E_2 = 34,131$
- $E_3 = 9,0736$
- $E = 78,8650$

Należy jednak odnotować, że przebieg sterowania jest teraz znacznie ostrzejszy, co jest szczególnie widoczne na torze sterowania 4 (wykres 5.10). Zmiana  $\psi$  nie miała dużego wpływu na pozostałe tory. Spróbujemy więc, manipulując parametrami  $\psi$ , złagodzić sterowanie na torze 4, zachowując jednocześnie poprawę błędu regulacji. Wyjścia obiektu przedstawia wykres 5.9.

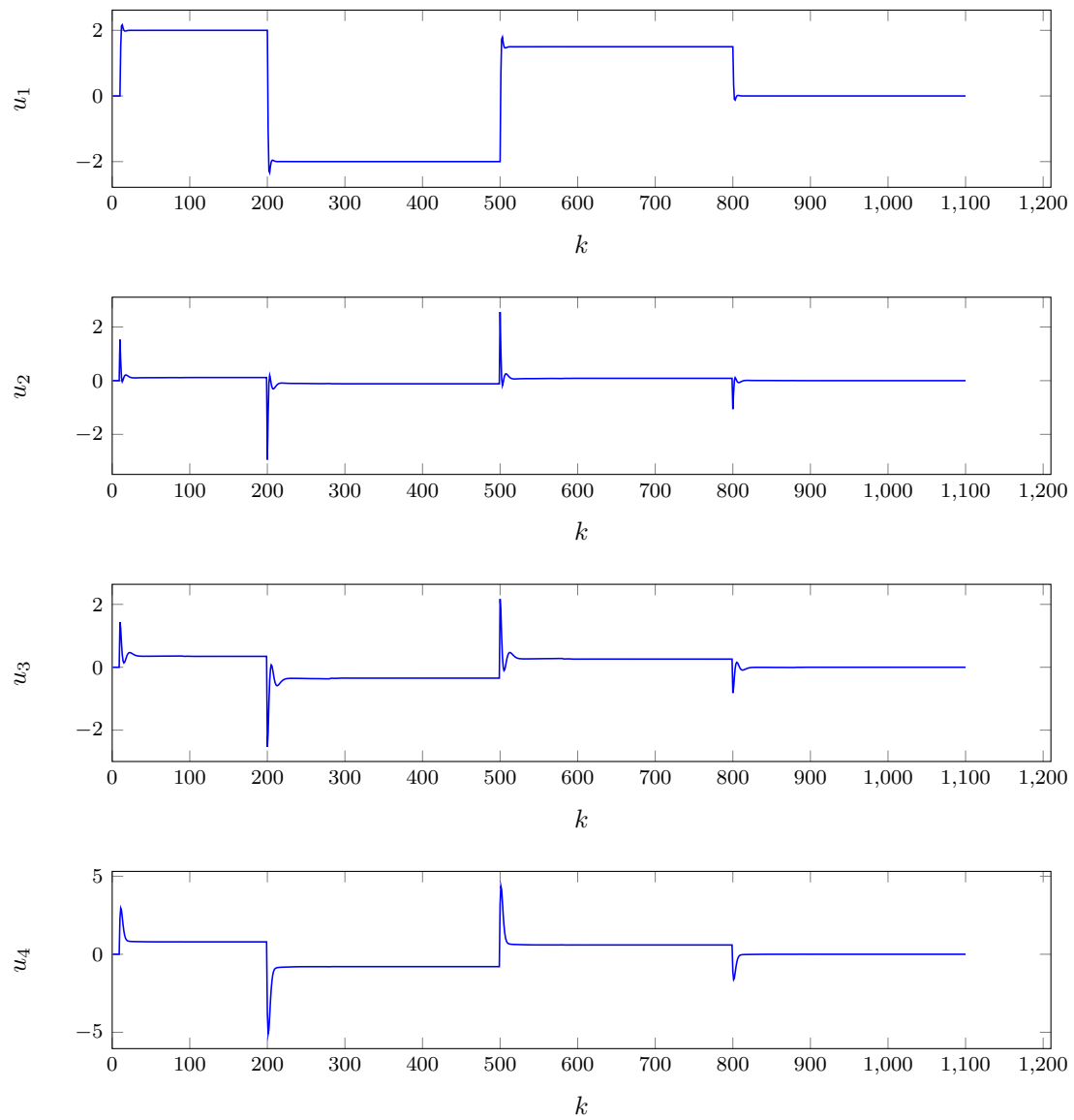
W wyniku eksperymentów dowiedzieliśmy się, że najbardziej na sterowanie na torze czwartym wpływa parametr  $\psi_3$ . Postanowiliśmy więc zmniejszyć  $\psi_3$ , jednocześnie zwiększając  $\psi_1$  i  $\psi_2$ . Przetestowaliśmy działanie obiektu na wartościach  $\psi_1 = 6,5$ ,  $\psi_2 = 7$ ,  $\psi_3 = 2$ . Jak widać na wykresie 5.12, sterowanie zostało nieco złagodzone, choć w rezultacie nieznacznie pogorszył się wskaźnik błędu regulacji.

