

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

Sprawozdanie z projektu nr 3, zadanie nr 3

Sobolewski Konrad, Róžański Antoni, Giełdowski Daniel

Warszawa, 2017

Spis treści

1. Opis obiektu	2
2. Zadanie 1: Punkt pracy	3
3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe	4
3.1. Odpowiedzi skokowe	4
3.2. Charakterystyka statyczna	5
3.3. Charakterystyka dynamiczna	7
4. Zadanie 3: Znormalizowane odpowiedzi skokowe	8
5. Zadanie 4: Algorytmy PID i DMC	9
5.1. Cyfrowy algorytm PID	9
5.2. Analityczny algorytm DMC	9
6. Zadanie 5: Strojenie regulatora PID i DMC	12
6.1. Regulator PID	12
6.1.1. Wariant pierwszy	12
6.1.2. Wariant drugi	20
6.2. Regulator DMC	28
7. Zadanie 6: Algorytmy przy zaszumionym pomiarze wyjść	33
7.1. PID	33
7.1.1. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,1	33
7.1.2. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2	35
7.1.3. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,5	36
7.1.4. Wnioski	38
7.2. DMC	38
7.2.1. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,1	38
7.2.2. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2	40
7.2.3. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,5	41
7.2.4. Wnioski	42

1. Opis obiektu

Obiekt dwuwymiarowy używany w projekcie opisany jest danymi przez prowadzącego funkcjami:

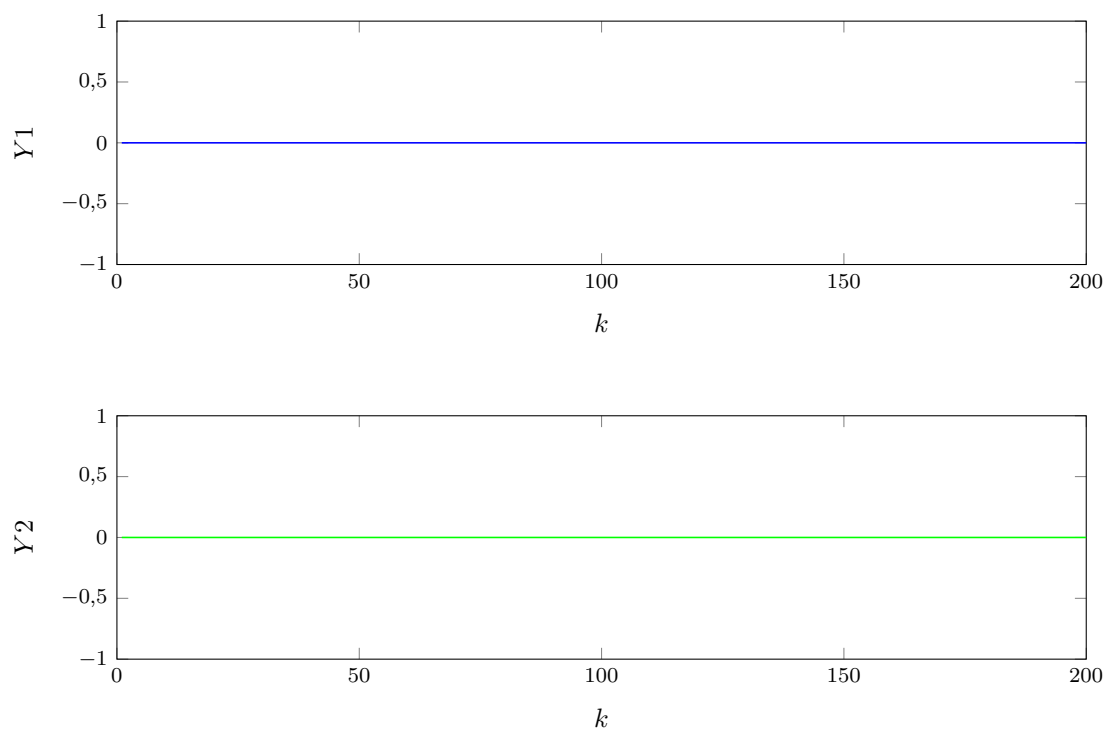
$$Y1(k) = \text{symulacja_obektu3y1}(U1(k-5), U1(k-6), U2(k-2), U2(k-3), Y1(k-1), Y1(k-2)) \quad (1.1)$$

$$Y2(k) = \text{symulacja_obektu3y2}(U1(k-6), U1(k-7), U2(k-4), U2(k-5), Y2(k-1), Y2(k-2)) \quad (1.2)$$

gdzie k jest aktualną chwilą symulacji sygnału próbkowanego. Wartość sygnałów w punkcie pracy (w stanie ustalonym) mają wartość $u = y = z = 0$. Okres próbkowania obiektu wynosi $T_p = 0,5s$.

2. Zadanie 1: Punkt pracy

Pierwszym poleceniem było zweryfikowanie poprawności punktu pracy obiektu. Udało się to osiągnąć za pomocą prostego sprawdzenia, przy jakiej wartości wyjścia stabilizuje się obiekt przy stałych sterowaniach, równym ich wartościom w punkcie pracy ($U1_{pp} = 0$, $U2_{pp} = 0$). Eksperyment potwierdził wcześniej podaną wartość wyjścia ($Y_{pp} = 0$), a jego przebieg obrazuje wykres 2.1.

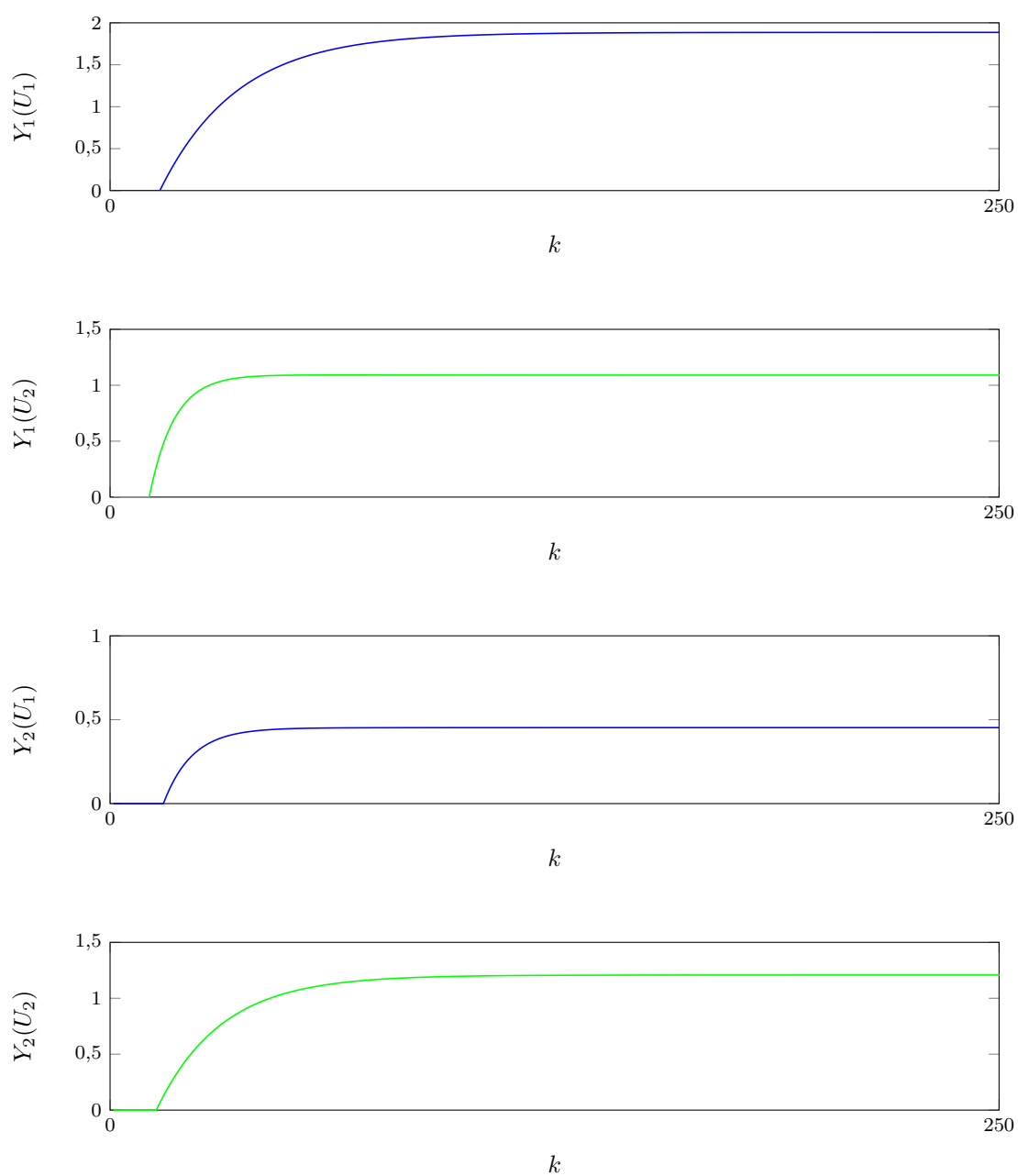


Rys. 2.1. Zachowanie obiektu w punkcie pracy

3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe

3.1. Odpowiedzi skokowe

W tej części projektu należało wyznaczyć symulacyjnie odpowiedzi skokowe dla wszystkich czterech torów (rys. 3.1). Eksperyment zakładał, iż obiekt będzie na początku w punkcie pracy, a następnie w chwili $k = 10$ zostanie wykonany skok jednostkowy.

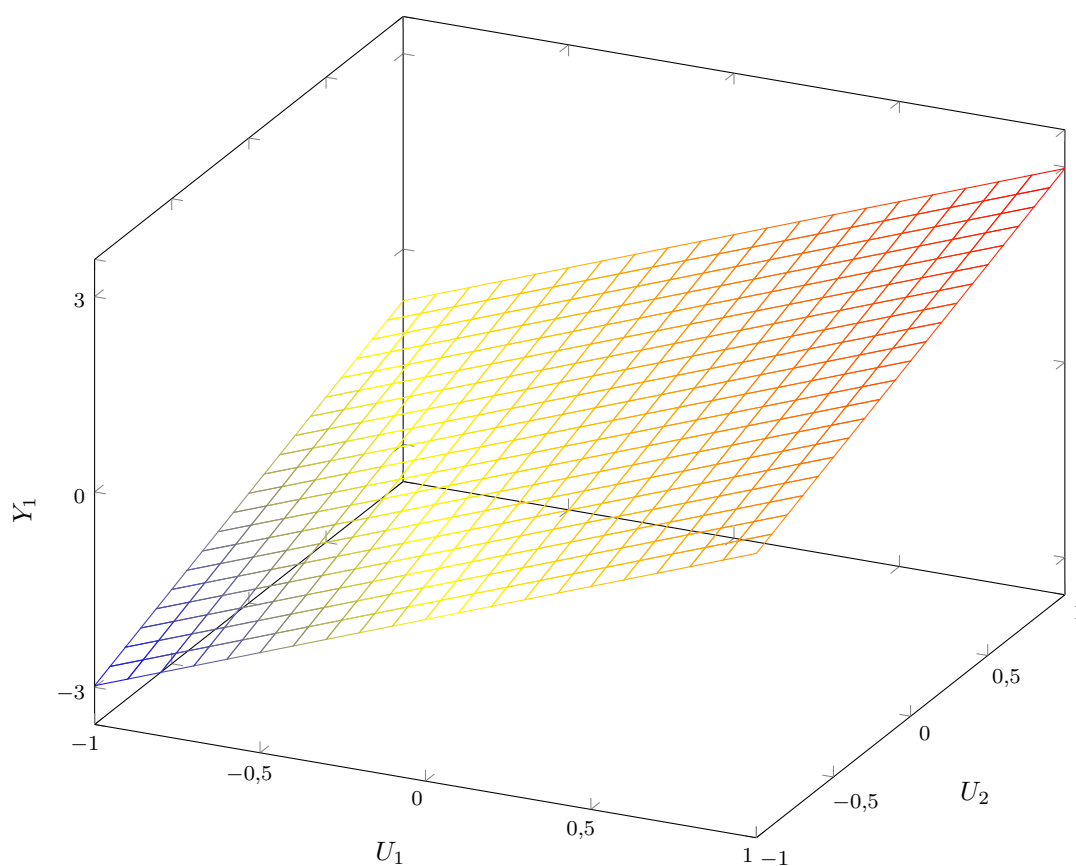


Rys. 3.1. Odpowiedzi skokowe

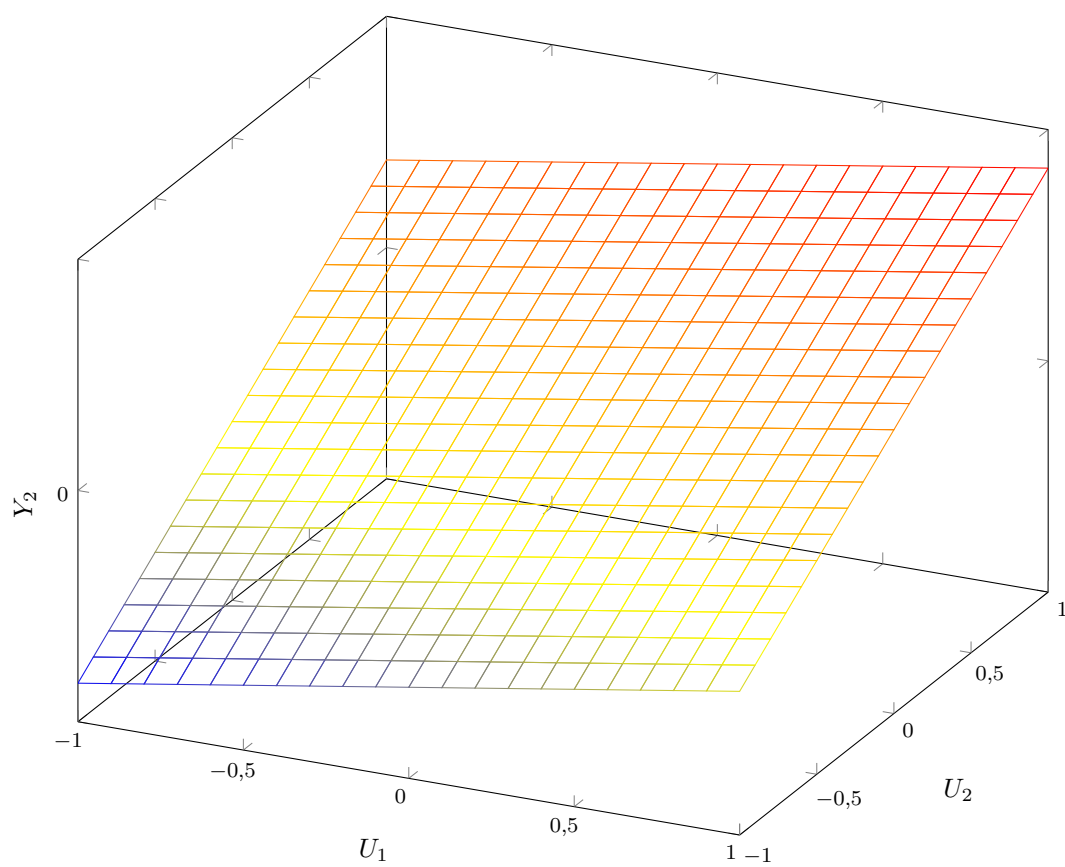
3.2. Charakterystyka statyczna

Poniżej została zaprezentowana charakterystyka statyczna dla procesu $y_1(u_1, u_2)$ (rys. 3.2) oraz $y_2(u_1, u_2)$ (rys. 3.3). Na podstawie zawartych wykresów można wywnioskować, że właściwości statyczne procesu są liniowe. Wzmocnienia statyczne są równe wartościom końcowych odpowiedzi skokowych i wynoszą odpowiednio:

- $\text{Tor } Y_1(U_1) = 1,8857$
- $\text{Tor } Y_1(U_2) = 0,4258$
- $\text{Tor } Y_2(U_1) = 1,0905$
- $\text{Tor } Y_2(U_2) = 1,2076$



