

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

Sprawozdanie z projektu nr 4, 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	6
4. Zadanie 3: Algorytmy PID i DMC	7
4.1. Cyfrowy algorytm PID	7
4.2. Analityczny algorytm DMC	7
5. Zadanie 4: Strojenie regulatorów	9
5.1. PID	9
5.2. DMC	13
6. Zadanie 5: Rozmyty regulator PID	15
6.1. Funkcja przynależności	15
6.2. Dwa regulatory lokalne	15
6.3. Trzy regulatory lokalne	17
6.4. Cztery regulatory lokalne	18
6.5. Pięć regulatorów lokalnych	19
6.6. Podsumowanie rozmytego PID	20
7. Zadanie 6: Rozmyty regulator DMC	21
7.1. Funkcja przynależności	21
7.2. Dwa regulatory lokalne	24
7.3. Trzy regulatory lokalne	25
7.4. Cztery regulatory lokalne	26
7.5. Pięć regulatorów lokalnych	27
7.6. Podsumowanie DMC	28
8. Zadanie 7: Dobór parametrów lambda regulatora DMC	29
8.1. Dwa regulatory lokalne	29
8.2. Trzy regulatory lokalne	31
8.3. Cztery regulatory lokalne	32
8.4. Pięć regulatorów lokalnych	33
8.5. Podsumowanie DMC z dobranymi nastawami lambda	34

1. Opis obiektu

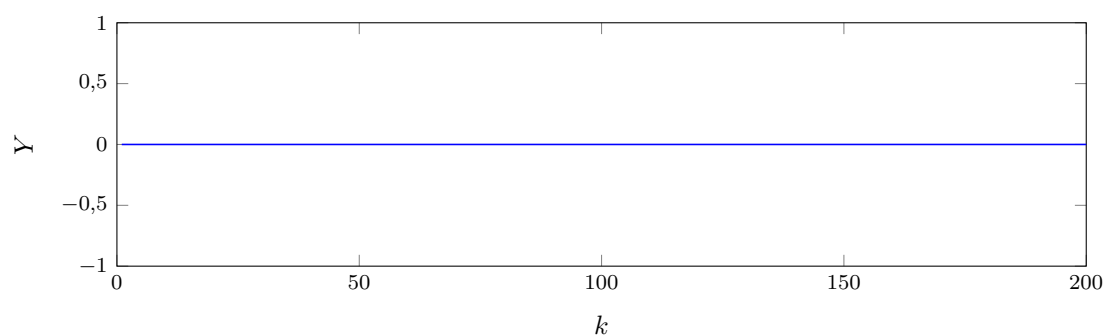
Obiekt używany w projekcie opisany jest daną przez prowadzącego funkcją:

$$Y(k) = \textit{symulacja_obektu3y}(U(k-5), U(k-6), Y(k-1), Y(k-2)) \quad (1.1)$$

gdzie k jest aktualną chwilą symulacji sygnału próbkowanego. Wartość sygnałów w punkcie pracy (w stanie ustalonym) mają wartość $u = y = 0$. 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 stałym sterowaniu, równym jego wartości w punkcie pracy ($U_{pp} = 0$). Eksperyment potwierdził wcześniej podaną wartość wyjścia ($Y_{pp} = 0$), a jego przebieg obrazuje wykres 2.1.