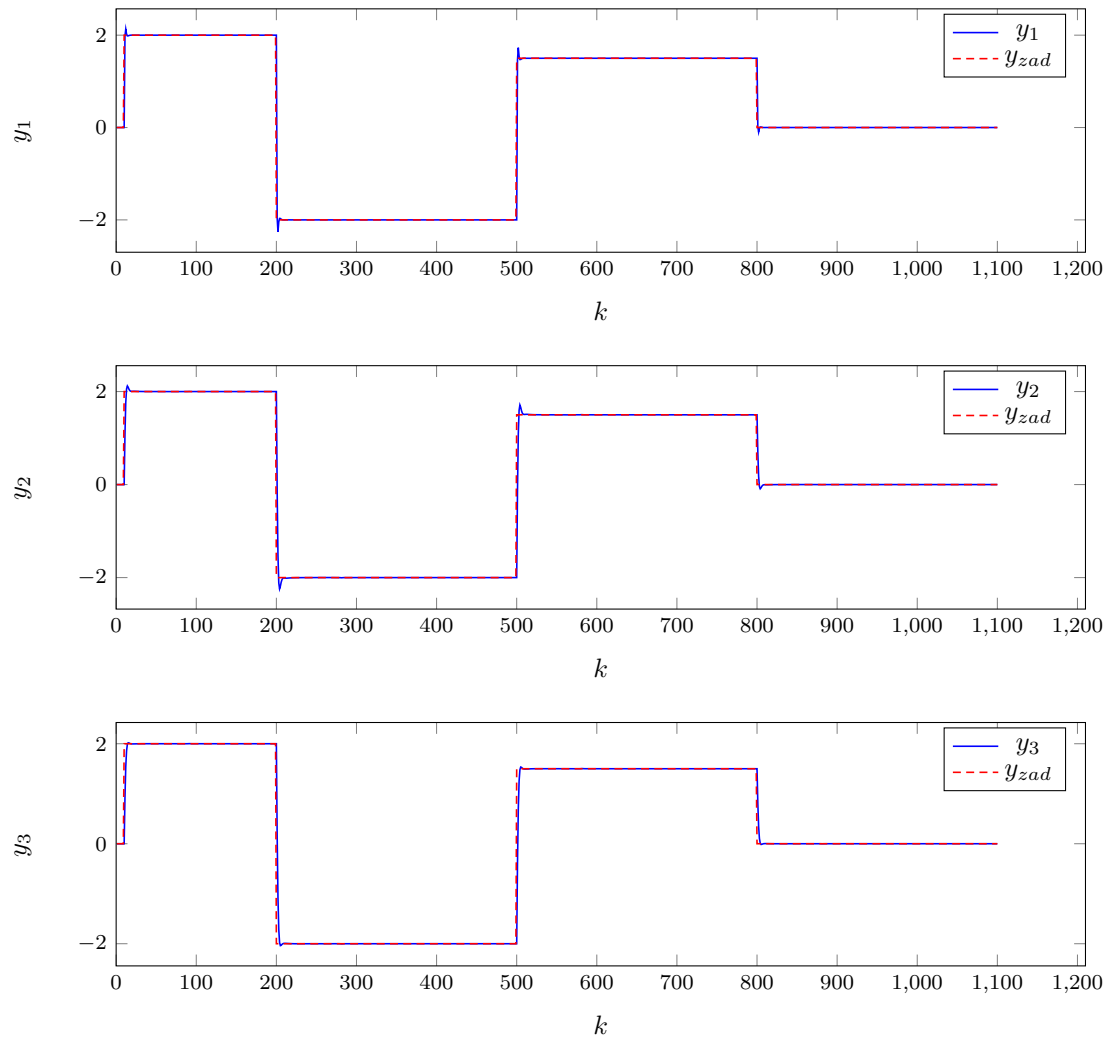
- $E_1 = 34,584$
- $E_2 = 35,2223$
- $E_3 = 10,3634$
- $E = 80,1697$