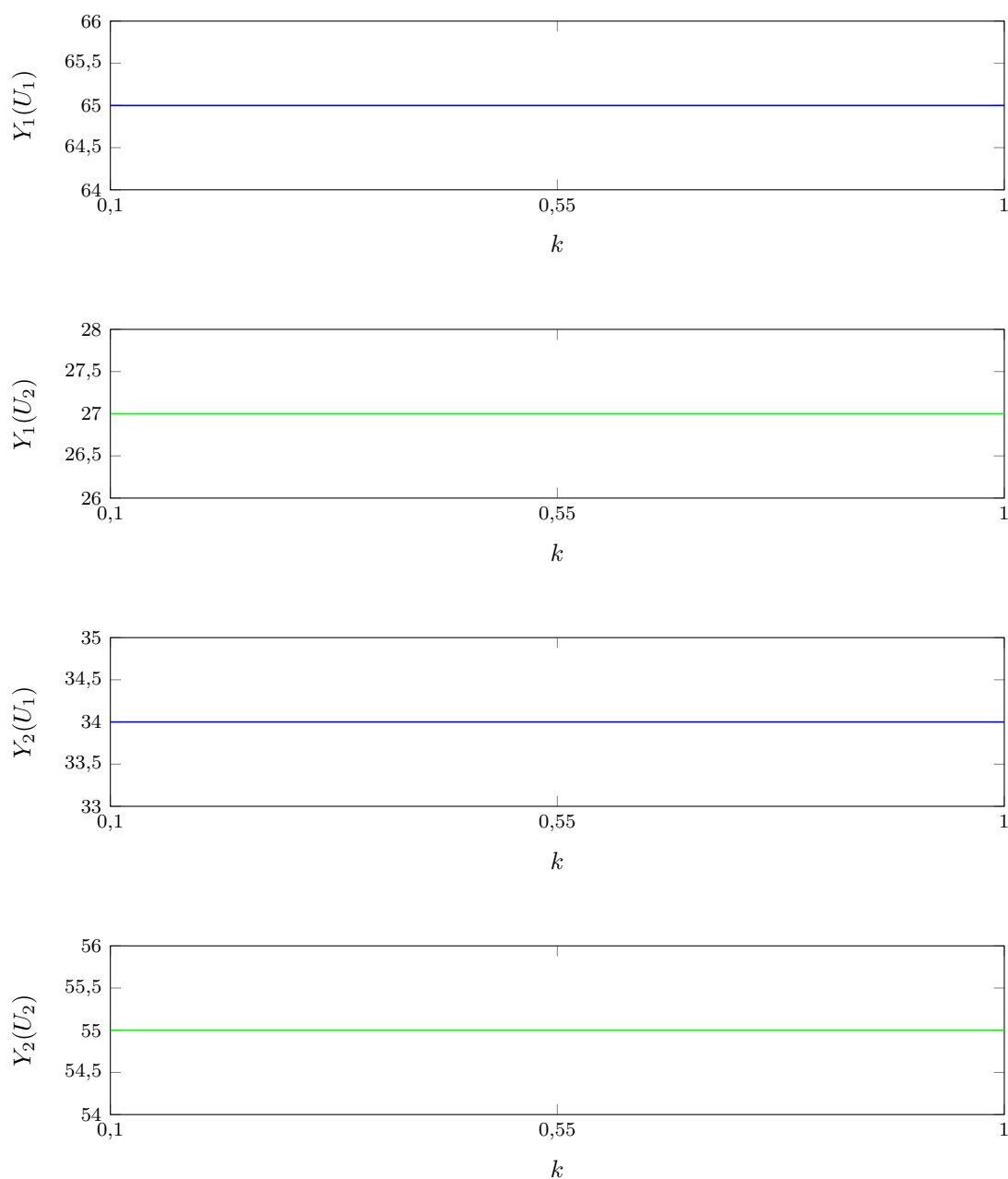
Rys. 3.2. $y_1(u_1, u_2)$

Rys. 3.3. $y_2(u_1, u_2)$

3.3. Charakterystyka dynamiczna

Charakterystyka dynamiczna została wyznaczona zależnie od wielkości skoku sterowania. Zmierzone zostało, po ilu krokach od momentu skoku różnica wartości wyjść obiektu i punktu pracy Y_{pp} wynosiła powyżej 90% całkowitego skoku wartości wyjść obiektu $Y(k)$. Z otrzymanych danych wynika, że charakterystyka dynamiczna jest liniowa, gdzie ilość kroków była następująca (rys. 3.4):

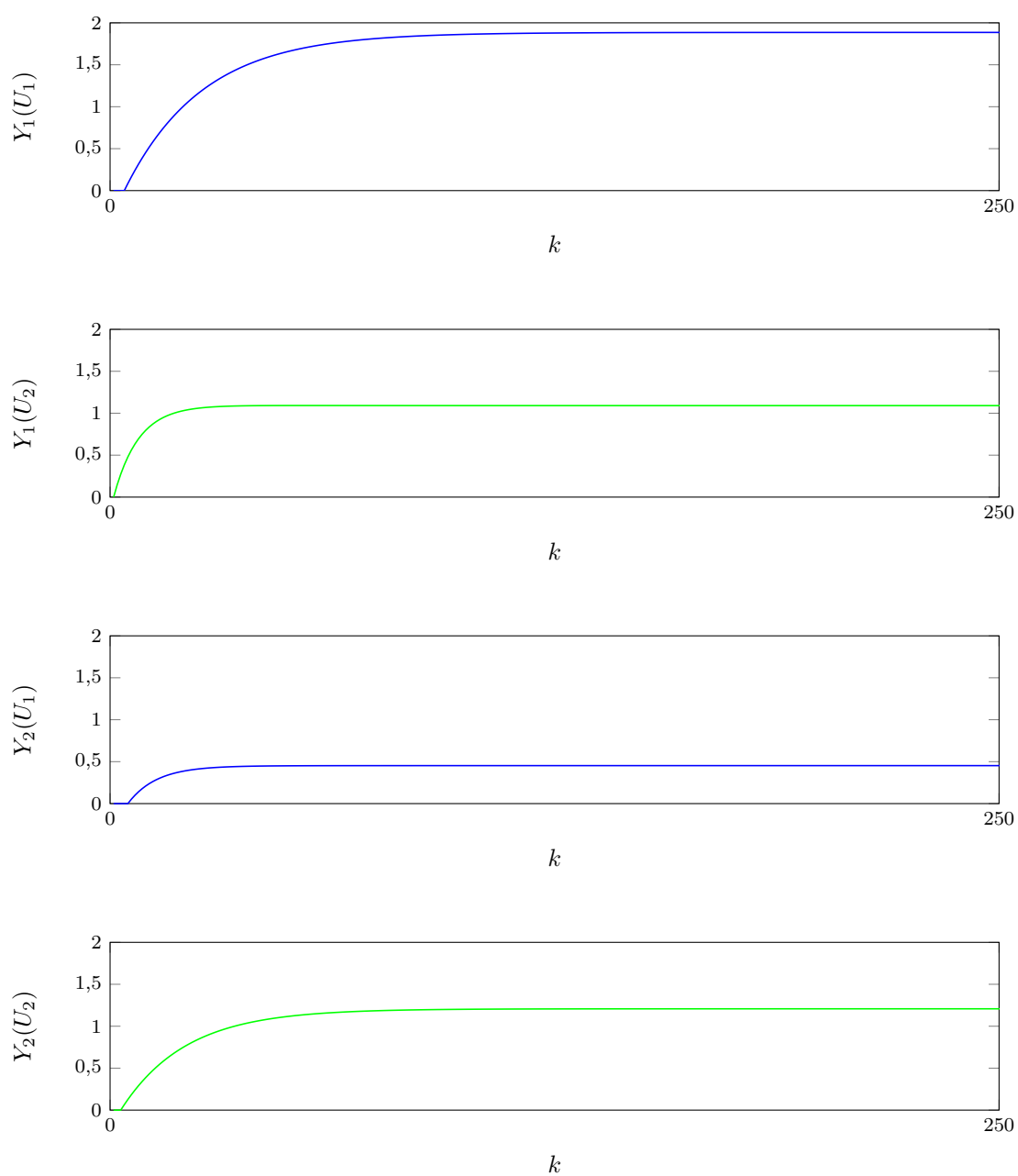
- Tor $Y_1(U_1) = 65$ kroków,
- Tor $Y_1(U_2) = 27$ kroków,
- Tor $Y_2(U_1) = 34$ kroków,
- Tor $Y_2(U_2) = 55$ kroków.



Rys. 3.4. Charakterystyka dynamiczna

4. Zadanie 3: Znormalizowane odpowiedzi skokowe

Przedstawione odpowiedzi skokowe na rys. 4.1 zostały wykonane przez wykonanie skoku jednostkowego na wszystkich torach oraz obcięcie pierwszych 10 próbek, gdyż zmiana sterowania odbywała się w 10 kroku. Z tego wynika, że wykresy startują od chwili $k = 11$.



Rys. 4.1. Znormalizowane odpowiedzi skokowe

5. Zadanie 4: Algorytmy PID i DMC

5.1. 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.

$$r_0^j = K^j * (1 + T_p/(2 * T_i^j) + T_d^j/T_p) \quad \forall j \in \langle 1, n_u \rangle \quad (5.1)$$

$$r_1^j = K^j * (T_p/(2 * T_i^j) - 2 * T_d^j/T_p - 1) \quad \forall j \in \langle 1, n_u \rangle \quad (5.2)$$

$$r_2^j = K * T_d^j/T_p \quad \forall j \in \langle 1, n_u \rangle \quad (5.3)$$

W każdej iteracji pętli sterowania są obliczane uchyby wyjść obiektu.

$$e(k)^j = Y^{\text{zad}}(k)^j - Y(k)^j \quad \forall j \in \langle 1, n_y \rangle \quad (5.4)$$

Sterowania regulatora zostają wyliczone na bieżącą chwilę przy użyciu wzoru:

$$U(k)^j = r_2^j * e(k-2)^i + r_1^j * e(k-1)^i + r_0^j * e(k)^i + U(k-1)^j \quad \text{gdzie} \quad j \in \langle 1, n_u \rangle, \quad i \in \langle 1, n_y \rangle \quad (5.5)$$

5.2. Analityczny algorytm DMC

Do obliczeń wykorzystujemy następujące wzory:

$$\mathbf{y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{\text{zad}}(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix}_{n_y \times 1} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ \vdots \\ y_{n_y}(k) \end{bmatrix}_{n_y \times 1} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_{n_u}(k) \end{bmatrix}_{n_u \times 1} \quad (5.8)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \vdots \\ \Delta u_{n_u}(k) \end{bmatrix}_{n_u \times 1} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y^{\text{zad}}(k|k) \\ \vdots \\ y^{\text{zad}}(k|k) \end{bmatrix}_{N \times n_y \times 1} \quad (5.10)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u_{n_u}(k + N_u - 1|k) \end{bmatrix}_{N \times n_y \times 1} \quad (5.11)$$

$$\Delta \mathbf{U}^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k - (D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times n_u \times 1} \quad (5.12)$$

$$\mathbf{S}_l = \begin{bmatrix} s_l^{11} & s_l^{12} & \dots & s_l^{1n_u} \\ s_l^{21} & s_l^{22} & \dots & s_l^{2n_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_l^{n_y 1} & s_l^{n_y 2} & \dots & s_l^{n_y n_u} \end{bmatrix}_{n_y \times n_u}, l = 1, \dots, D. \quad (5.13)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & S_{N-1} & \dots & S_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times (N_u \times n_u)} \quad (5.14)$$

$$\mathbf{M}^P = \begin{bmatrix} S_2 - S_1 & S_3 - S_2 & \dots & S_D - S_{D-1} \\ S_3 - S_1 & S_4 - S_2 & \dots & S_{D+1} - S_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N+1} - S_1 & S_{N+2} - S_2 & \dots & S_{N+D-1} - S_{D-1} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times ((D-1) \times n_u)} \quad (5.15)$$

$$\mathbf{Y}^0(k) = \mathbf{Y}(k) + \mathbf{M}^P \Delta \mathbf{U}^P(k) \quad (5.16)$$

$$\mathbf{K} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda * \mathbf{I})^{-1} \mathbf{M}^T \quad (5.17)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \mathbf{K}(\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) - \mathbf{Y}^0(k)) \quad (5.18)$$

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

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - k_u \Delta \mathbf{U}^P \quad (5.19)$$

gdzie:

$$e(k) = y^{\text{zad}}(k) - y(k) \quad (5.20)$$

Ponieważ nasze $n_u = 2$ i $n_y = 2$ to:

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} k_e^1 & k_e^2 \\ k_e^3 & k_e^4 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Dla nieparzystych j k_e^j to suma nieparzystych elementów $(j+1)/2$ -tego wiersza macierzy \mathbf{K} . Dla parzystych j k_e^j to suma parzystych elementów $j/2$ -tego wiersza macierzy \mathbf{K} .

$$k_u = kM^P \quad (5.22)$$

k to oznaczenie macierzy będącej n_u początkowymi wierszami macierzy K (u nas 2 pierwsze wiersze). Aktualne sterowanie otrzymujemy poprzez zsumowanie poprzedniego sterowania i aktualnie wyliczonego $\Delta u(k|k)$.

6. Zadanie 5: Strojenie regulatora PID i DMC

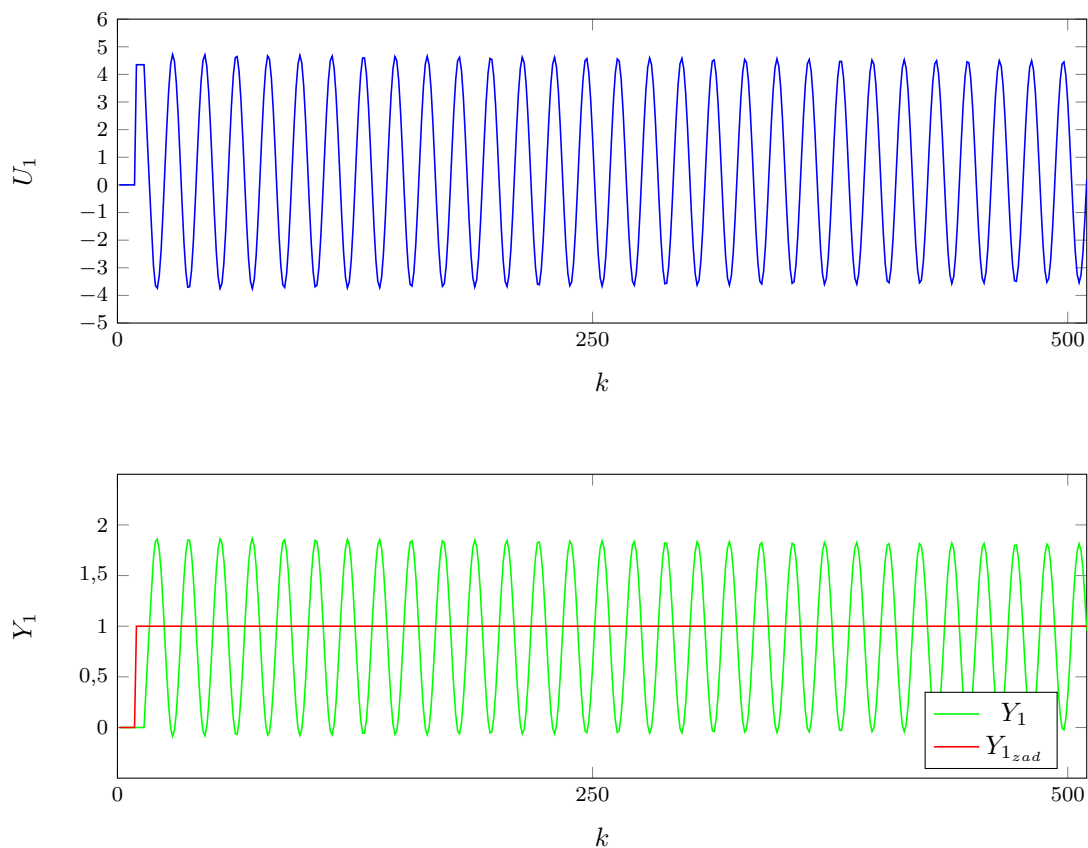
6.1. Regulator PID

6.1.1. Wariant pierwszy

Pierwszy wariant obejmuje oddziaływanie uchybu pierwszego wyjścia na pierwszy sygnał sterujący oraz drugiego wyjścia na drugi sygnał sterujący.

Pierwszym krokiem strojenia regulatora jest wyłączenie jednego z regulatorów i następnie dobranie parametrów drugiego regulatora. Po uzyskaniu zadawalających wyników analogicznie postępuje z drugim regulatorem. Po oddzielnym dostrojeniu obu regulatorów możemy uruchomić je jednocześnie i dokonać ewentualnych poprawek nastaw w celu poprawy przebiegów. W trakcie strojenia obu regulatorów została wykorzystana metoda inżynierska.

Rozpoczęcie strojenia pierwszego regulatora P_1 rozpoczęliśmy od wprowadzenia go w niegasnące oscylacje (rys. 6.1). Efekt ten został uzyskany dla wzmocnienia o wartości $K_{k1} = 4,35$.

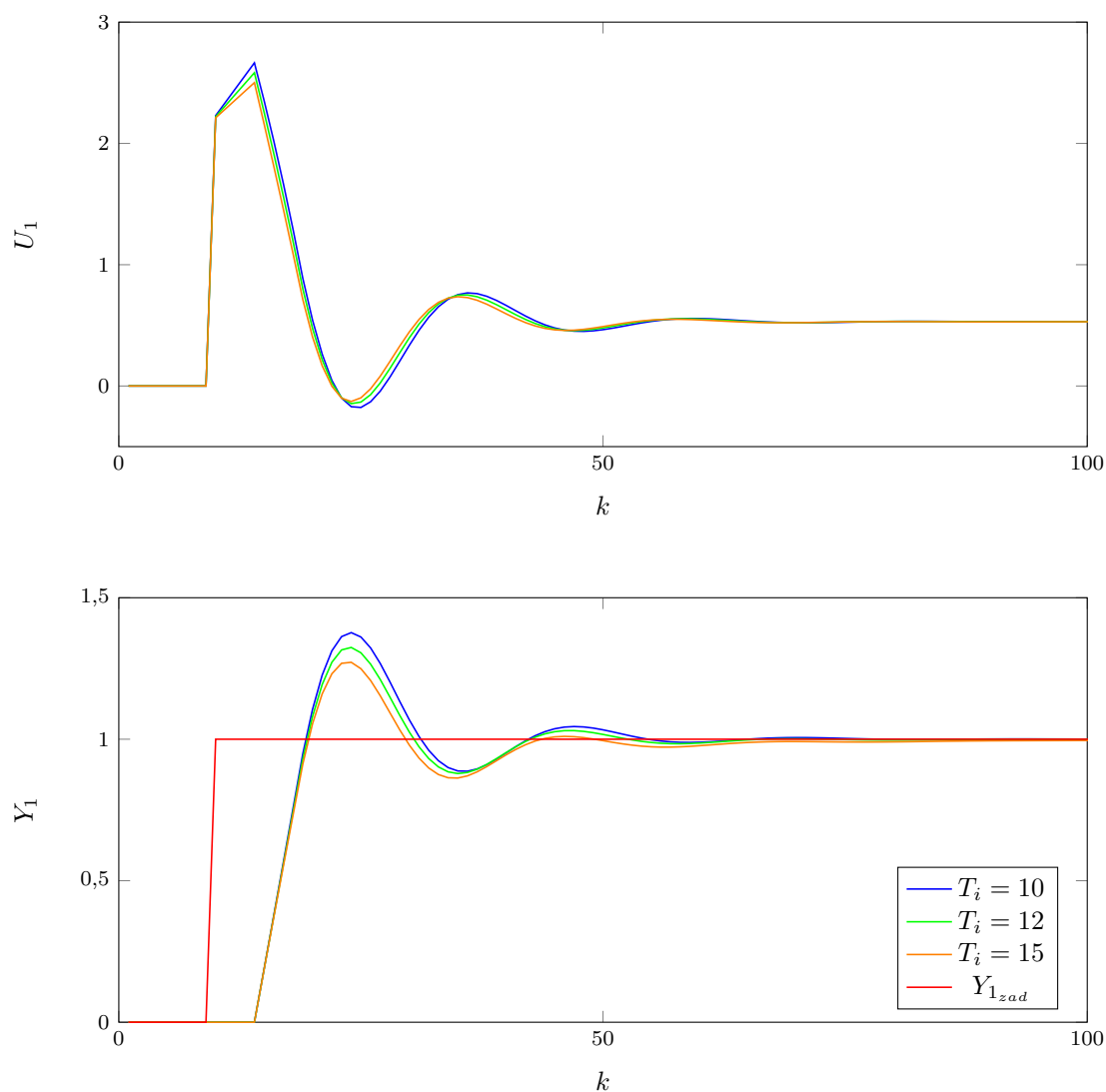


Rys. 6.1. Regulator P_1 z niegasącymi oscylacjami

Następny krok polegał na doborze parametru PI_1 (rys. 6.2). Przy wzmacnieniu $K_1 = 0,5K_{k1}$ przeprowadziliśmy szereg testów i z pośród zilustrowanych poniżej wartości wybraliśmy $T_{i1} = 12$ jako najlepszy wynik. Można zauważyć, że przebieg wyjścia dla wspomnianego parametru charakteryzuje się najlepszym czasem regulacji przy stosunkowo niskim przeregulowaniu. Biorąc pod uwagę wartość błędów :

- $T_i = 10 = 168,88$,
- $T_i = 12 = 168,41$,
- $T_i = 15 = 167,98$,

zauważamy, że różnice między nimi są bardzo małe. Z tego powodu głównym aspektem wyboru była ocena jakościowa przebiegu.