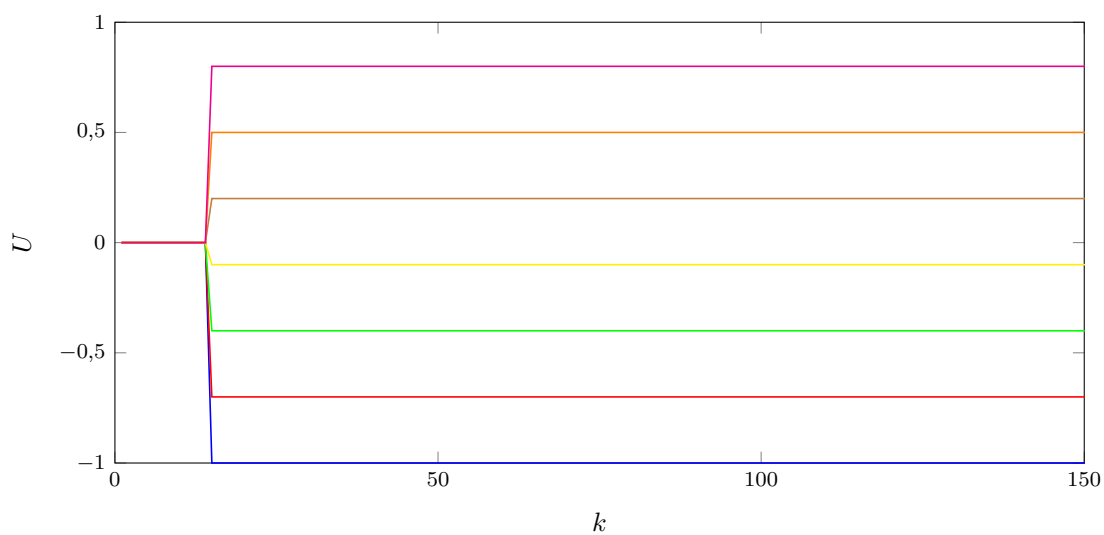


Rys. 2.1. Zachowanie obiektu w punkcie pracy

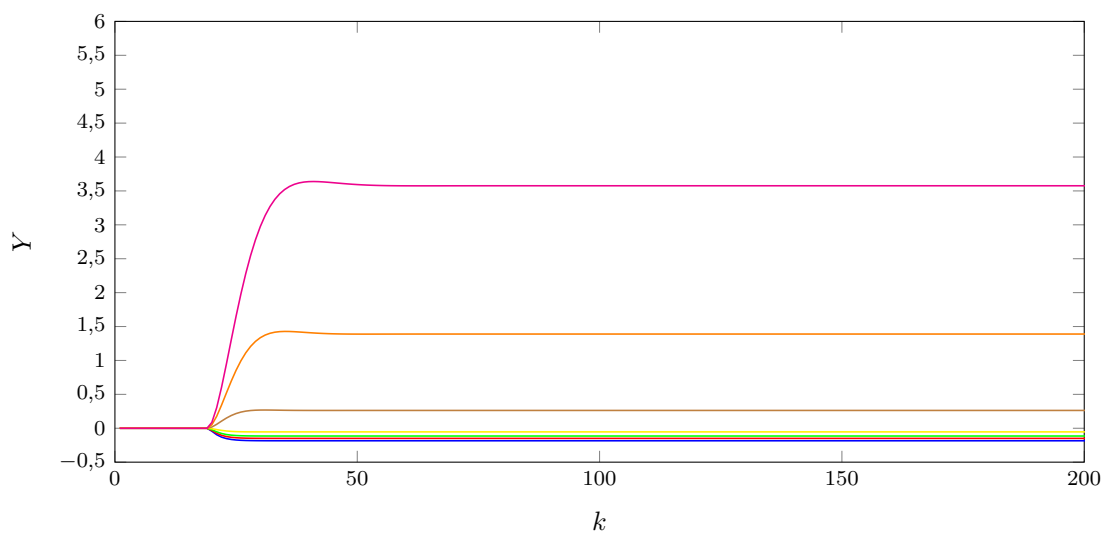
3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe

3.1. Odpowiedzi skokowe

W tej części projektu należało wyznaczyć symulacyjnie odpowiedzi skokowe (rys. ??). Eksperyment zakładał, iż obiekt będzie na początku w punkcie pracy, a następnie w chwili $k = 15$ zostanie wykonany skok jednostkowy.