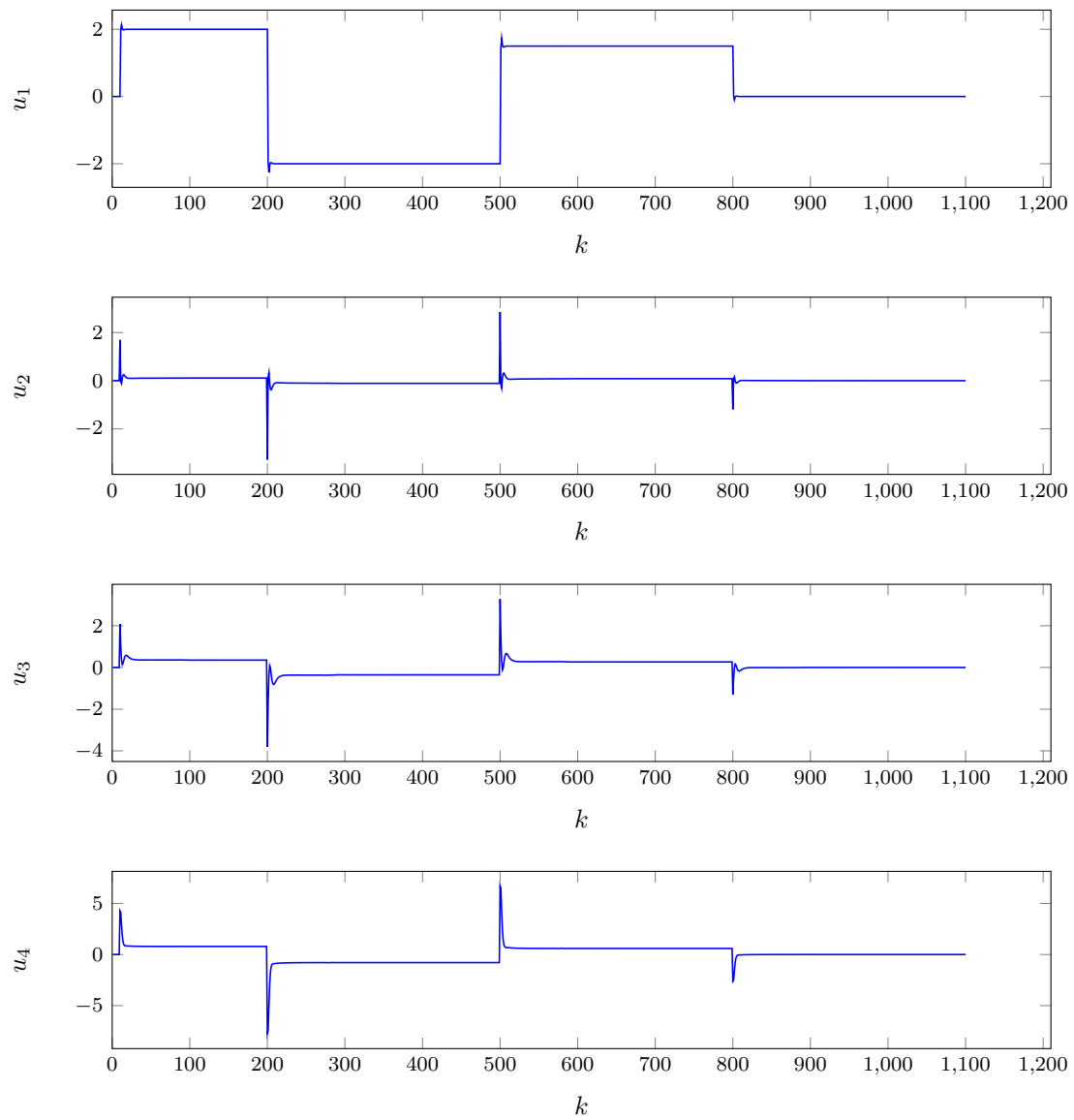
Uznaliśmy jednak, że takie nastawy dają dobry kompromis między jakością regulacji a łagodnym sterowaniem. Przebiegi wyjść obiektu przedstawia wykres 5.11.