Rys. 6.2. Strojenie regulatora PI_1

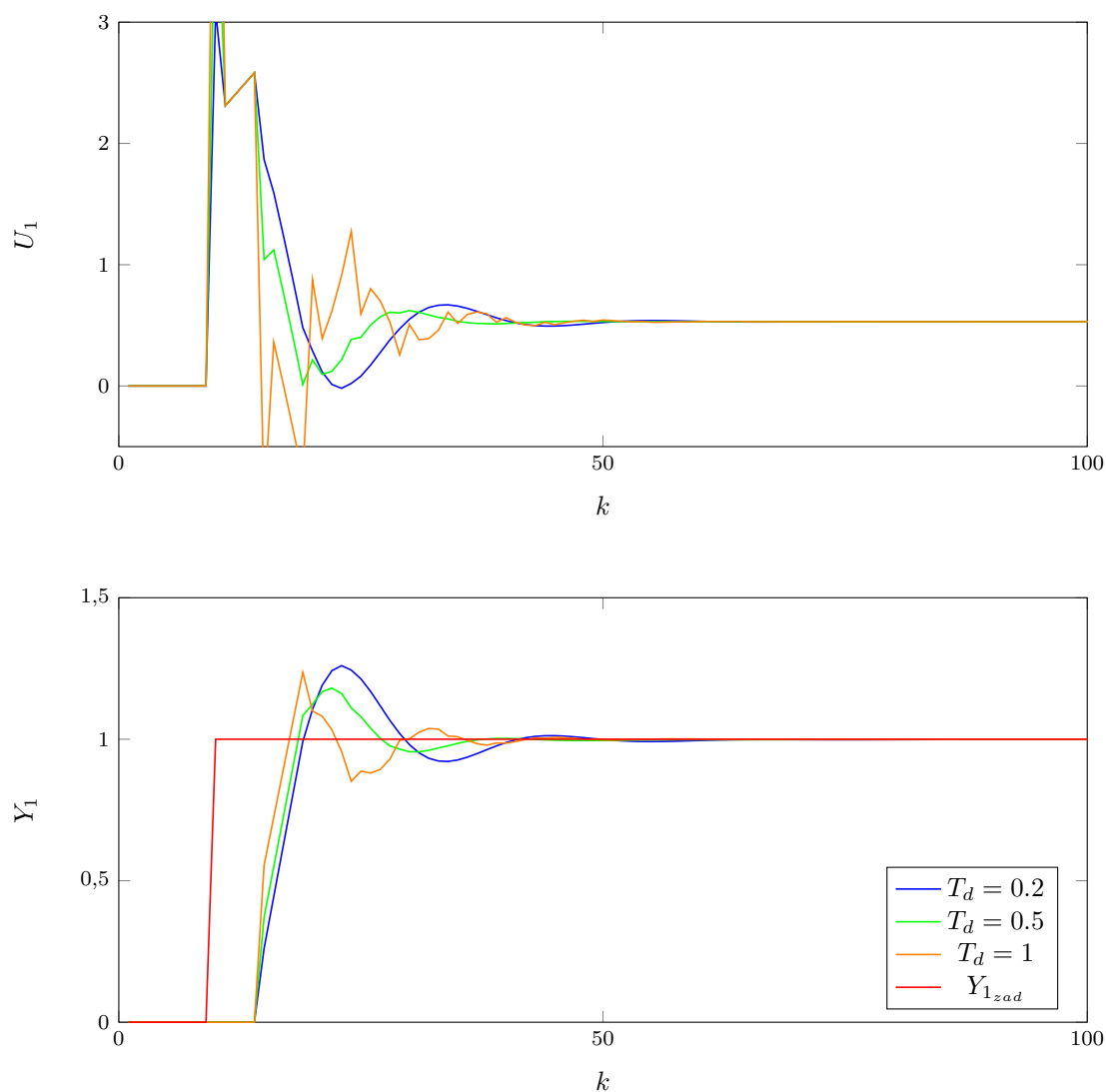
W kolejnym kroku został dobrany parametr T_{d1} regulatora PID_1 . Z pośród zaprezentowanych wartości na rys. 6.3, najlepszy przebieg, tj.. o dobrym czasie regulacji, najniższym przeregulowaniu oraz zadawalającej płynności regulacji uzyskaliśmy dla wartości $T_{d1} = 0,5$. Wartości błędów :

- $T_d = 0,2 = 6.39$,
- $T_d = 0,5 = 5.81$,
- $T_d = 1 = 5.43$,

Mimo że z oceny ilościowej wynika najmniejsza wartość błędu dla $T_{d1} = 1$, postanowiliśmy pozostać przy wartości $T_{d1} = 0,5$, gdyż ma zauważalnie lepsze przebiegi.

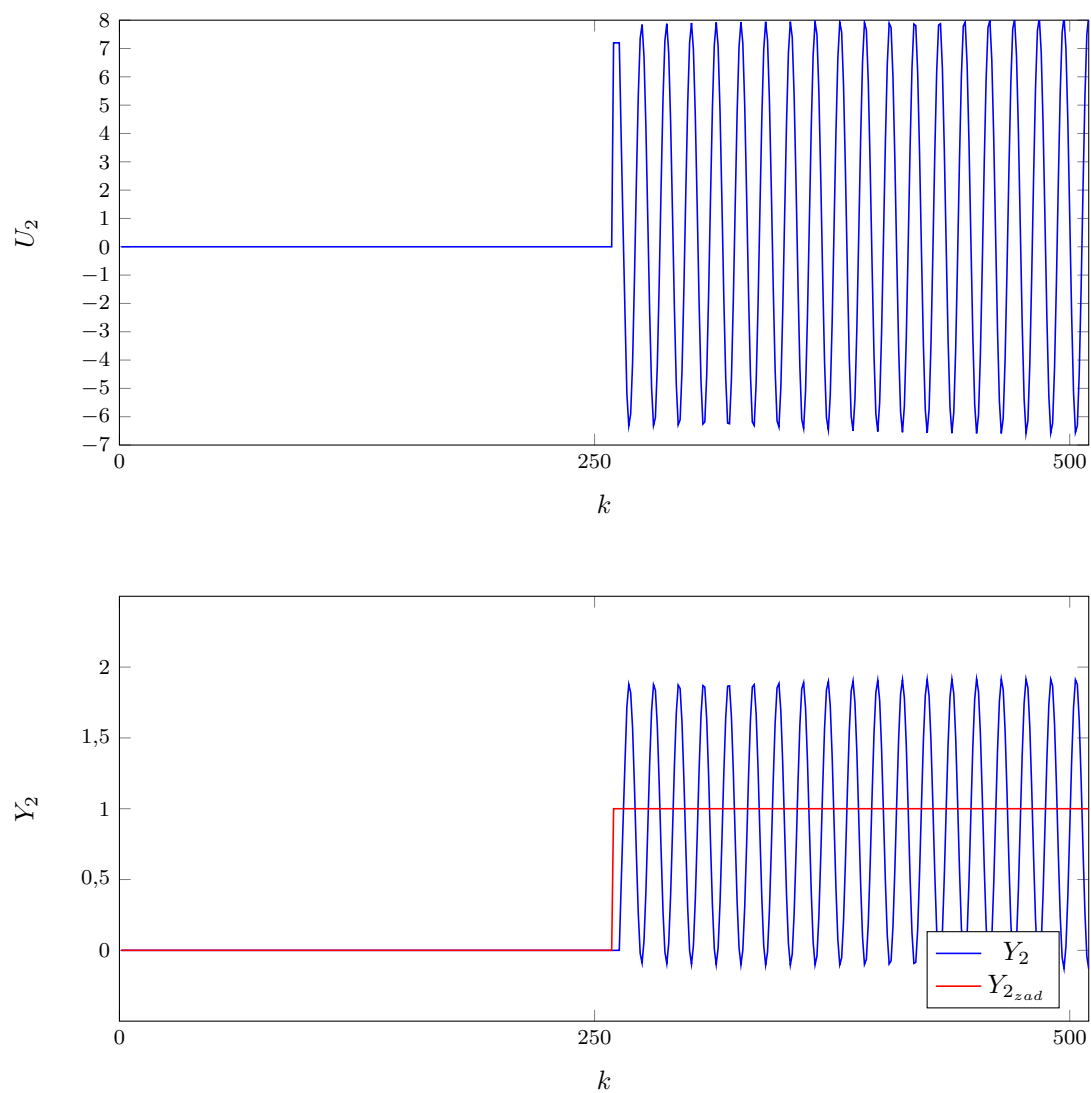
Nastawy pierwszego toru wyjścia regulatora PID_1 :

$$K = 2,175, T_i = 12, T_d = 0,5$$



Rys. 6.3. Strojenie regulatora PID_1

Na tym etapie regulator pierwszy, który ma już dobrane nastawy, został wyłączony i przeszliśmy do strojenia drugiego regulatora. W tym celu wprowadziliśmy regulator P_2 w niegasnące oscylacje (otrzymaliśmy je dla $K_{k_2} = 7, 2$).

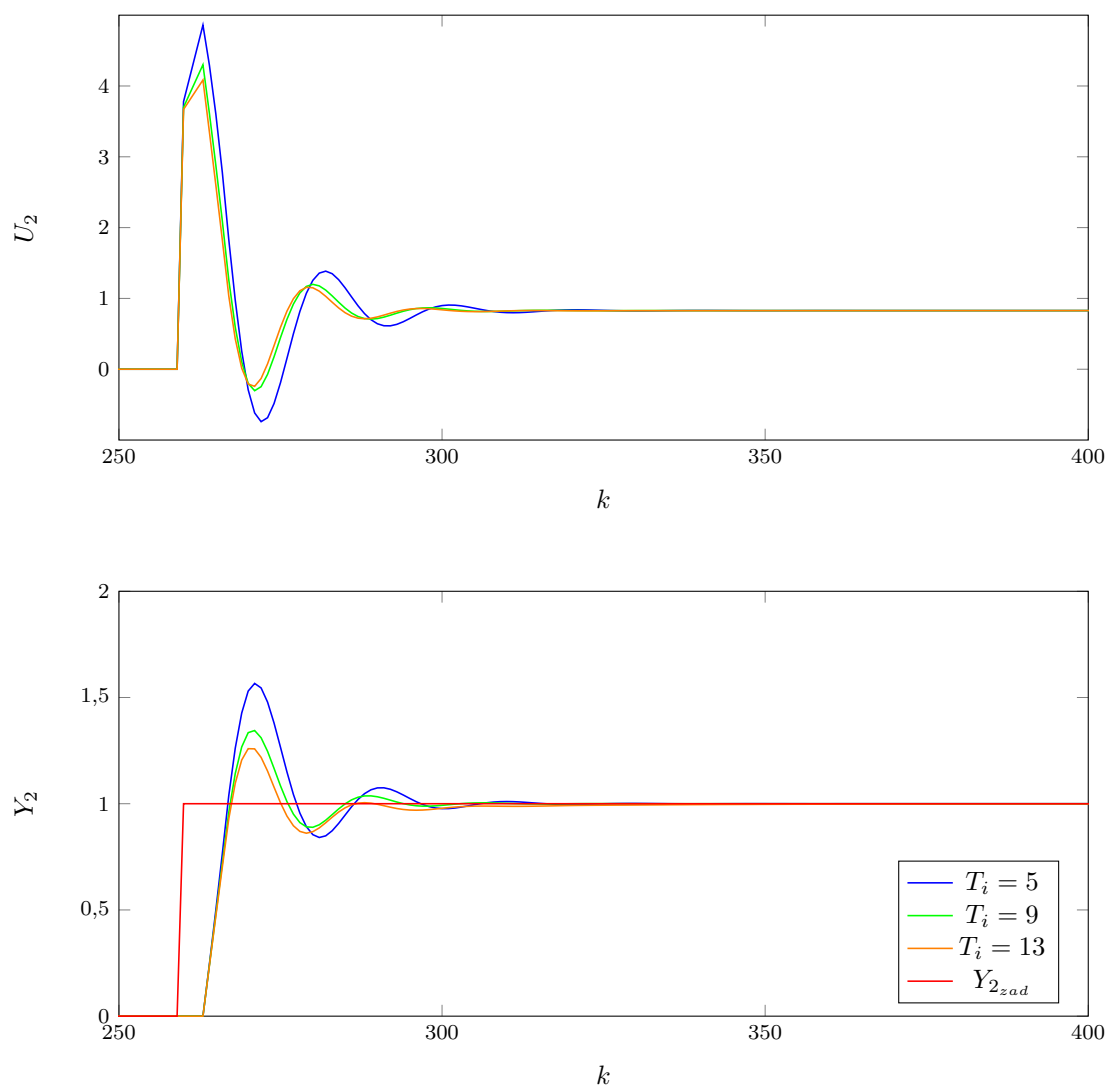


Rys. 6.4. Regulator P_2 z niegasnącymi oscylacjami

W następnym kroku przeprowadziliśmy dobranie parametrów regulatora PI_2 (rys. 6.5). Przy wzmacnieniu $K_2 = 0,5K_{k_2}$ przeprowadziliśmy szereg testów i z pośród zilustrowanych poniżej wartości wybraliśmy $T_{i_2} = 9$ jako najlepszy wynik. Można zauważyć, że przebieg wyjścia dla wspomnianego parametru charakteryzuje się najlepszym czasem regulacji przy stosunkowo niskim przeregulowaniu. Biorąc pod uwagę wartość błędów :

- $T_i = 5 = 271.40$,
- $T_i = 9 = 263.90$,
- $T_i = 12 = 261.87$,

zauważamy, że najmniejszy wskaźnik jakości uzyskaliśmy dla $T_{i_2} = 12$. Mając jednak na względzie kształt sygnałów, pozostaliśmy przy wartości $T_{i_2} = 9$.



Rys. 6.5. Strojenie regulatora PI_2

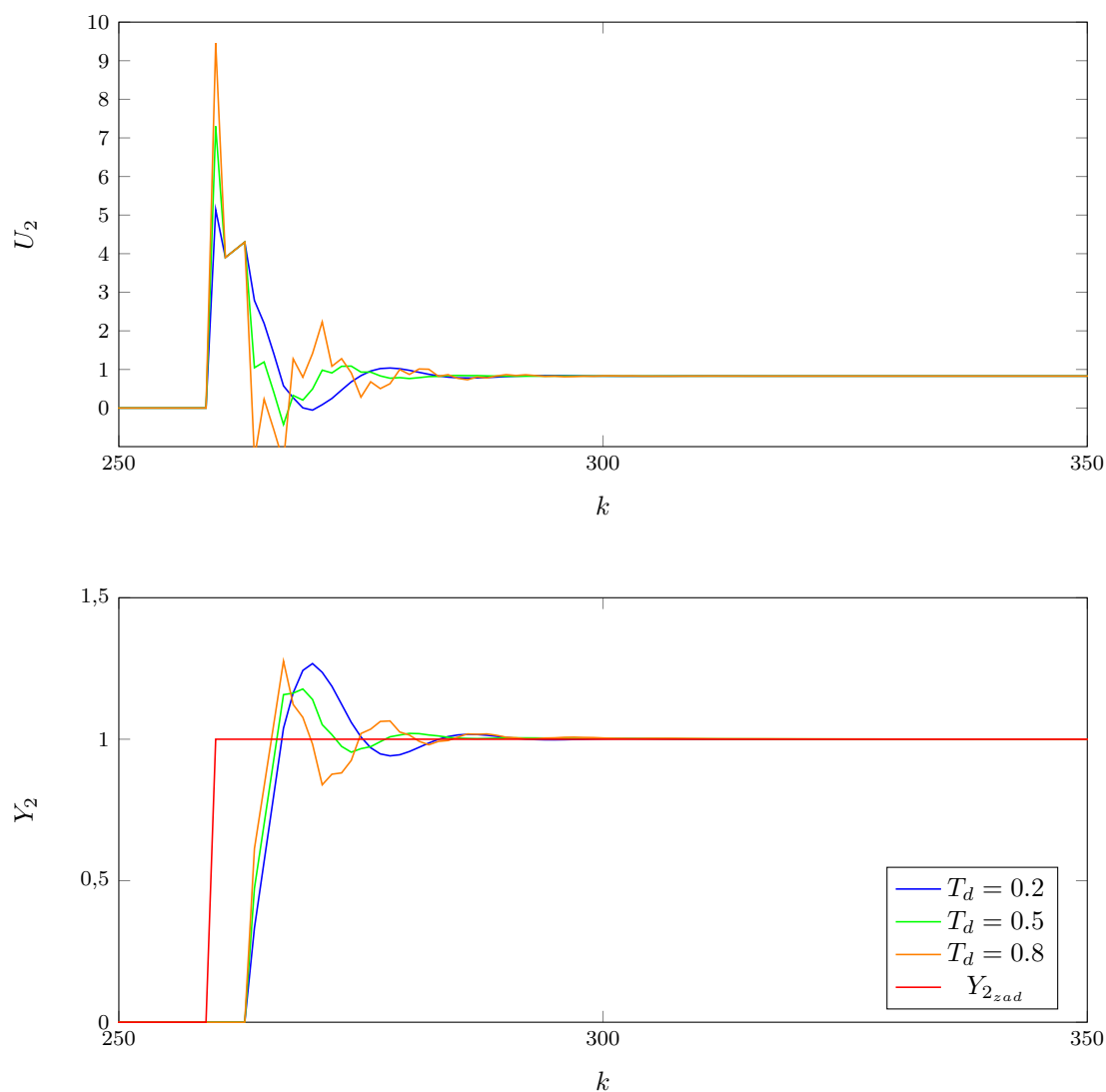
W kolejnym kroku został dobrany parametr T_{d2} regulatora PID_2 . Spośród zaprezentowanych wartości na rys. 6.6, najlepszy przebieg, tj.. charakteryzujący się dobrym czasem regulacji, najniższym przeregulowaniem oraz zadowalającą płynnością regulacji uzyskaliśmy dla wartości $T_{d2} = 0,5$. Wartości błędów :

- $T_d = 0,2 = 4.95$,
- $T_d = 0,5 = 4.48$,
- $T_d = 0,8 = 4.35$,

Mimo że z oceny ilościowej wynika najmniejsza wartość błędu dla $T_{d2} = 0,8$ postanowiliśmy pozostać przy wartości $T_{d2} = 0,5$, gdyż różnice w błędzie są niewielkie, a przebiegi różnią się diametralnie.