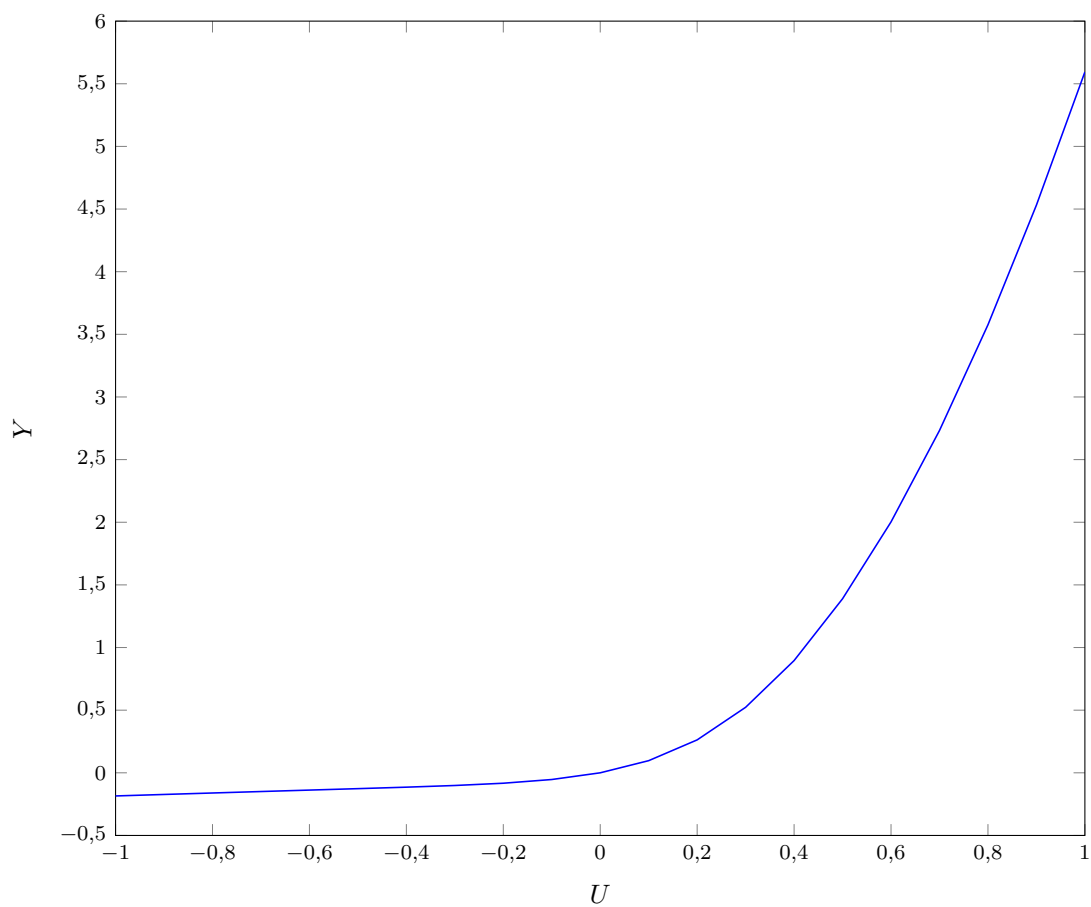
Rys. 3.1. Sterowanie



Rys. 3.2. Wyjście

3.2. Charakterystyka statyczna

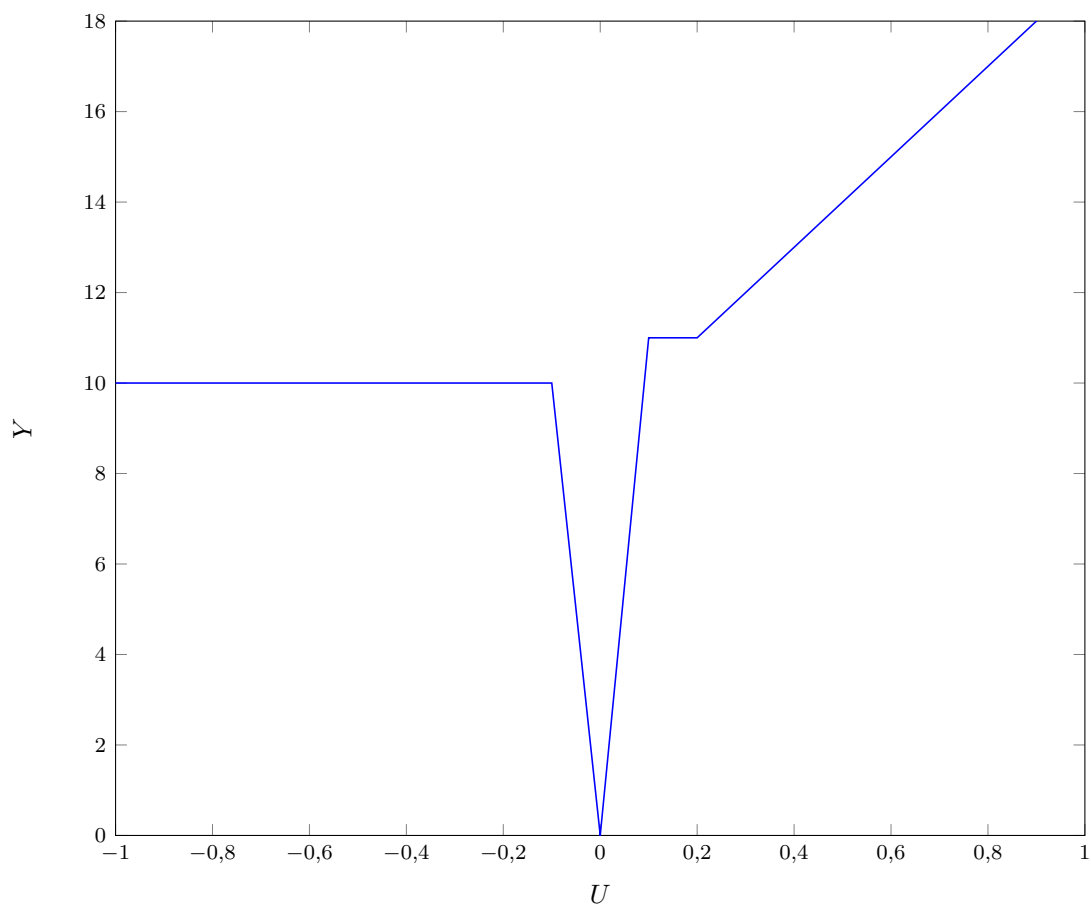
Poniżej została zaprezentowana charakterystyka statyczna procesu $y(u)$ (rys. 3.3). Na podstawie zawartego wykresu można wywnioskować, że właściwości statyczne procesu są nieliniowe.