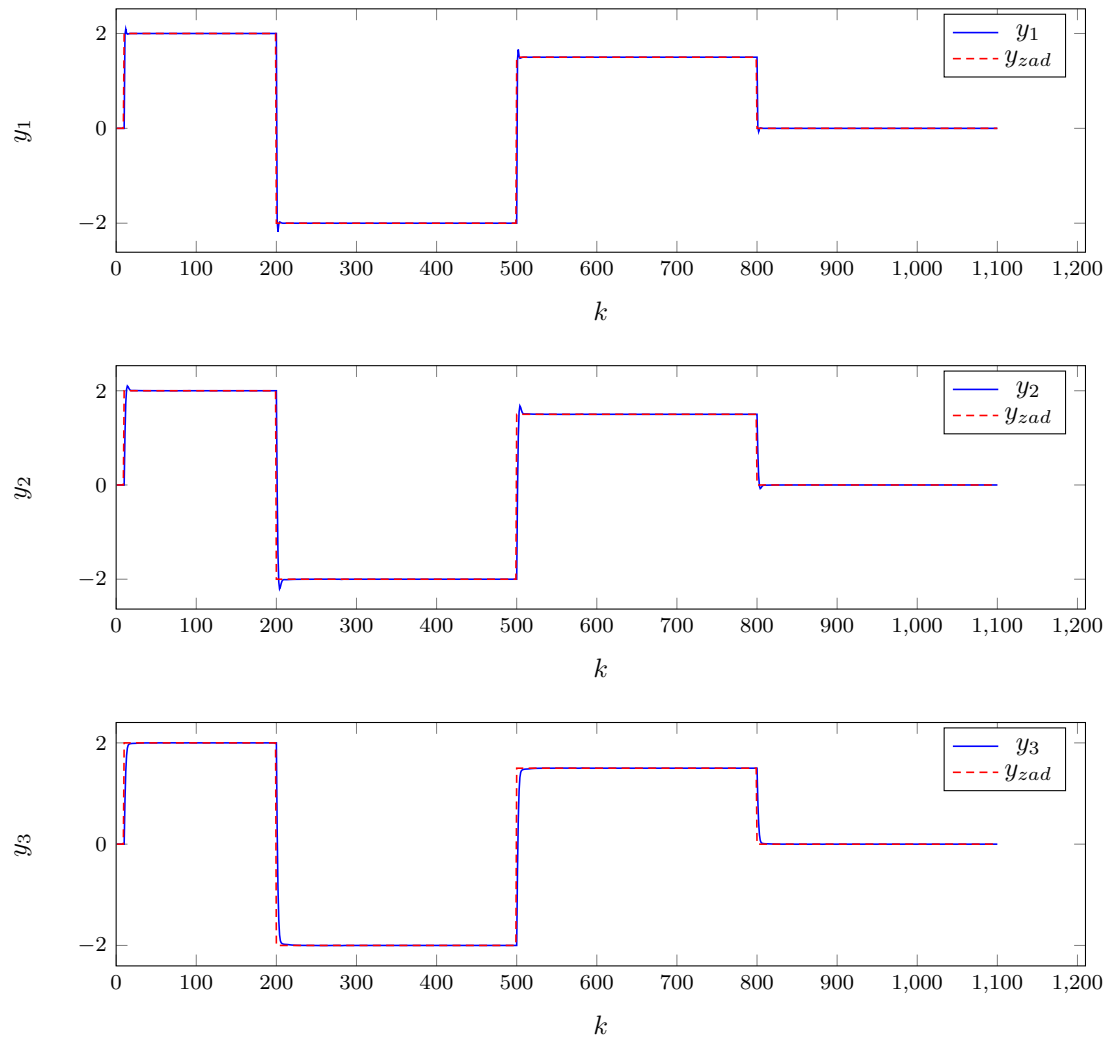
Rys. 5.7. Przebiegi wyjść obiektu dla  $\psi_1 = 0,8$ ,  $\psi_2 = 0,8$ ,  $\psi_3 = 0,8$ .