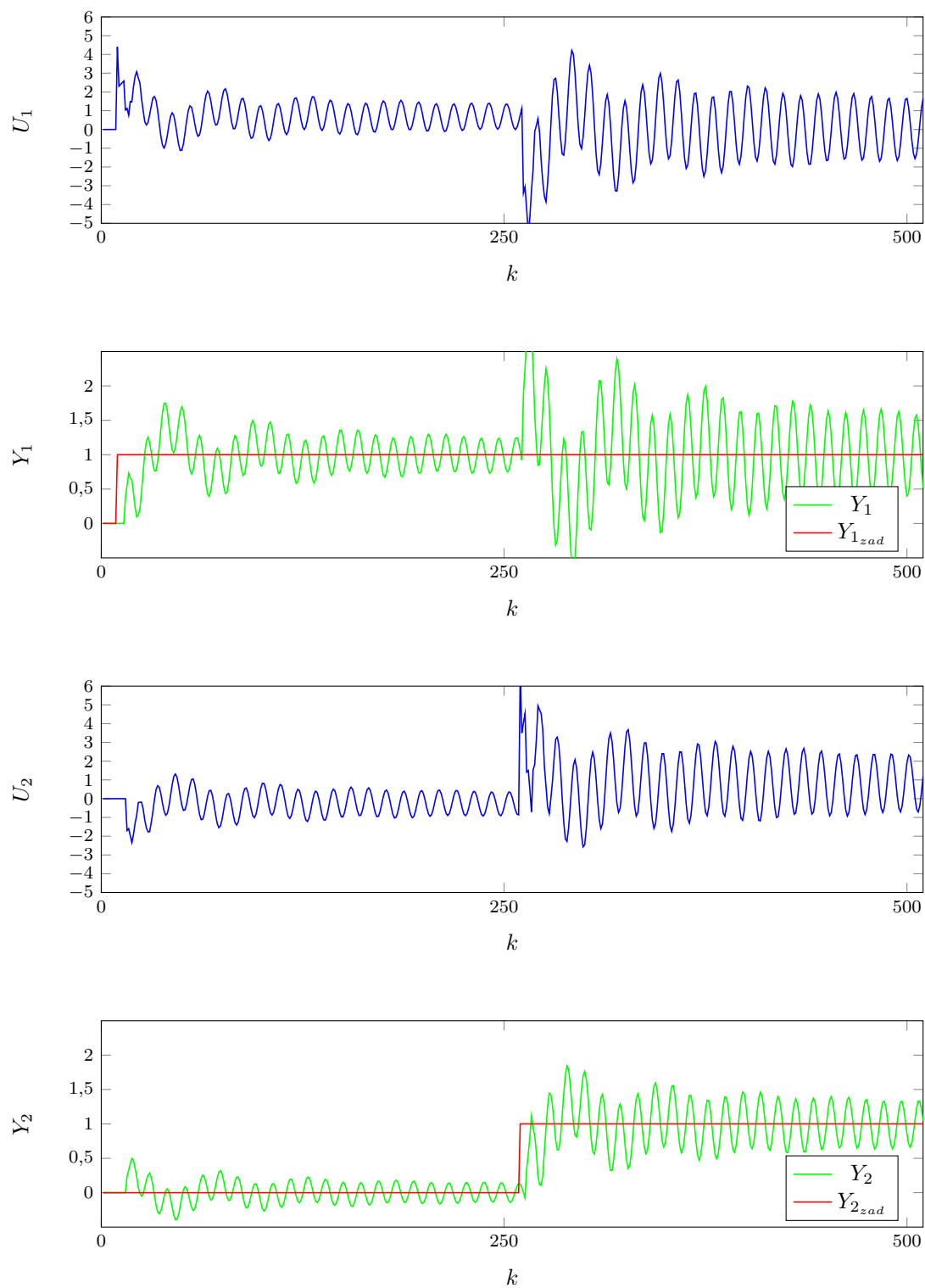
Nastawy drugiego toru wyjścia regulatora PID_2 :

$$K = 3,6, T_i = 9, T_d = 0,5$$



Rys. 6.6. Strojenie regulatora PID_2

Po jednoczesnym uruchomieniu obu dostrojonych regulatorów *PID* zauważamy stałe oscylacje w okolicach wartości zadanych - rys. 6.7.

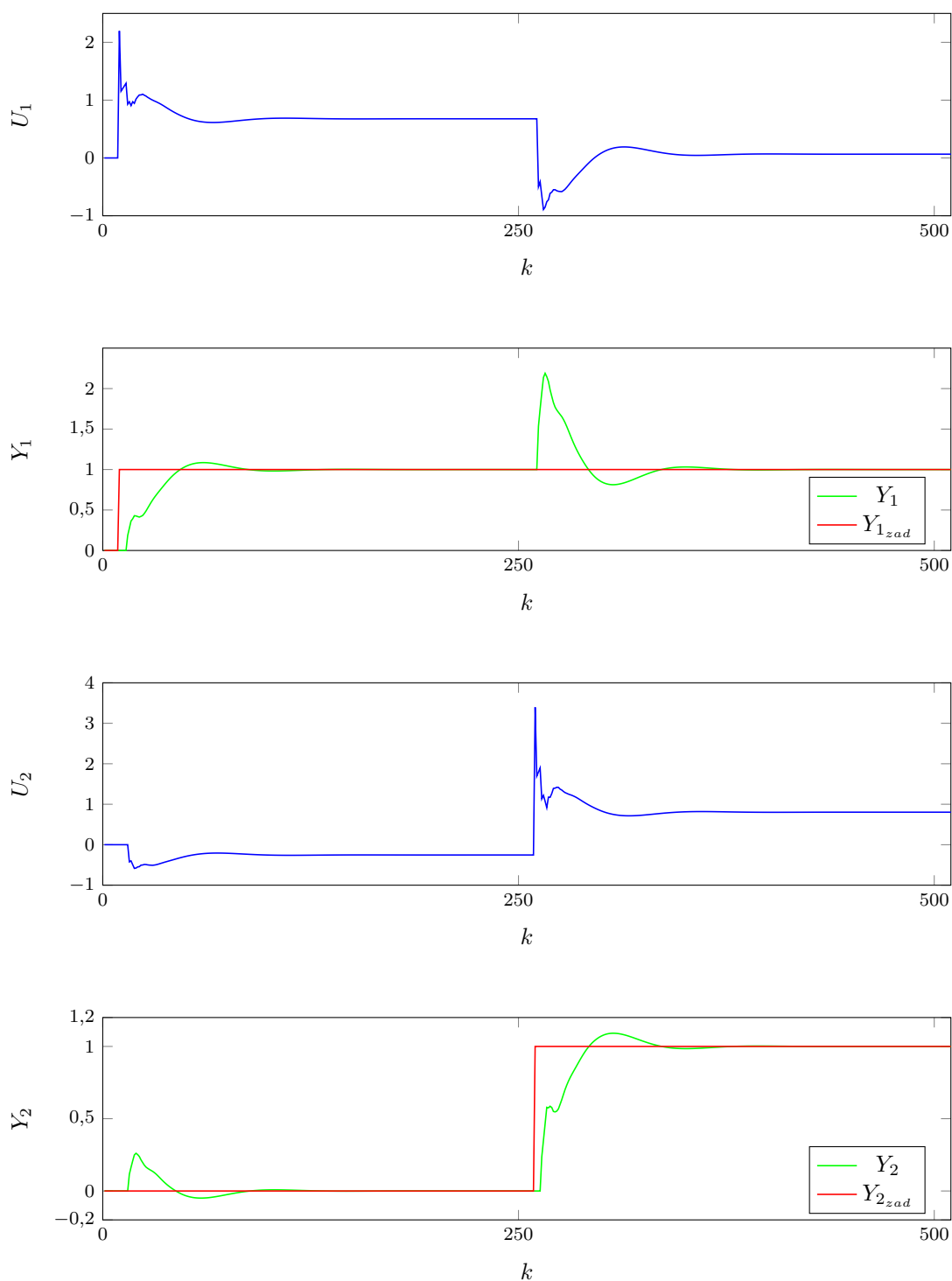


Rys. 6.7. Oba regulatory PID

Zgodnie z ideą metody inżynierskiej, ponownie zmniejszyliśmy wzmocnienie obu regulatorów o połowę. Uzyskane przebiegi zaprezentowane są na rys. 6.8. Widać na nich, że po dokonanych zmianach regulator pracuje prawidłowo. Wartość wskaźnika jakości wynosi: 34,0364. Finalne nastawy:

$$K_1 = 1,0875, T_{i1} = 12, T_{d1} = 0,5$$

$$K_2 = 1,8, T_{i2} = 9, T_{d2} = 0,5$$



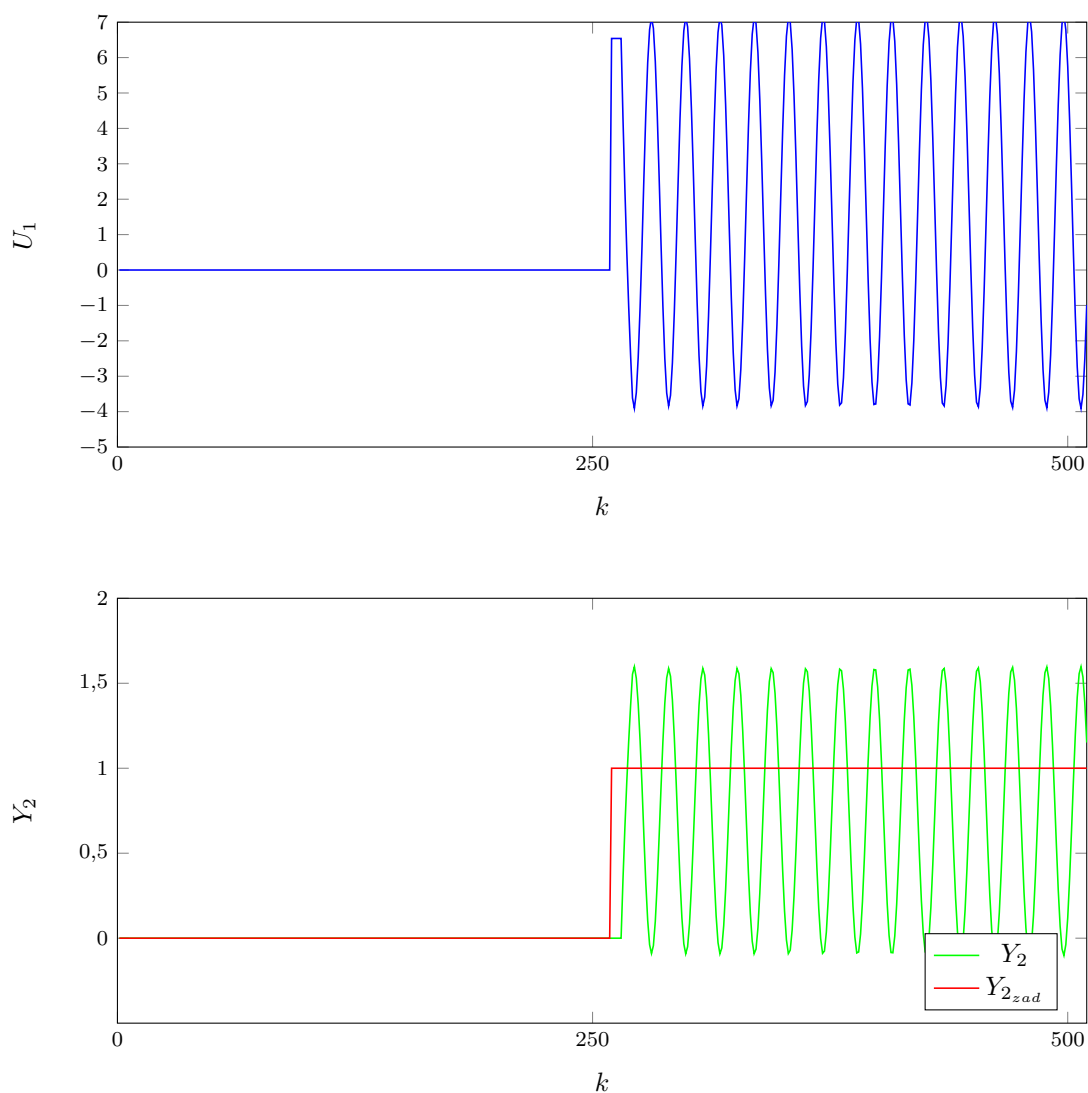
Rys. 6.8. Oba regulatory PID dostrojone

6.1.2. Wariant drugi

Drugi wariant obejmuje oddziaływanie uchybu pierwszego wyjścia na drugi sygnał sterujący oraz drugiego wyjścia na pierwszy sygnał sterujący.

Procedura strojenia jest identyczna jak opisana w wariantcie pierwszym - każdy z regulatorów ma nastawy dobierane oddzielnie.

Regulację rozpoczęliśmy od wprowadzenia regulatora P_1 w niegasnące oscylacje (rys. 6.9). Efekt ten został uzyskany dla wzmocnienia o wartości $K_{k1} = 6.54$.

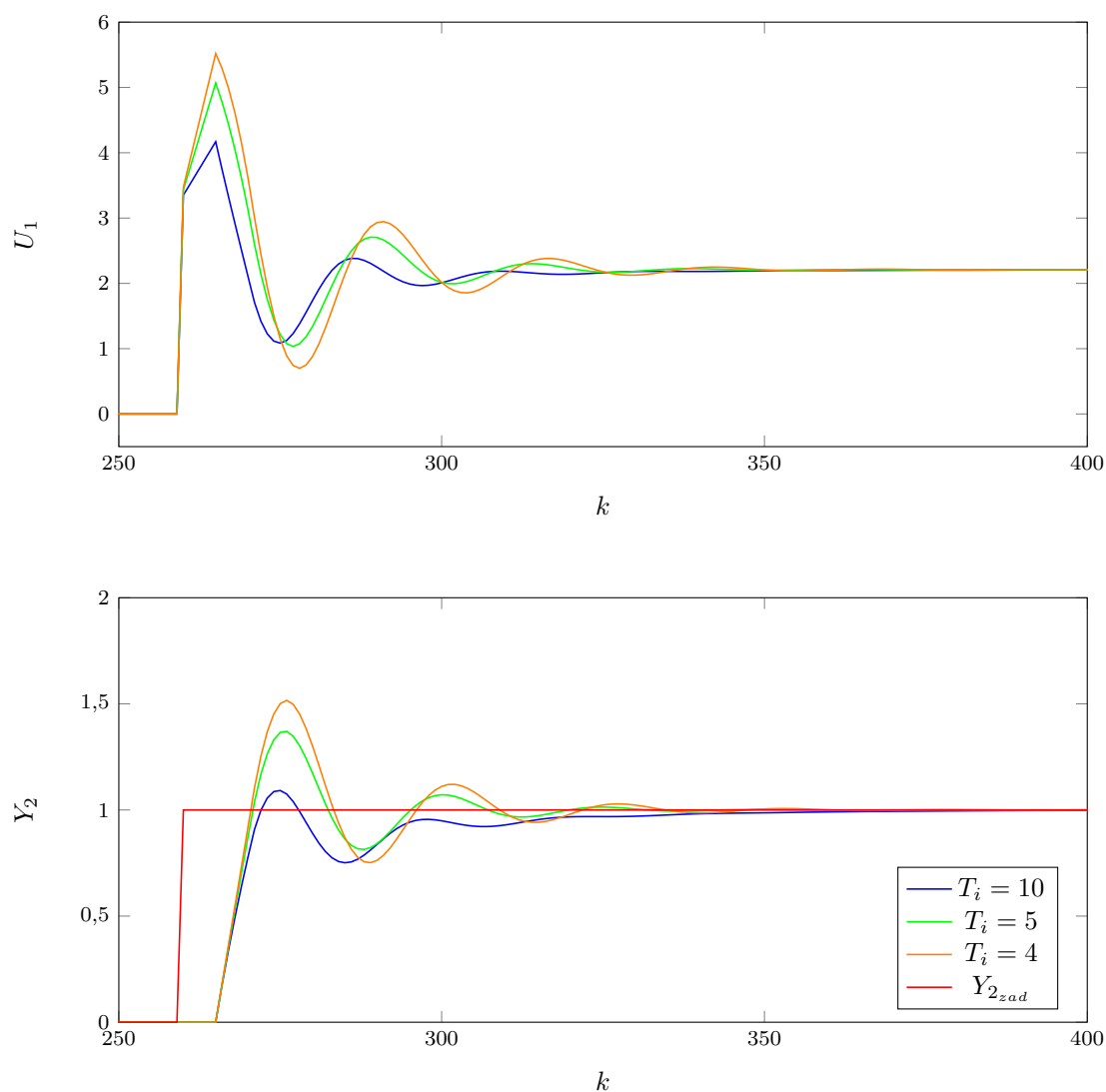


Rys. 6.9. Regulator P_1 z niegasnącymi oscylacjami

W następnym kroku przeprowadziliśmy dobranie parametrów regulatora PI_1 (rys. 6.10). Przy wzmacnieniu $K_1 = 0,5K_{k1}$ przeprowadziliśmy szereg testów i z pośród zilustrowanych poniżej wartości wybraliśmy $T_{i1} = 5$ jako najlepszy wynik. Biorąc pod uwagę wartość błędów :

- $T_i = 10 = 8,19$,
- $T_i = 5 = 8,44$,
- $T_i = 4 = 9,53$,

zauważamy, że najmniejszy błąd uzyskaliśmy dla $T_{i1} = 10$, jednakże przebieg funkcji zachowuje się dość niepokojąco (oscylacje pod wartością zadaną) i zdecydowaliśmy się zostać przy wartości $T_{i1} = 5$.