Rys. 3.3. Charakterystyka statyczna

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 nieliniowa (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Charakterystyka dynamiczna

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 - wzmacnienie członu P, T_p - czas próbkowania, T_i - czas zdwojenia członu całkującego I , T_d - czas wyprzedzenia członu różniczkującego D .

$$r_0 = K * (1 + T_p/(2 * T_i) + T_d/T_p) \quad (4.1)$$

$$r_1 = K * (T_p/(2 * T_i) - 2 * T_d/T_p - 1) \quad (4.2)$$

$$r_2 = K * T_d/T_p \quad (4.3)$$

W każdej iteracji pętli sterowania jest obliczany uchyb wyjścia obiektu od wartości zadanej jego wyjścia.

$$e(k) = Y^{\text{zad}}(k) - Y(k); \quad (4.4)$$

Sterowanie regulatora zostaje wyliczone na bieżącą chwilę przy użyciu wzoru:

$$U(k) = r_2 * e(k - 2) + r_1 * e(k - 1) + r_0 * e(k) + U(k - 1); \quad (4.5)$$

4.2. Analityczny algorytm DMC

Do obliczeń wykorzystujemy następujące wzory:

$$\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} Y^{\text{zad}}(k) \\ \vdots \\ Y^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (4.7)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k + N_u - 1|k) \end{bmatrix}_{N_u \times 1} \quad (4.8)$$

$$\Delta \mathbf{U}^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k - 1) \\ \vdots \\ \Delta u(k - (D - 1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times 1} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{N \times N_u} \quad (4.10)$$

$$M^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \dots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix}_{N \times D-1} \quad (4.11)$$

$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) \quad (4.12)$$

$$K = (M^T M + \lambda * I)^{-1} M^T \quad (4.13)$$

$$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) \quad (4.14)$$

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

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - k_u \Delta U^P \quad (4.15)$$

gdzie:

$$e(k) = Y^{zad}(k) - Y(k) \quad (4.16)$$

$$k_e = \sum_{i=1}^N K(1, i) \quad (4.17)$$

$$k_u = k M^P \quad (4.18)$$

k to oznaczenie pierwszego wiersza macierzy K. Aktualne sterowanie otrzymujemy poprzez zsumowanie poprzedniego sterowania i aktualnie wyliczonego $\Delta u(k|k)$.