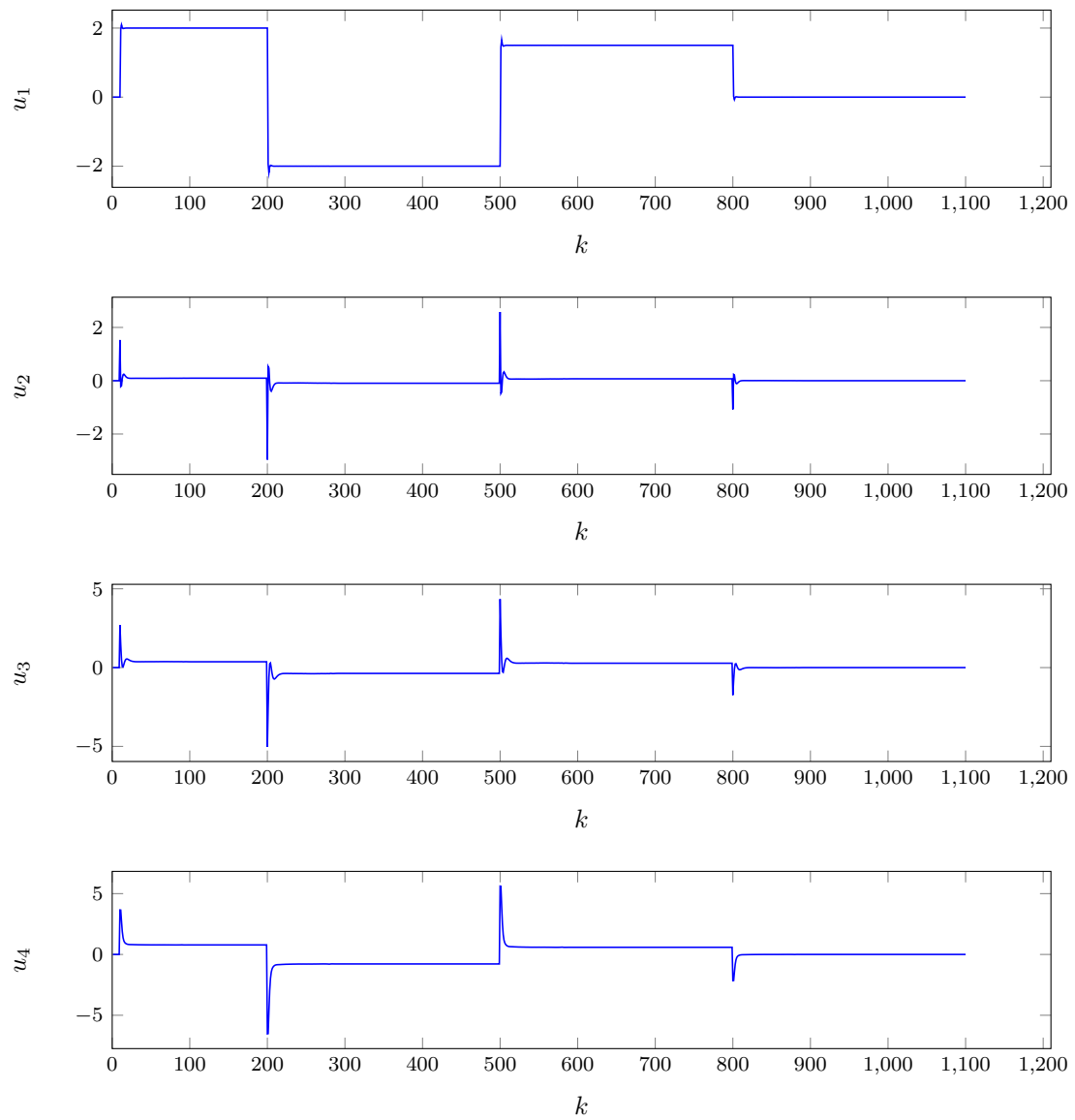


Rys. 5.8. Przebiegi sterowań obiektu dla  $\psi_1 = 0,8$ ,  $\psi_2 = 0,8$ ,  $\psi_3 = 0,8$ .

Rys. 5.9. Przebiegi wyjść obiektu dla  $\psi_1 = 5$ ,  $\psi_2 = 5$ ,  $\psi_3 = 5$ .

Rys. 5.10. Przebiegi sterowań obiektu dla  $\psi_1 = 5$ ,  $\psi_2 = 5$ ,  $\psi_3 = 5$ .

Rys. 5.11. Przebiegi wyjść obiektu dla  $\psi_1 = 6,5$ ,  $\psi_2 = 7$ ,  $\psi_3 = 2$ .

Rys. 5.12. Przebiegi sterowań obiektu dla  $\psi_1 = 6,5$ ,  $\psi_2 = 7$ ,  $\psi_3 = 2$ .