Rys. 6.10. Strojenie regulatora PI_1

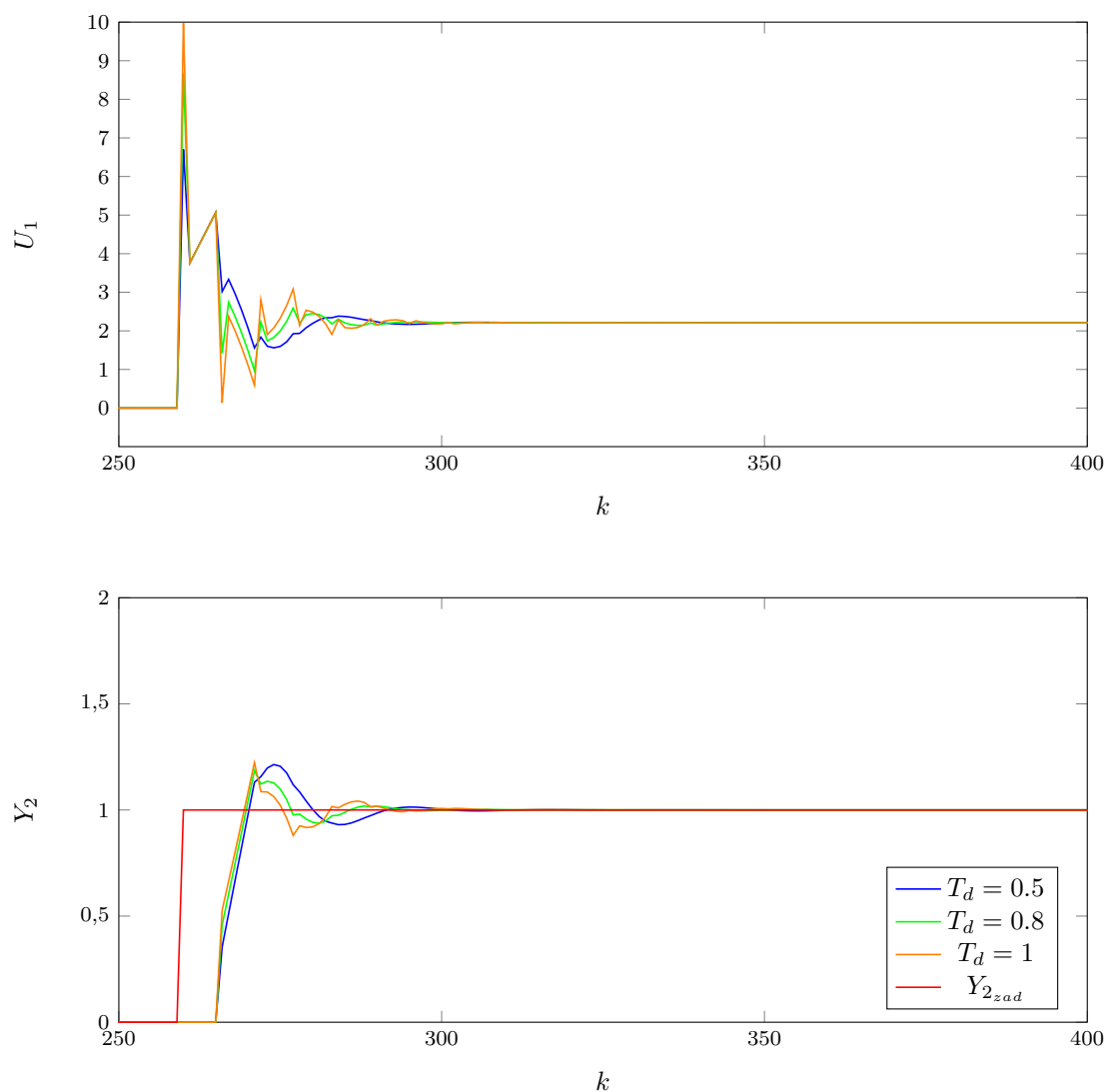
W kolejnym kroku został dobrany parametr T_{d1} regulatora PID_1 . Z pośród zaprezentowanych wartości rys. 6.11 najlepszy przebieg o dobrym czasie regulacji, najniższym przeregulowaniu oraz zadawalającej płynności regulacji uzyskaliśmy dla wartości $T_{d1} = 0,8$. Wartości błędów :

- $T_d = 1 = 6,50$,
- $T_d = 0,8 = 6,64$,
- $T_d = 0,5 = 7,04$,

Mimo że z oceny ilościowej wynika najmniejsza wartość błędu dla $T_{d1} = 1$ postanowiliśmy pozostać przy wartości $T_{d1} = 0,8$, gdyż niesie ze sobą większe korzyści.

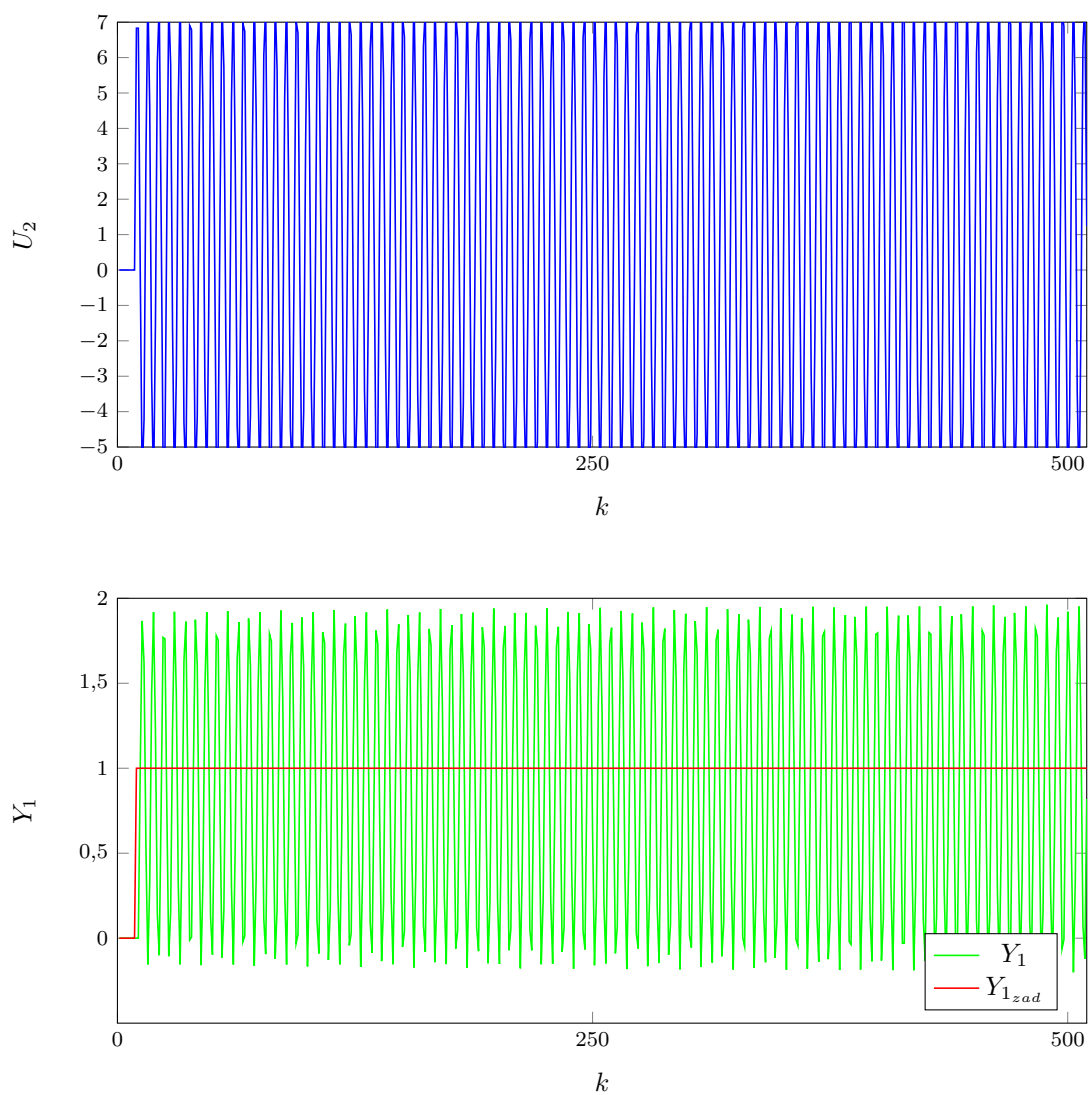
Nastawy pierwszego toru wyjścia regulatora PID_1 :

$$K = 3,27, T_i = 5, T_d = 0,8$$



Rys. 6.11. Strojenie regulatora PID_2

W tym momencie dostrojony regulator PID_1 został wyłączony i przystąpiliśmy do regulacji PID_2 . W tym celu wprowadziliśmy regulator P_2 w stałe oscylacje (osiągnięte dla wartości $K_{k_2} = 6,83$ - rys. 6.12).

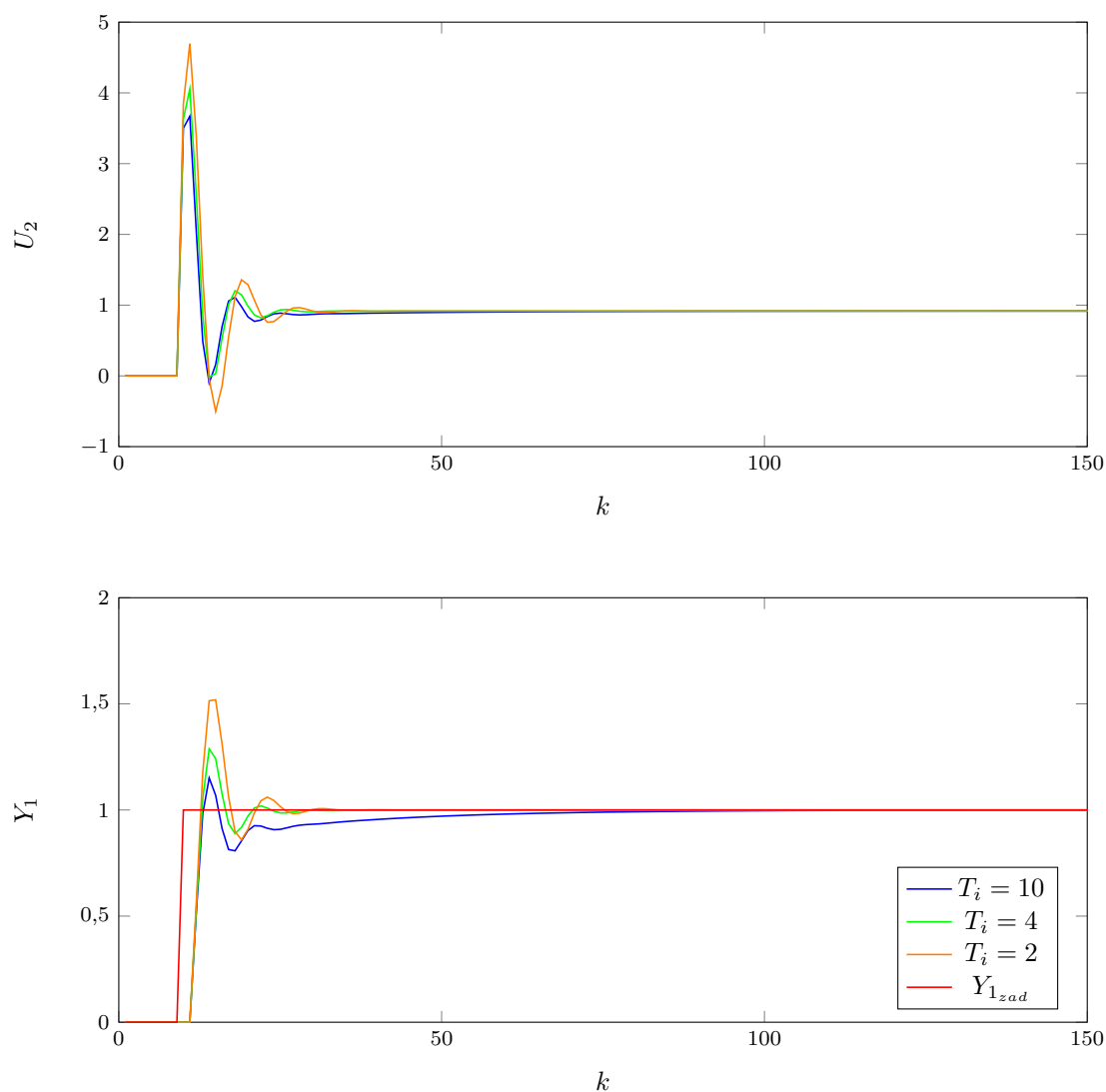


Rys. 6.12. Regulator P_2 z niegasnącymi oscylacjami

W następnym kroku przeprowadziliśmy dobranie parametrów regulatora PI_2 (rys. 6.13). Przy wzmacnieniu $K_2 = 0,5K_{k_2}$ przeprowadziliśmy szereg testów i z pośród zilustrowanych poniżej wartości wybraliśmy $T_{i_2} = 4$ jako najlepszy wynik. Można zauważyć, że przebieg wyjścia dla wspomnianego parametru charakteryzuje się najlepszym czasem regulacji przy stosunkowo niskim przeregulowaniu. Biorąc pod uwagę wartość błędów :

- $T_i = 2 = 2,90$,
- $T_i = 4 = 2,39$,
- $T_i = 10 = 2,87$,

zauważamy, że najmniejszy wskaźnik jakości uzyskaliśmy także dla $T_{i_2} = 4$.



Rys. 6.13. Strojenie regulatora PI_2

W kolejnym kroku został dobrany parametr T_{d_2} regulatora PID_2 . Z pośród zaprezentowanych wartości na rys. 6.14, najlepszy przebieg, tj. o dobrym czasie regulacji, najniższym przeregulowaniu oraz zadawalającej płynności regulacji, uzyskaliśmy dla wartości $T_{d_2} = 0,2$. Przy wartości błędów:

— $T_d = 0,3 = 2,243$,

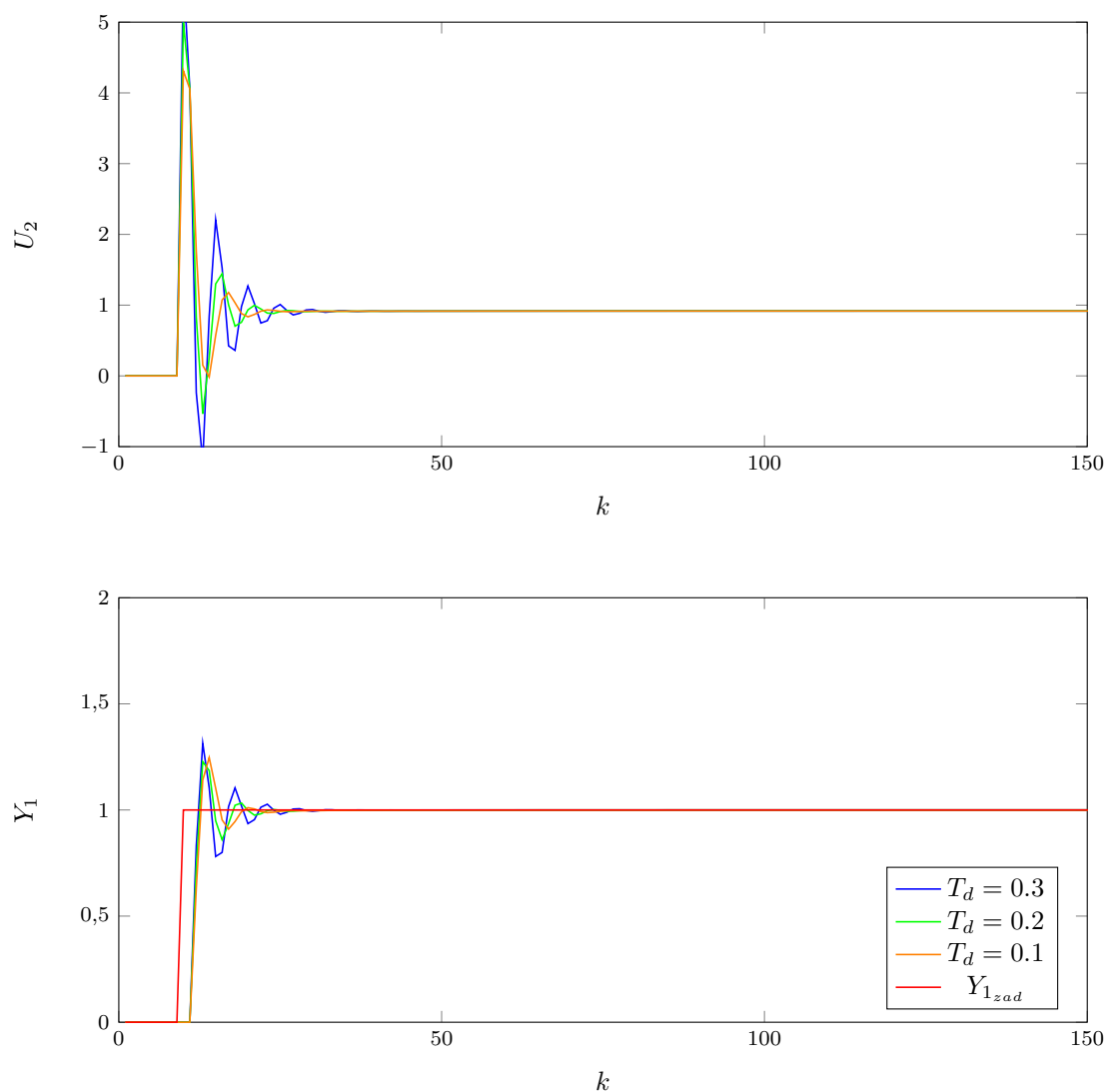
— $T_d = 0,2 = 2,18$,

— $T_d = 0,1 = 2,241$,

zauważamy, że najmniejszy wskaźnik jakości uzyskaliśmy także dla $T_{d_2} = 0,2$.