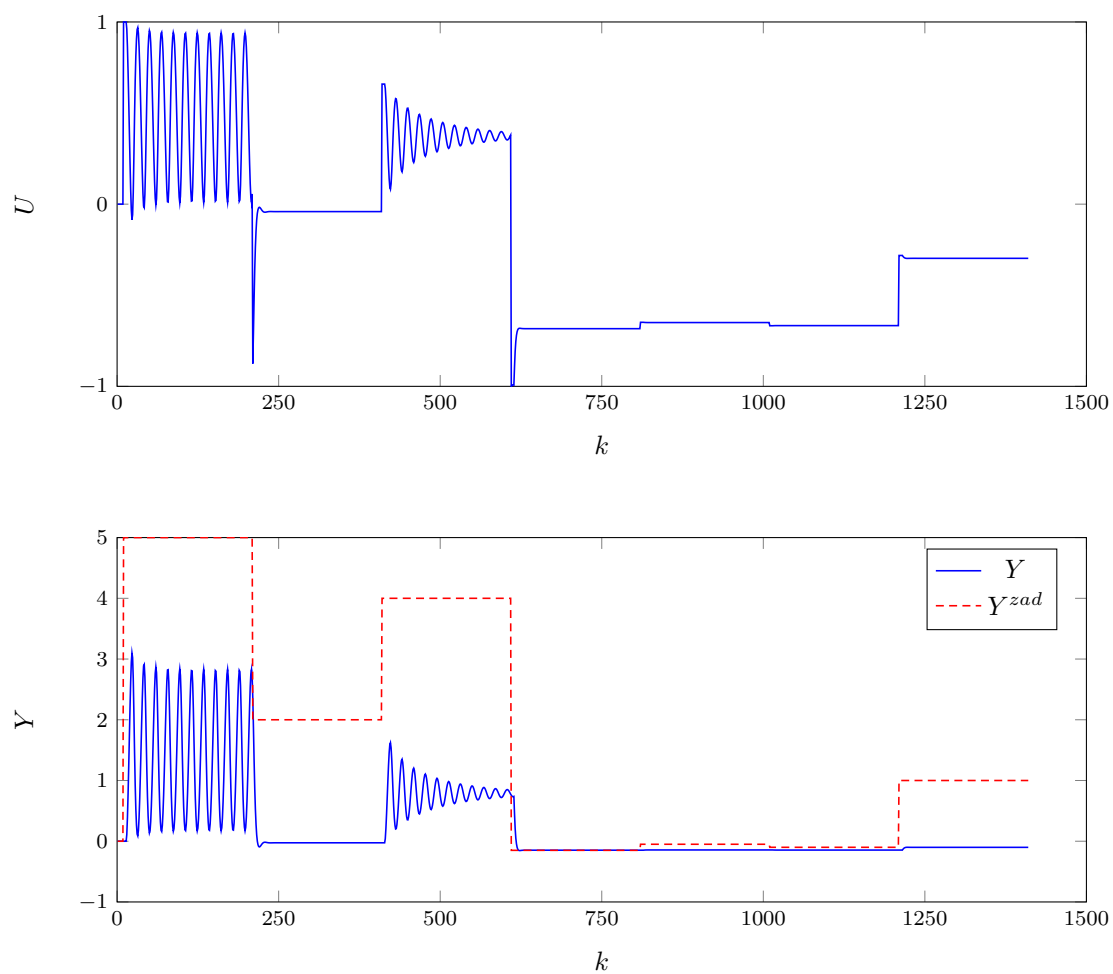
5. Zadanie 4: Strojenie regulatorów

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.

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

5.1. PID

Do wyznaczenia nastaw regulatora *PID* korzystamy z metody inżynierskiej. Na początku włączamy wyłącznie człon *P* i szukamy wzmocnienia *K* dla którego obiekt w wyniku skoku sterowania wpada w niegasnące oscylacje. Wynikiem eksperymentu jest wartość $K_{osc} = 0.35$ rys.5.1. Pamiętając, że sterowany obiekt jest nieliniowy, doświadczamy oscylacji wyłącznie w jego górnych zakresach. Dalsze zwiększanie wzmocnienia powodowałoby oscylacje dla górnych zakresów w regulatorze *PID*. Zgodnie z założeniem metody inżynierskiej w dalszych poszukiwaniach wykorzystywać będziemy $K = 0,5K_{osc} = 0,175$ jako wzmocnienie.

Rys. 5.1. Obiekt wprowadzony w oscylacje przy $K = 0,35$

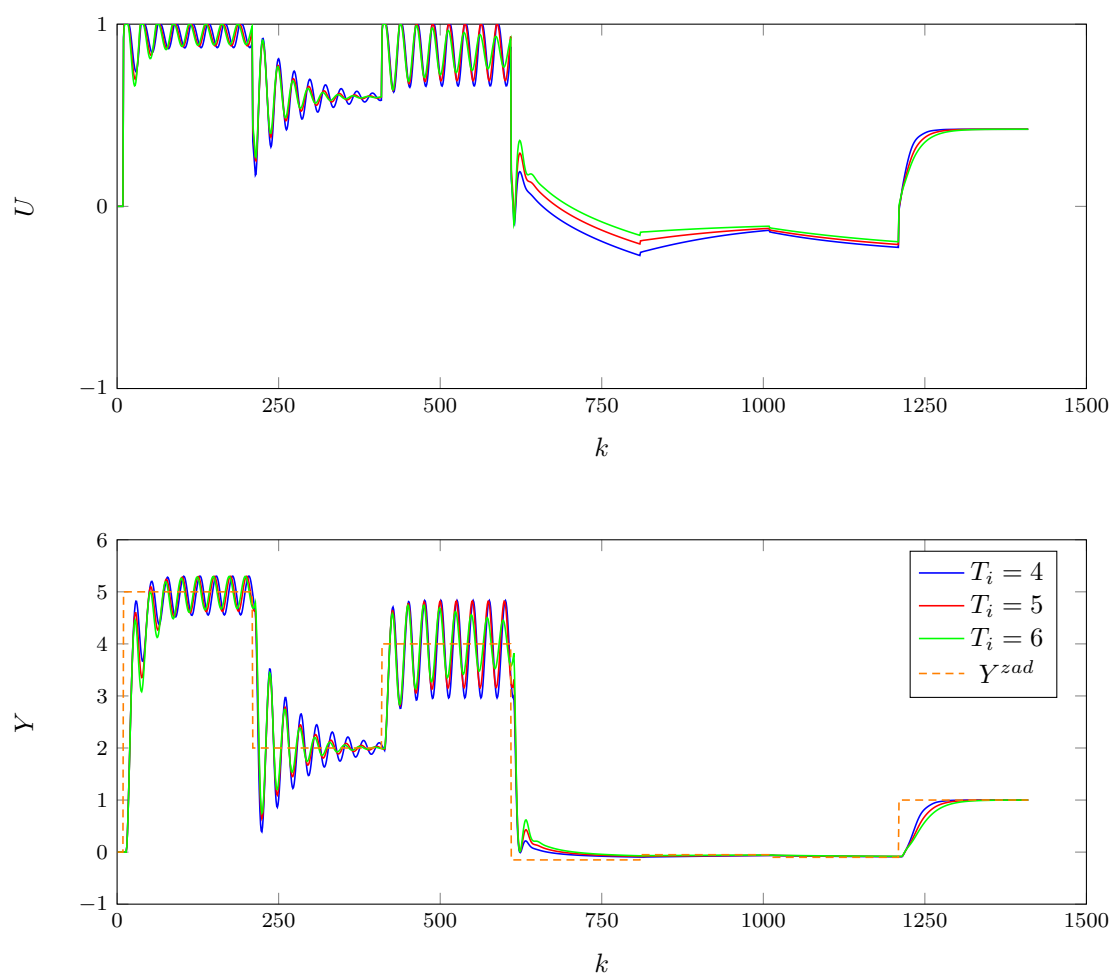
Kolejnym krokiem było eksperymentalne dobranie parametru T_i członu całkującego I. Dla przetestowanych T_i wartości wskaźnika jakości regulacji wynoszą odpowiednio:

— $T_i = 4 - E = 580,4906$

— $T_i = 5 - E = 572,9324$

— $T_i = 6 - E = 588,6638$

Dla $T_i = 6$ występuje najgorsza wartość wskaźnika jakości, a dla $T_i = 4$ największe oscylacje. Dla $T_i = 5$ wskaźnik jest już mniejszy, jednakże w dalszym ciągu nie udało się zminimalizować oscylacji dla górnego przedziału. Do dalszych rozważań została przyjęta wartość $T_i = 5$. Poszczególne próby przedstawiono na wykresie *rys.5.2*.



Rys. 5.2. Dobór T_i

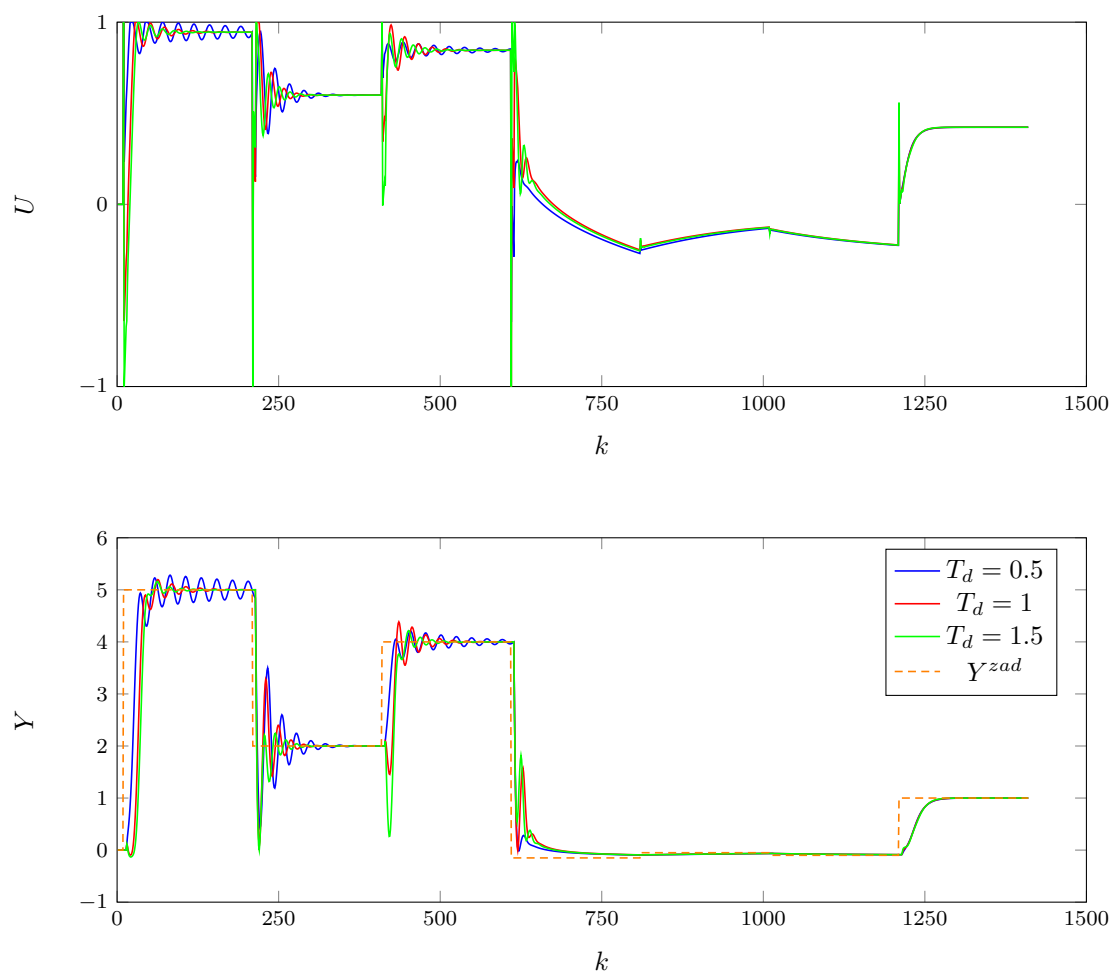
Na koniec eksperymentalnie dobraliśmy parametr T_d rys.5.3. Dla przetestowanych T_d wartości wskaźnika jakości regulacji wynoszą odpowiednio:

— $T_d = 0,5 - E = 574,4522$

— $T_d = 1 - E = 848,4233$

— $T_d = 1,5 - E = 997,3817$

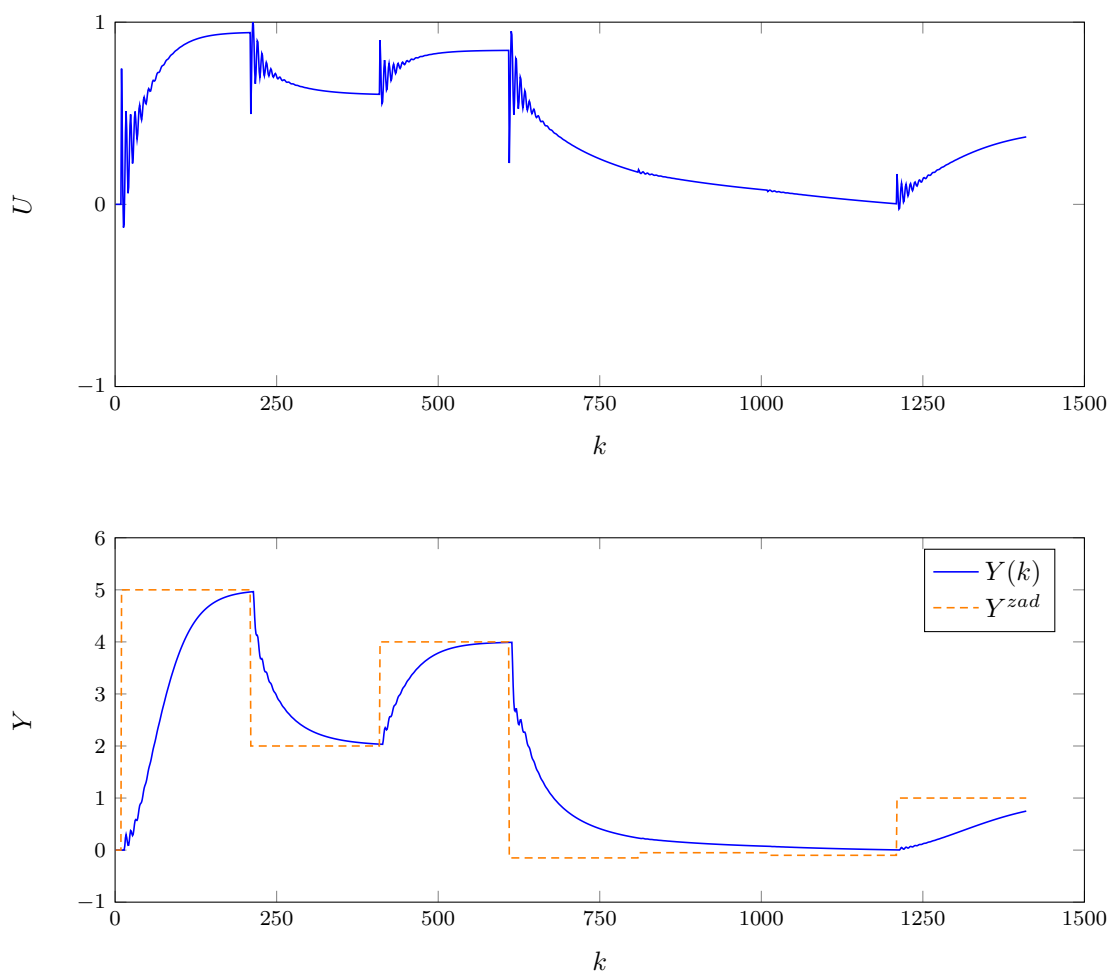
Dla $T_d = 0,5$ występuje najlepszy wskaźnik jakości, ale największe oscylacje. Dla $T_d = 1,5$ występuje najgorszy wskaźnik jakości, ale najmniejsze oscylacje. Występowanie tzw. "szpili" wpływa negatywnie na ocenę jakościową. Wartość $T_d = 1$ jest wartością dającą kompromis między jakością regulacji, a jej przebiegiem. Niestety w dalszym ciągu nie otrzymaliśmy zadowalających wyników regulacji z tego powodu stwierdzamy, że regulacja nieliniowego obiektu zwykłym regulatorem jest nieskuteczna.