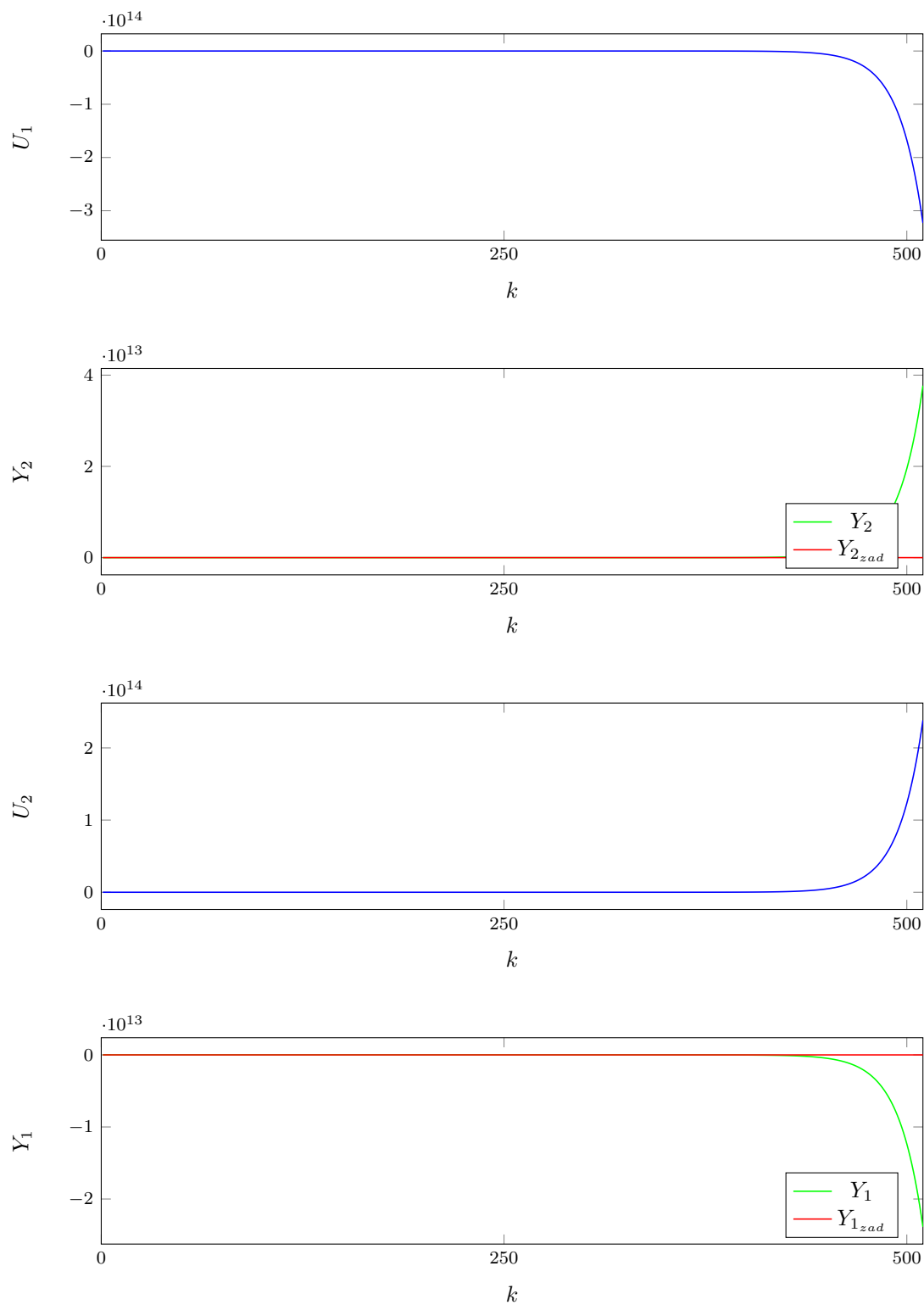
Nastawy pierwszego toru wyjścia regulatora PID_2 :

$$K = 3,415, T_i = 4, T_d = 0,2$$



Rys. 6.14. Strojenie regulatora PID_2

Po uruchomieniu obu torów regulatora okazało się, że obiekt nie działa prawidłowo. Także po próbie dobrania lepszych nastaw rezultat nie uległ większym zmianom (rys . 6.15).

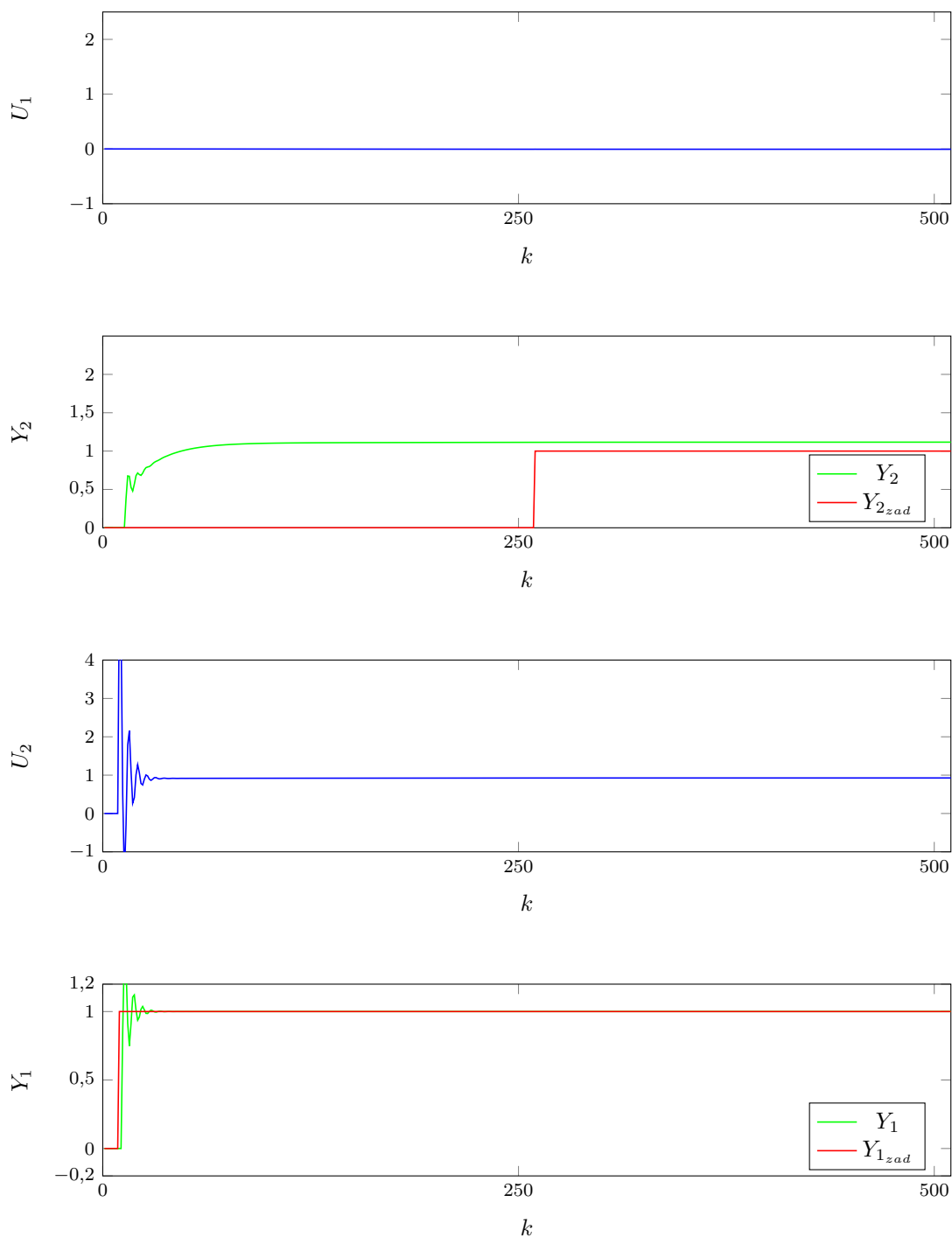


Rys. 6.15. Oba regulatory PID włączone

W celu poprawy zaistniałej sytuacji posłużyliśmy się funkcją *fmincon* do znalezienia rozwiązania optymalnego. Ku naszemu zdziwieniu funkcja ta nie podołała zadaniu i zachowanie regulatora z nastawami obliczonymi przez funkcję optymalizacyjną został zaprezentowany na rys. 6.16.

Wniosek :

Dla naszego obiektu wariant drugi jest nieskuteczny. Przy takim połączeniu wejści wyjść, nie można zapewnić regulacji.

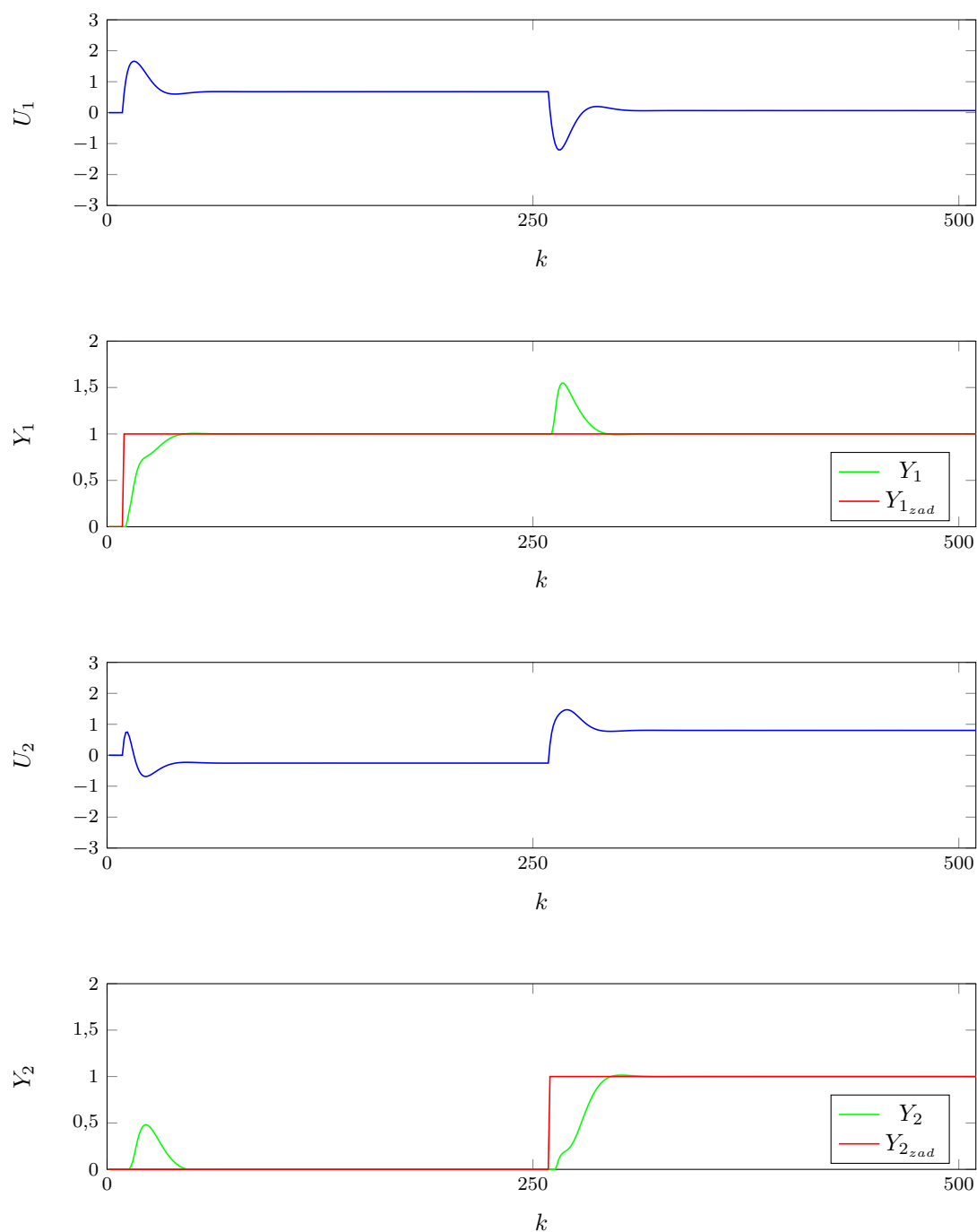


Rys. 6.16. Oba regulatory PID włączone

6.2. Regulator DMC

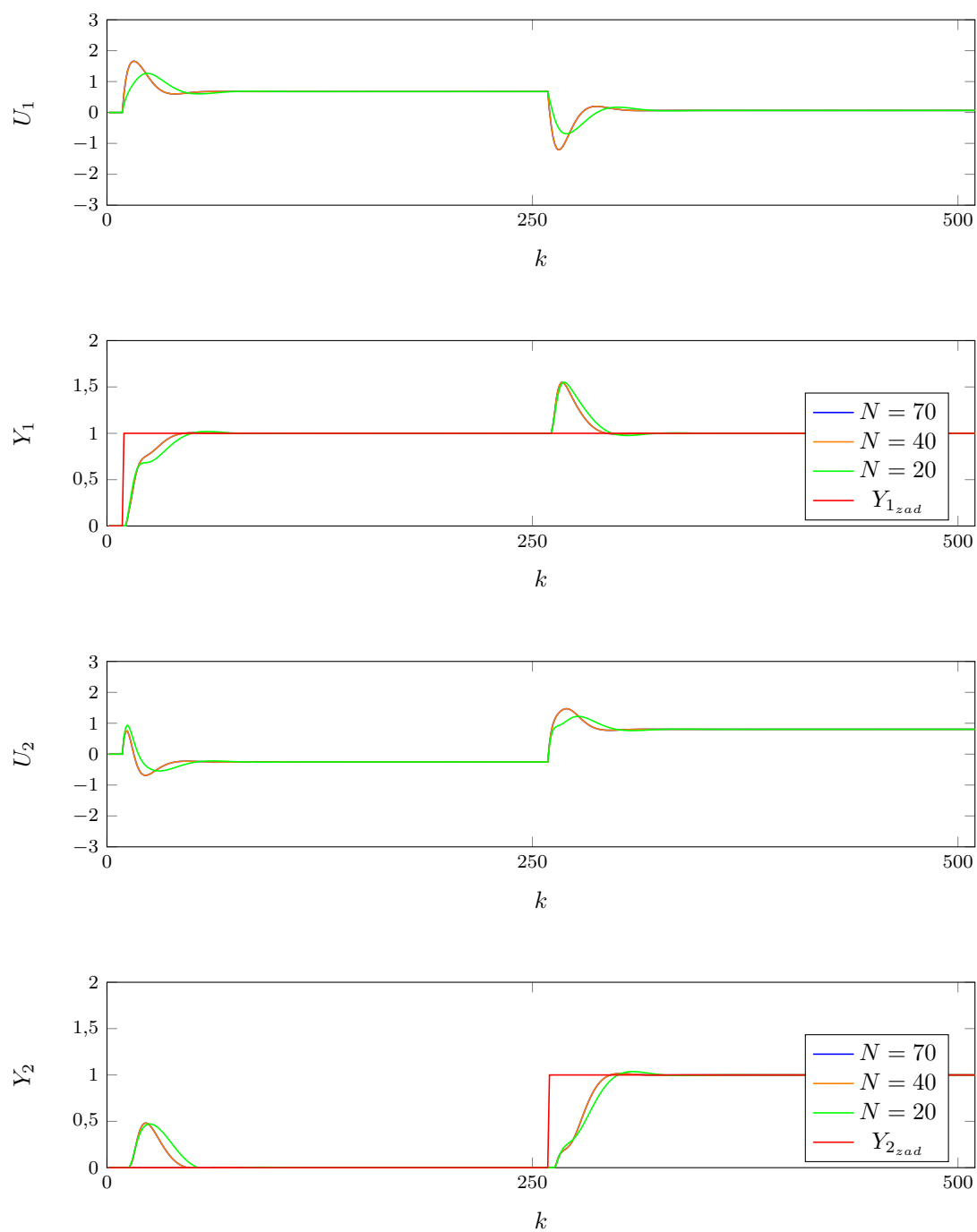
Nastawy regulatora *DMC* zostały dobrane eksperymentalnie. Regulator *DMC* korzysta z odpowiedzi skokowej s uzyskanej w punkcie 3.

Obserwując obiekt bezpiecznie założyliśmy, że jego horyzont dynamiki jest równy $D = 200$. Taką również przyjęliśmy wartość początkową N oraz N_u , natomiast pierwotną wartością λ było 1, tj.: $N = 200, N_u = 200, \lambda = 1$ rys. 6.17.



Rys. 6.17. Regulator DMC

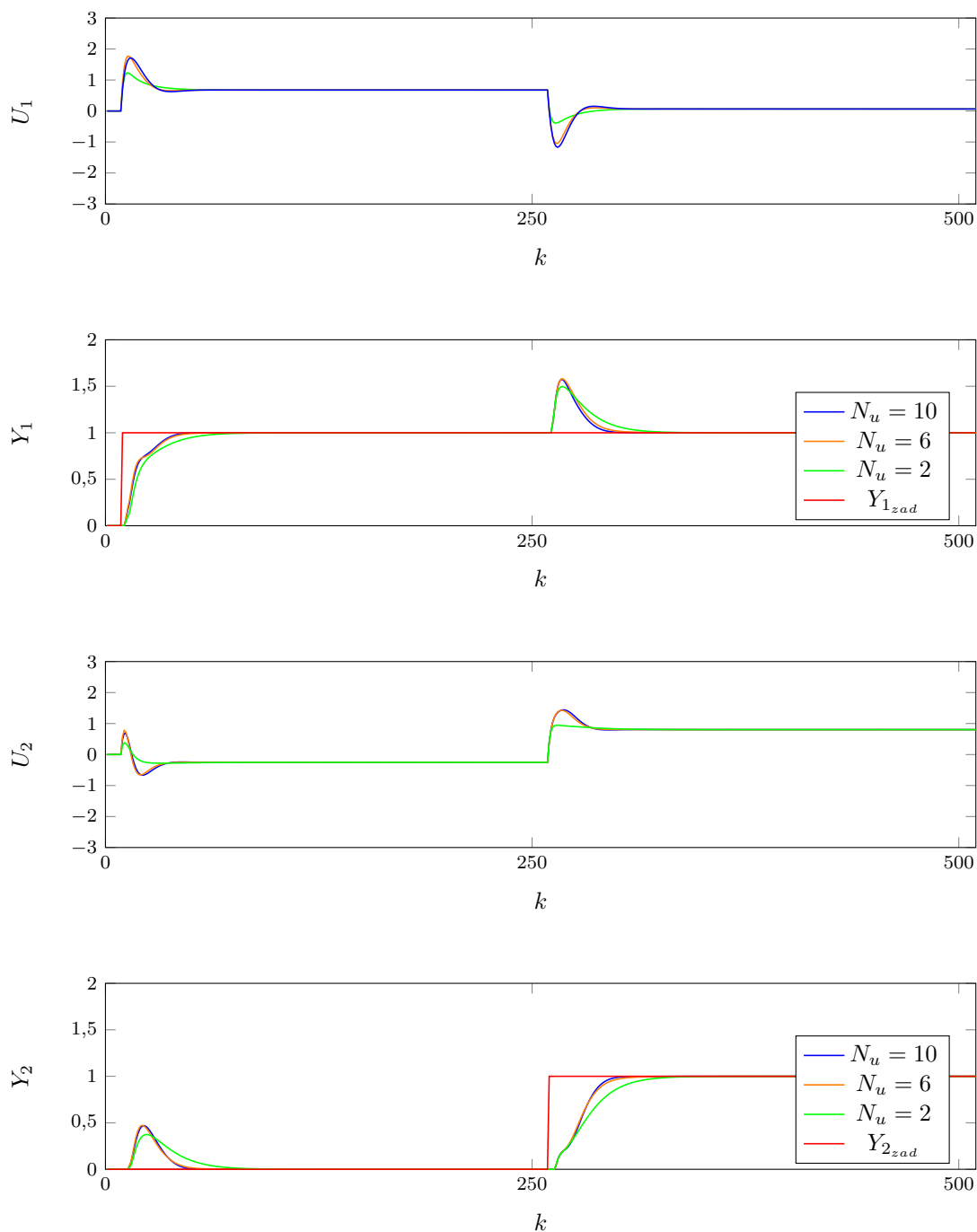
Następnie próbowaliśmy, w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej, obniżyć parametr N : jak się okazało, jego wpływ dla wartości powyżej 70 jest znikomy. Efekty eksperymentu dla różnych wartości zostały przedstawione na poniższym wykresie:

Rys. 6.18. Regulator DMC strojenie N

Wskaźnik regulacji E dla tych nastaw :

- $N = 70$: $E = 25,1526$
- $N = 40$: $E = 25,1585$
- $N = 20$: $E = 28,3286$

Zdecydowaliśmy więc ustawić N na 70 - błąd jest najmniejszy , przeregulowanie również zauważalnie mniejsze. Eksperyment wykazał, że dalsze zmniejszanie N prowadzi do pogorszenia przebiegów. Następnym parametrem, na którego minimalizacji nam zależy jest N_u :

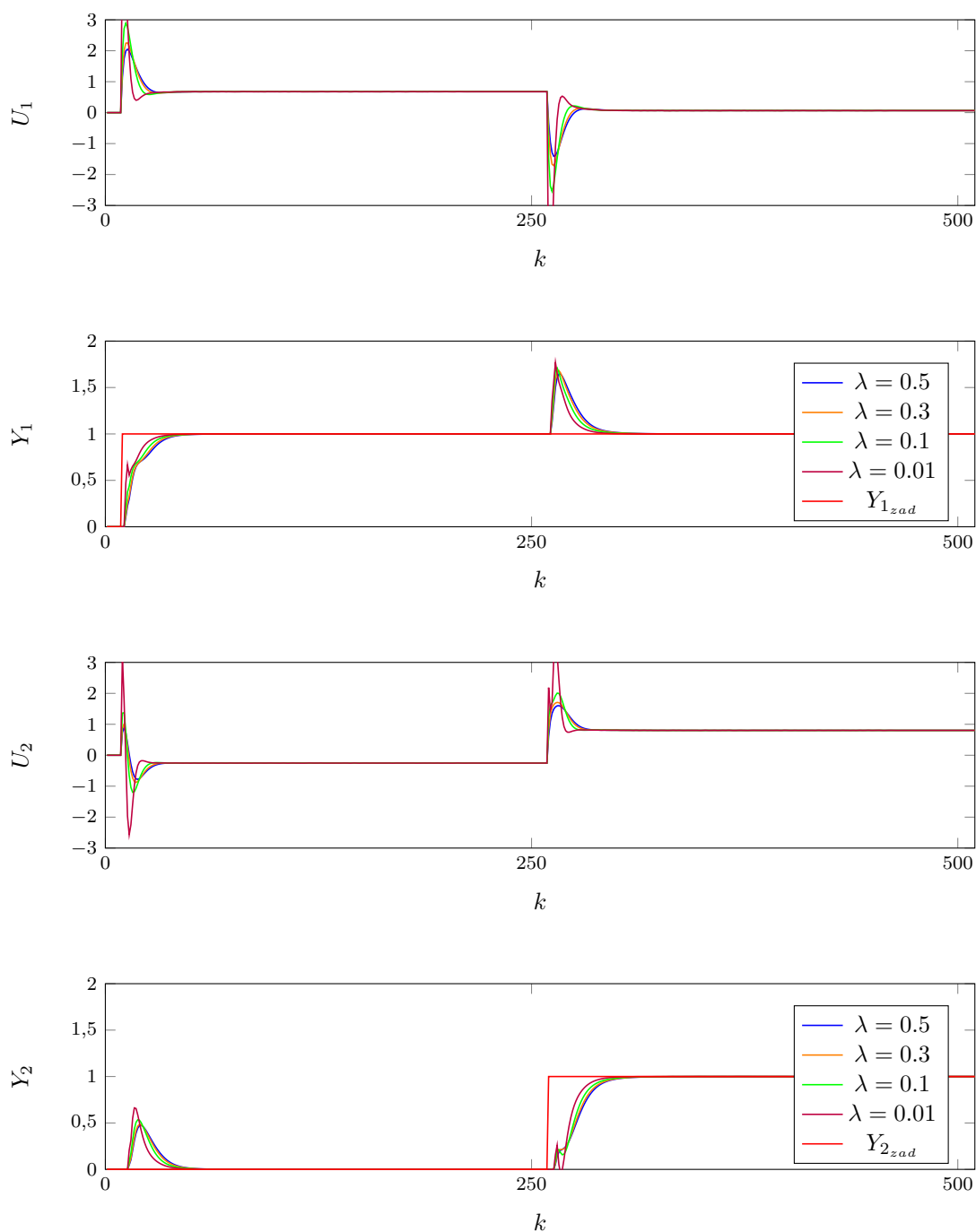


Rys. 6.19. Regulator DMC strojenie N_u

Wskaźnik regulacji E dla tych nastaw :

- $N_u = 10$: $E = 25,0205$
- $N_u = 6$: $E = 24,9633$
- $N_u = 2$: $E = 28,5941$

Jak widać, dla $N_u = 6$ wyjście najszybciej zbiega do wartości zadanej, sterowanie jest tylko odrobinę ostrzejsze od $N_u = 2$, a błąd jest najmniejszy. Następnym parametrem do dobrania jest λ :



Rys. 6.20. Regulator DMC strojenie λ

Wskaźnik regulacji E dla tych nastaw :

- $\lambda = 0,5$: $E = 23,7389$
- $\lambda = 0,3$: $E = 22,9920$
- $\lambda = 0,1$: $E = 21,5220$
- $\lambda = 0,01$: $E = 19,4842$

Zmniejszając λ , uzyskujemy drastyczną poprawę wskaźnika jakości regulacji, jednakże kosztem sterowania. Zbyt gwałtowne sterowanie nie jest pożądane - może wpływać niekorzystnie na elementy wykonawcze układu sterowania. Bazując na tym wniosku, jak i na spostrzeżeniu, że poniżej wartości $\lambda = 0,3$ zysk w jakości sterowania jest niewielki, a skok sterowania dużo ostrzejszy, postanowiliśmy zatrzymać tę wielkość $\lambda = 0,3$. Oprócz tego, dalsze obniżanie λ prowadzi do niepożądanych ostrych zmian przebiegów wyjściowych.

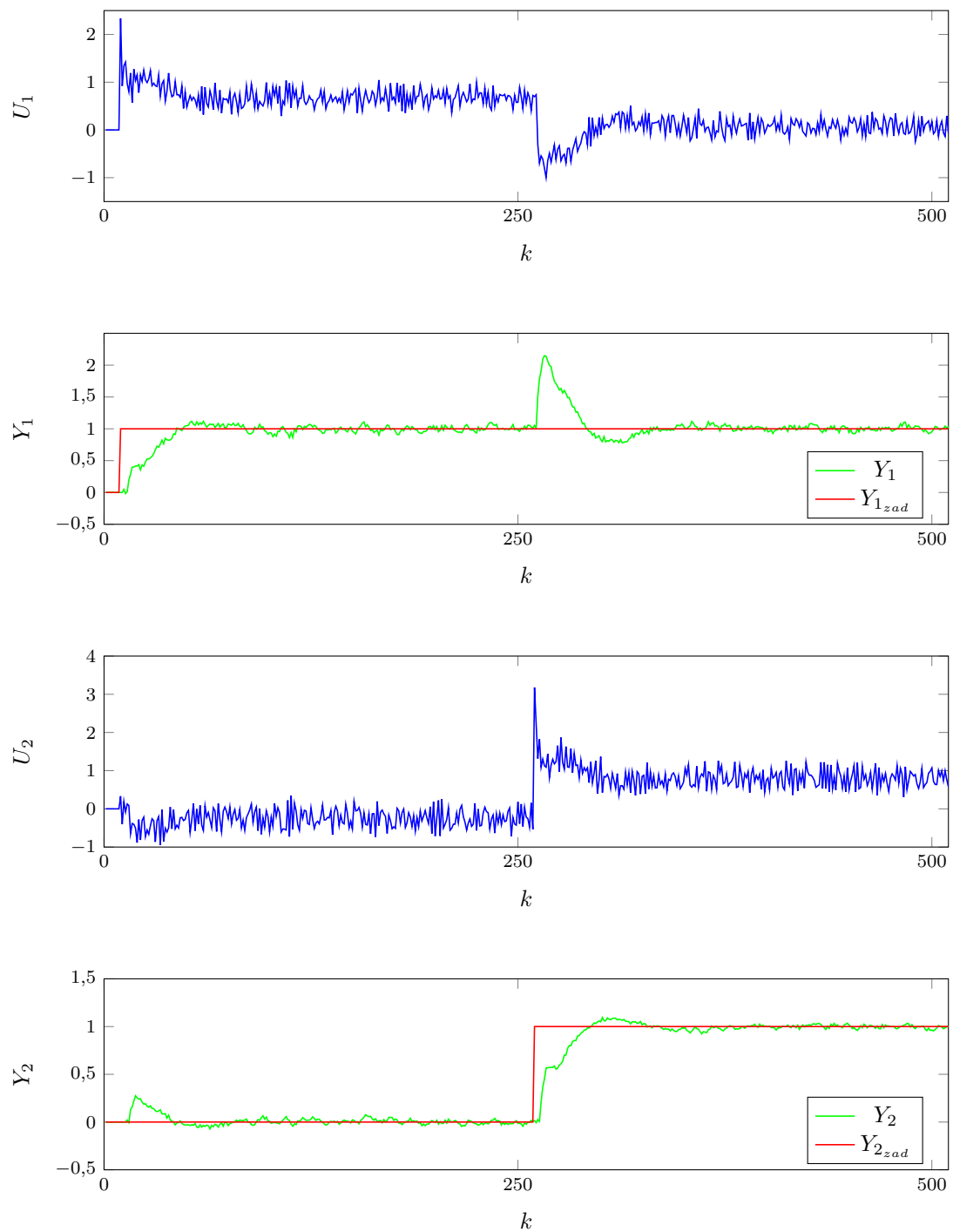
Końcowe wartości dobranego regulatora DMC: $N = 70$, $N_u = 6$, $\lambda = 0,3$.

7. Zadanie 6: Algorytmy przy zaszumionym pomiarze wyjść

7.1. PID

7.1.1. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,1

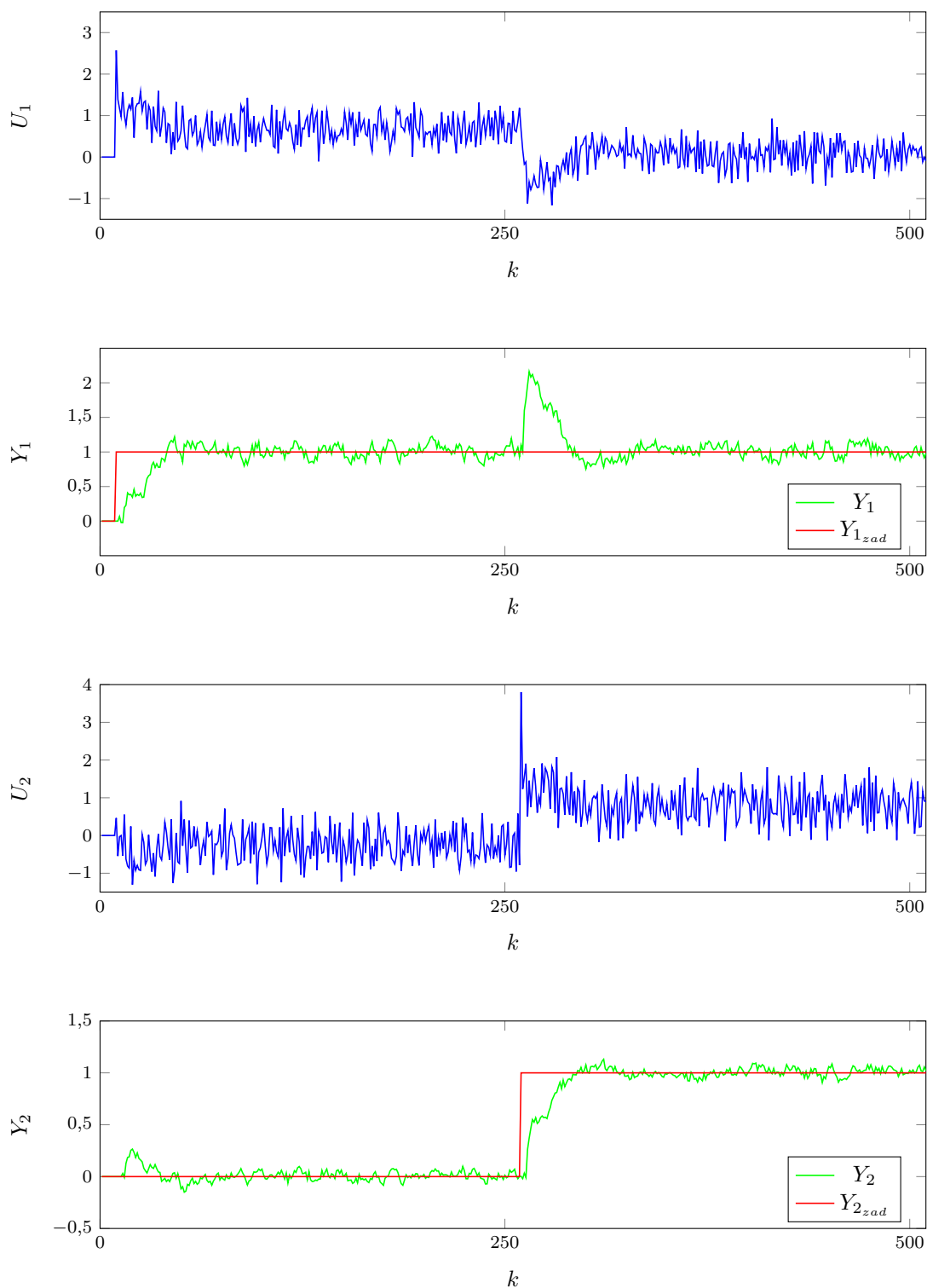
Jak widać na wykresie 7.1, dla amplitudy szumu o wartości 0,1 jakość sterowania jest wciąż dosyć dobra. Błąd wyniósł $E = 34.6689$.



Rys. 7.1. Oba regulatory PID dla szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,1

7.1.2. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2

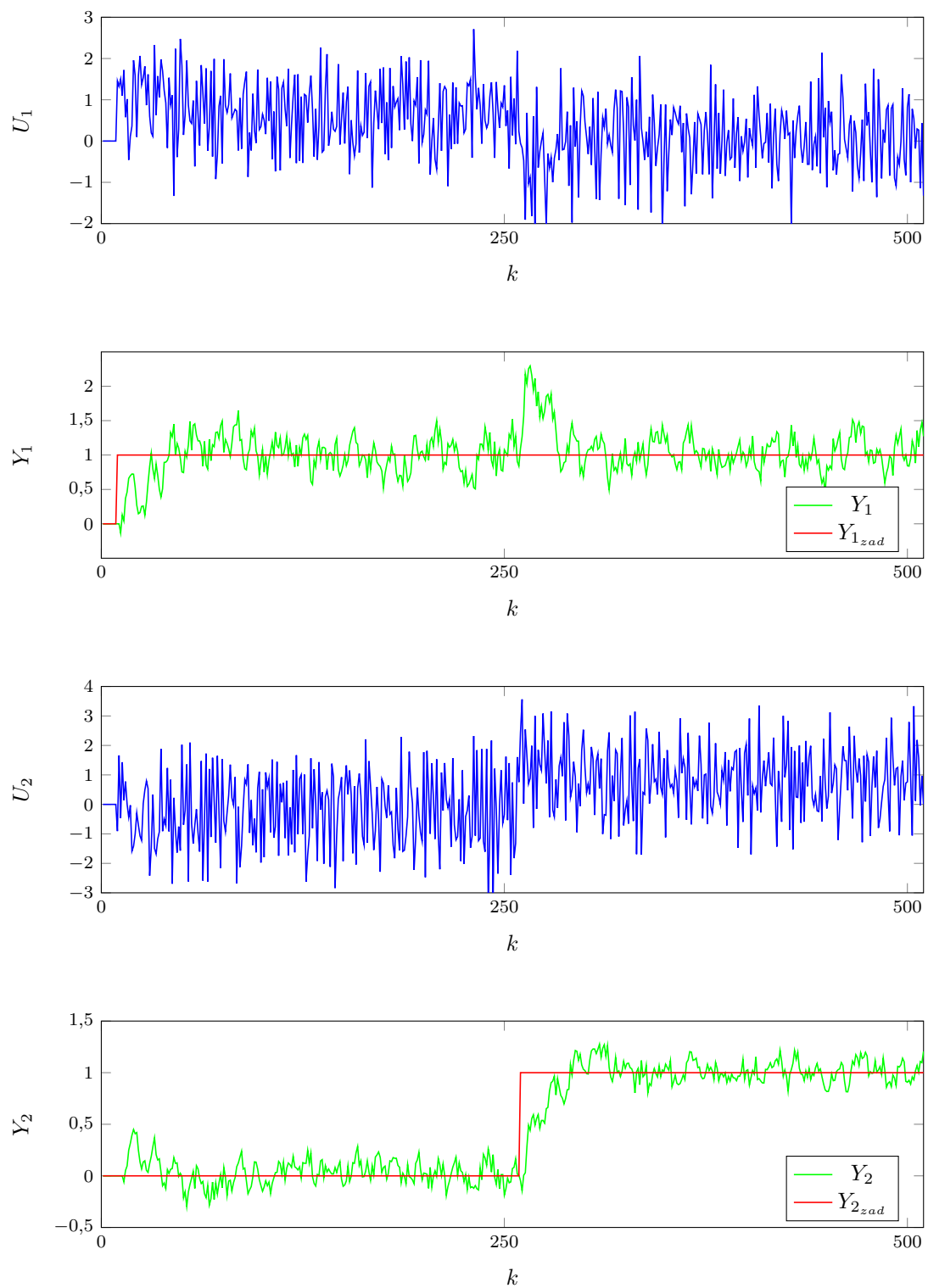
Efekt zaszumienia pomiaru wyjścia obiektu szumem o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2 został zaprezentowany na wykresie 7.2. Jakość regulacji jest akceptowalna, chociaż przebiegi są dalekie od gładkich. Błąd niewiele większy niż ten w poprzednim podpunkcie, wyniósł $E = 39.2142$.



Rys. 7.2. Oba regulatory PID dla szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2

7.1.3. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,5

Gdy błędy pomiarów sygnałów wyjściowych są modelowane szumem o amplitudzie 0,5, algorytm staje się nieskuteczny. Błąd wynosi aż $E = 57.8277$, a oscylacje sygnału wyjściowego przyjmują wartości aż $\pm 0,4$ wartości zadanej. Sygnał sterujący zmienia się z taką szybkością i ma tak dużą amplitudę, że z trudnością można dostrzec chwile k zmiany wartości zadanych. Wykres 7.3.



Rys. 7.3. Oba regulatory PID dla szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,5

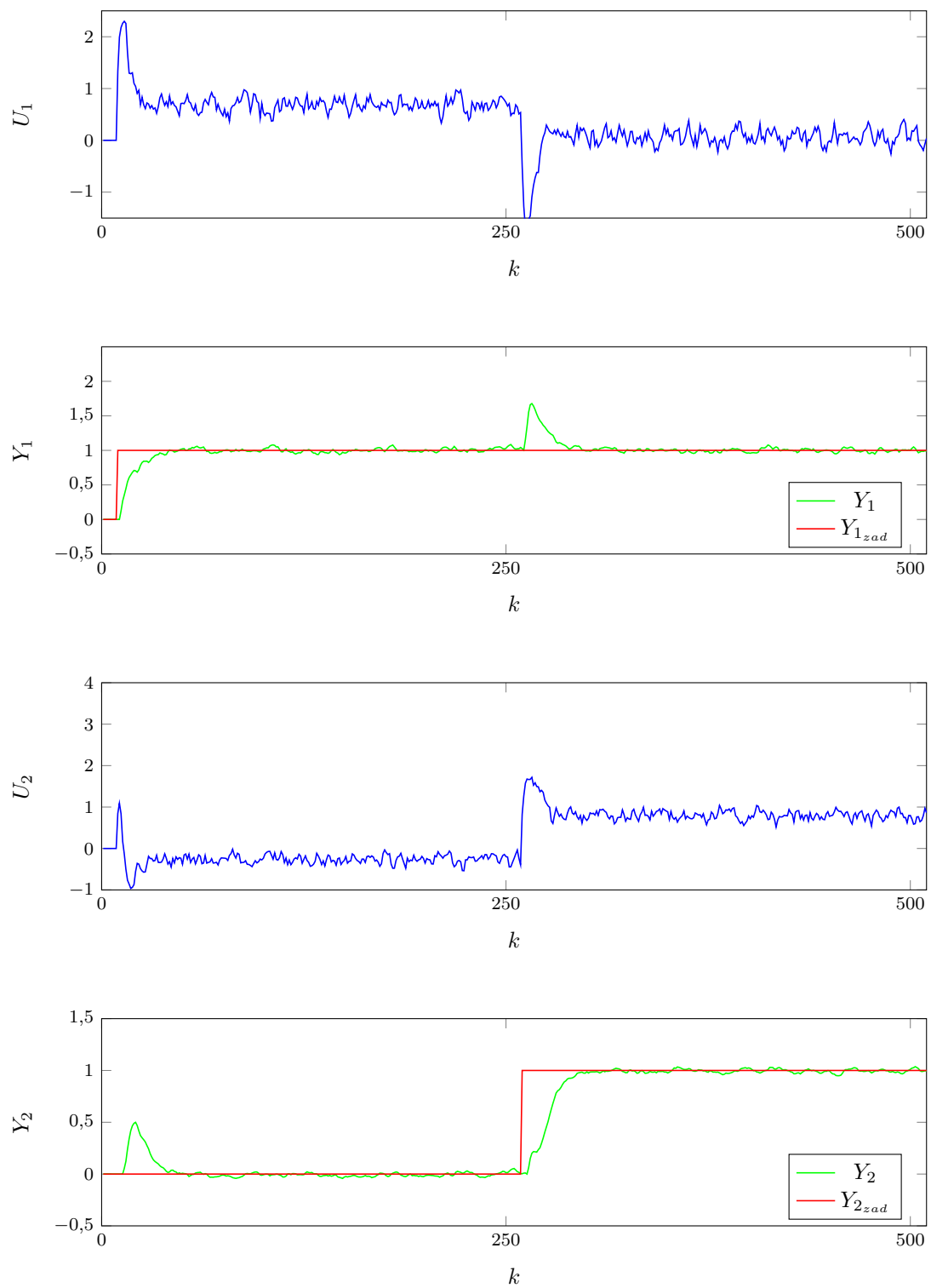
7.1.4. Wnioski

Regulatory wykazują się zadowalającą odpornością na szumy pomiarowe w sygnale wyjściowym. Zarówno dla amplitudy 0,1 jak i 0,2, sygnał wyjściowy jak i sterujący mają zadowalające przebiegi. Dla amplitudy 0,5 regulatory nie pracują już prawidłowo. Oprócz tego warto zauważyć, że regulator nr 1 jest wrażliwszy na szumy - amplitudy są większe na jego przebiegach.

7.2. DMC

7.2.1. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,1

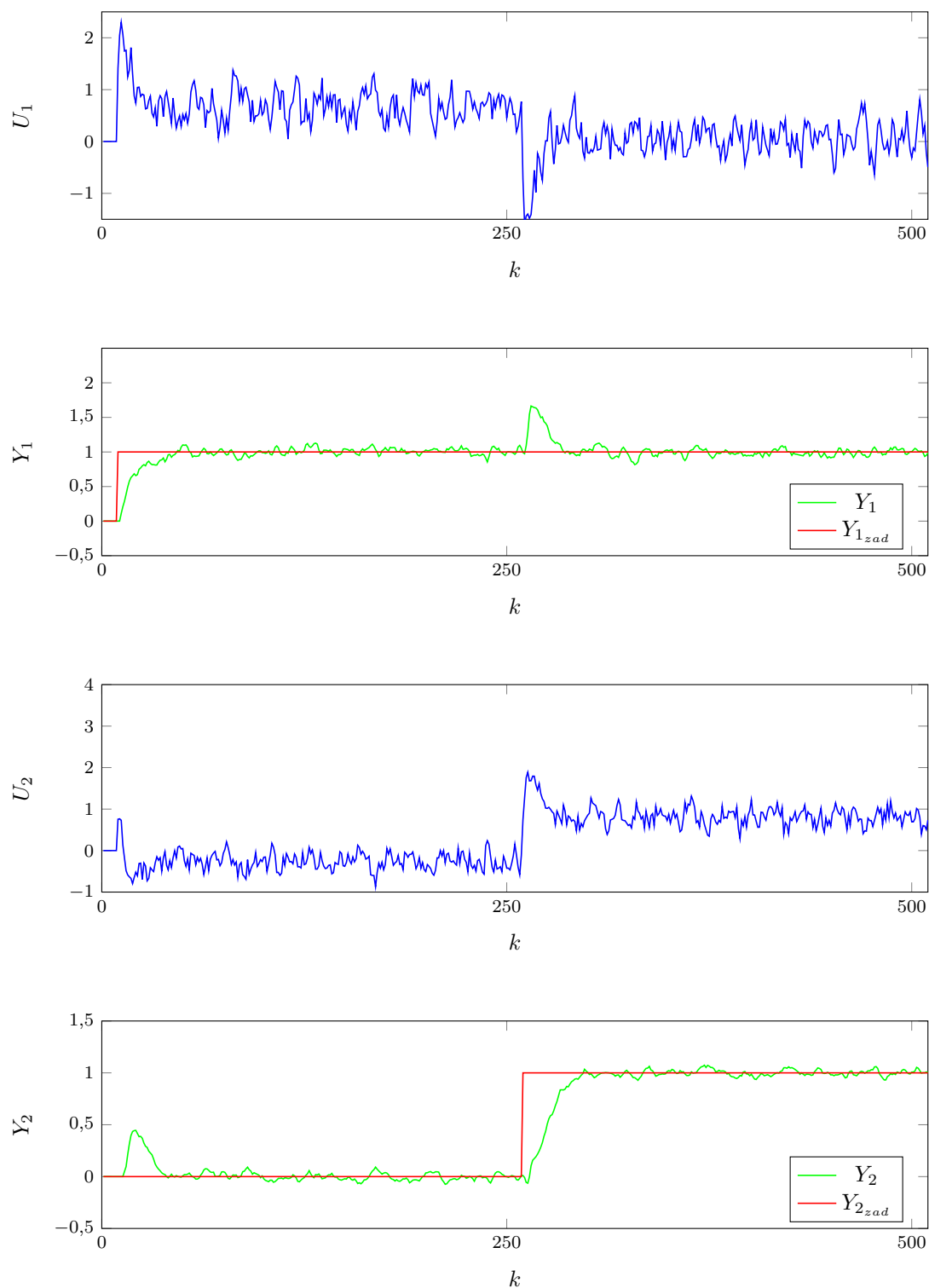
Jak widać na wykresie 7.4, dla amplitudy szumu o wartości 0,1 jakość sterowania jest bardzo dobra. Algorytm DMC radzi sobie lepiej od algorytmu PID. Błąd wyniósł $E = 23,2815$.



Rys. 7.4. Oba regulatory DMC dla szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,1

7.2.2. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2

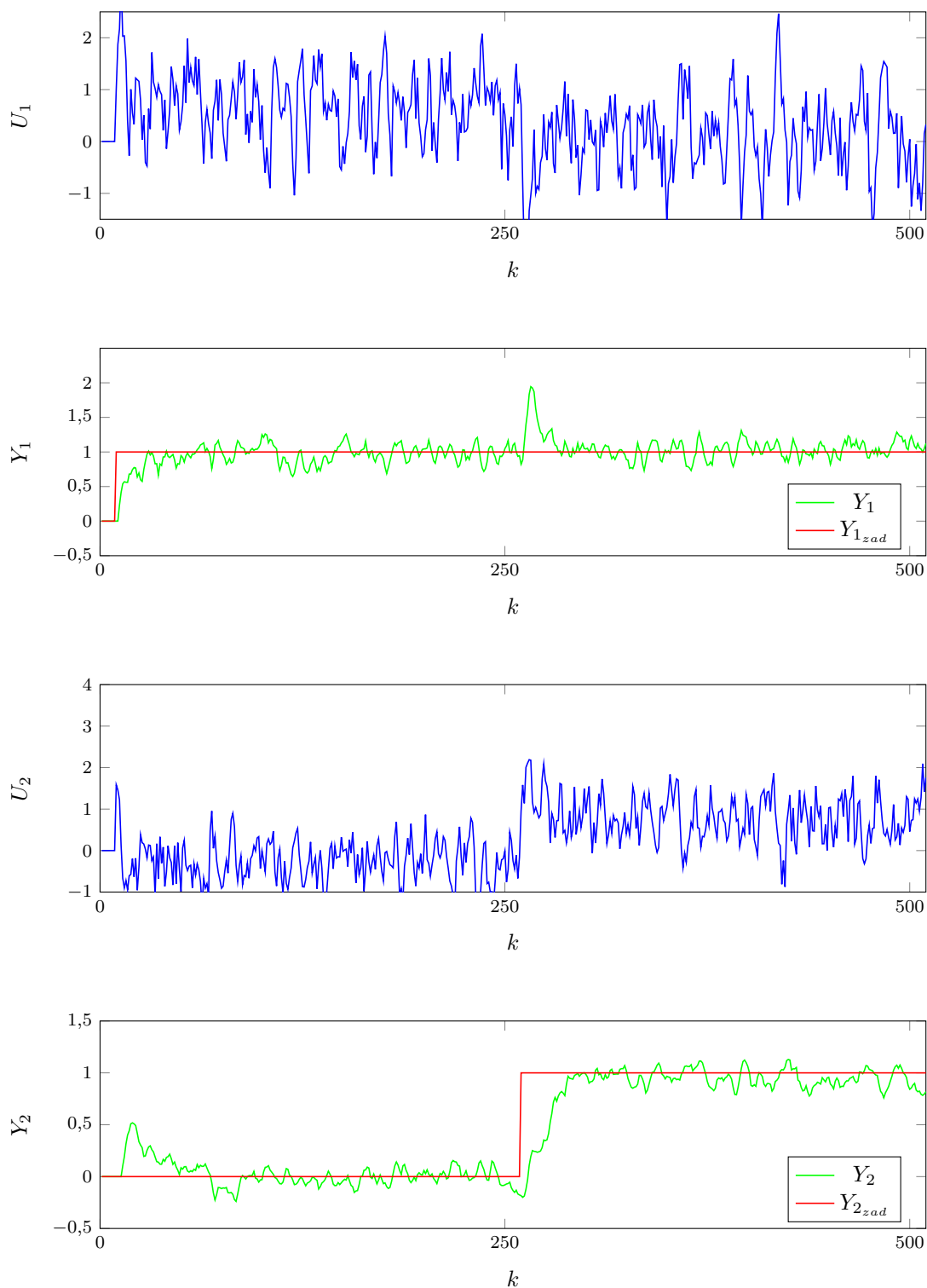
Wpływ szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2 na pomiar wyjścia obiektu został zaprezentowany na wykresie 7.5. Jakość regulacji jest wciąż dobra, chociaż przebiegi zaczynają coraz mocniej odbiegać od wartości zadanej. Błąd niewiele większy niż ten w poprzednim podpunkcie, wyniósł $E = 25,6682$.



Rys. 7.5. Oba regulatory DMC dla szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,2

7.2.3. Szum o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,5

Gdy błędy pomiarów sygnałów wyjściowych są modelowane szumem o amplitudzie 0,5, przebiegi wynikające z pracy algorytmu wyglądają podobnie do tych utworzonych przez algorytm PID dla szumu o wartości 0,2. Błąd wynosi $E = 37,6402$, a oscylacje sygnału wyjściowego przyjmują wartości $\pm 0,25$. Jest to kolejny dowód na przewagę algorytmu DMC podczas regulacji z wyjściem obiektu obciążonym szumem pomiarowym. Wykres 7.6.



Rys. 7.6. Oba regulatory DMC dla szumu o rozkładzie jednostajnym i amplitudzie 0,5

7.2.4. Wnioski

Oba regulatory wykazują się zadowalającą odpornością na szumy pomiarowe w sygnale wyjściowym. Dla wszystkich wartości amplitudy sygnału szumu algorytm DMC poradził sobie lepiej od regulatora PID.