Rys. 5.3. Dobór T_d

5.2. DMC

Parametry algorytmu *DMC* dobraliśmy całkowicie eksperymentalnie poczynając od wartości $N = 100, N_u = 100, \lambda = 10$ (przebieg dla początkowych nastaw znajduje się na wykresie rys.5.4). Następnie naszym celem było zmniejszenie parametrów regulatora przy jednoczesnym zachowaniu lub polepszeniu jakości sterowania.



Rys. 5.4. Podstawowy DMC

Zaczęliśmy od parametru N . Dla przetestowanych wartości otrzymaliśmy podane wartości wskaźnika jakości:

- $N = 8 - E = 1,8781e + 03$
- $N = 9 - E = 1,8708e + 03$
- $N = 10 - E = 1,8829e + 03$

Nie ulega on znacznym zmianom, więc nie będzie miał na tym etapie kluczowej roli. Niestety zmiany zachodzące na wykresach są niezauważalne z tego względu nie zostały one tutaj udokumentowane. Do dalszych obserwacji wykorzystujemy wartość $N = 9$.

Kolejnym krokiem było dobranie horyzontu N_u . Z właściwości algorytmu *DMC* na pierwszy rzut oka wynika, że wartość $N_u > N$ jest bez sensu. Z tego powodu zaczęliśmy dobieranie od wartości $N_u = N = 9$. Dla wybranych punktów otrzymaliśmy wartości wskaźnika jakości równe odpowiednio:

- $N_u = 9 - E = 1,8708e + 03$
- $N_u = 4 - E = 1,8706e + 03$
- $N_u = 3 - E = 1,8673e + 03$
- $N_u = 2 - E = 1,8909e + 03$

Niestety zmiany zachodzące na wykresach są tutaj także niezauważalne z tego względu nie zostały one tutaj udokumentowane. Do dalszych obserwacji wykorzystujemy wartość $N_u = 3$, gdyż posiada najmniejszy wskaźnik jakości.

Ostatnim parametrem wymagającym regulacji w algorytmie *DMC* była λ . Ku naszemu zdziwieniu zarówno zwiększanie jak i zmniejszanie λ nie przyniosło poprawy wyników regulacji. Wskaźnik jakości dla przetestowanych wartości wynosił odpowiednio:

- $\lambda = 6 - E = 1,7815e + 03$
- $\lambda = 5 - E = 1,7515e + 03$
- $\lambda = 4 - E = 1,7915e + 03$

Z powodu wysokiej błędności regulacji oraz minimalnej różnicy między nimi, w tym wypadku wykresy ponownie się pokryły. Odczyt z nich jakichkolwiek zmian przy podstawowej skali byłby niemożliwy, dlatego nie zostały one zamieszczone. Od początku do końca testów obowiązuje nas wykres rys.5.4.

W świetle otrzymanych wyników stwierdzamy, że zwykły algorytm *DMC*, także jest nieskuteczny przy nieliniowym obiekcie.

6. Zadanie 5: Rozmyty regulator PID

6.1. Funkcja przynależności

W celu przeprowadzenia regulacji rozmytej musimy określić funkcję przynależności. Zdecydowaliśmy się na sigmoidalną postać funkcji mającą wzór:

— dla najniższego przedziału:

$$\mu_{y_1}(y(k)) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-d_1(y(k) - c_1))} \quad (6.1)$$

— dla środkowych przedziałów:

$$\mu_{y_x}(y(k)) = \frac{1}{1 + \exp(-d_{x,1}(y(k) - c_{x,1}))} - \frac{1}{1 + \exp(-d_{x,2}(y(k) - c_{x,2}))} \quad (6.2)$$

— dla najwyższego przedziału:

$$\mu_{y_n}(y(k)) = \frac{1}{1 + \exp(-d_n(y(k) - c_n))} \quad (6.3)$$

gdzie:

- d_x to współczynnik określający pochylenie funkcji przynależności
- c_x to wartość dla której współczynnik przynależności osiąga wartość 0.5
- n to ilość regulatorów lokalnych w danej regulacji rozmytej

Dla regulacji algorytmem PID przyjęliśmy dla wszystkich zakresów $d_x = 10$. Dodatkowo 2 sąsiadujące ze sobą regulatory lokalne osiągają wartość przynależności 0,5 w tym samym miejscu (mają wspólne c). Sterowanie w regulacji rozmytej oblicza się natomiast za pomocą średniej ważonej wykorzystującej wartości przynależności i sterowań dla poszczególnych przedziałów:

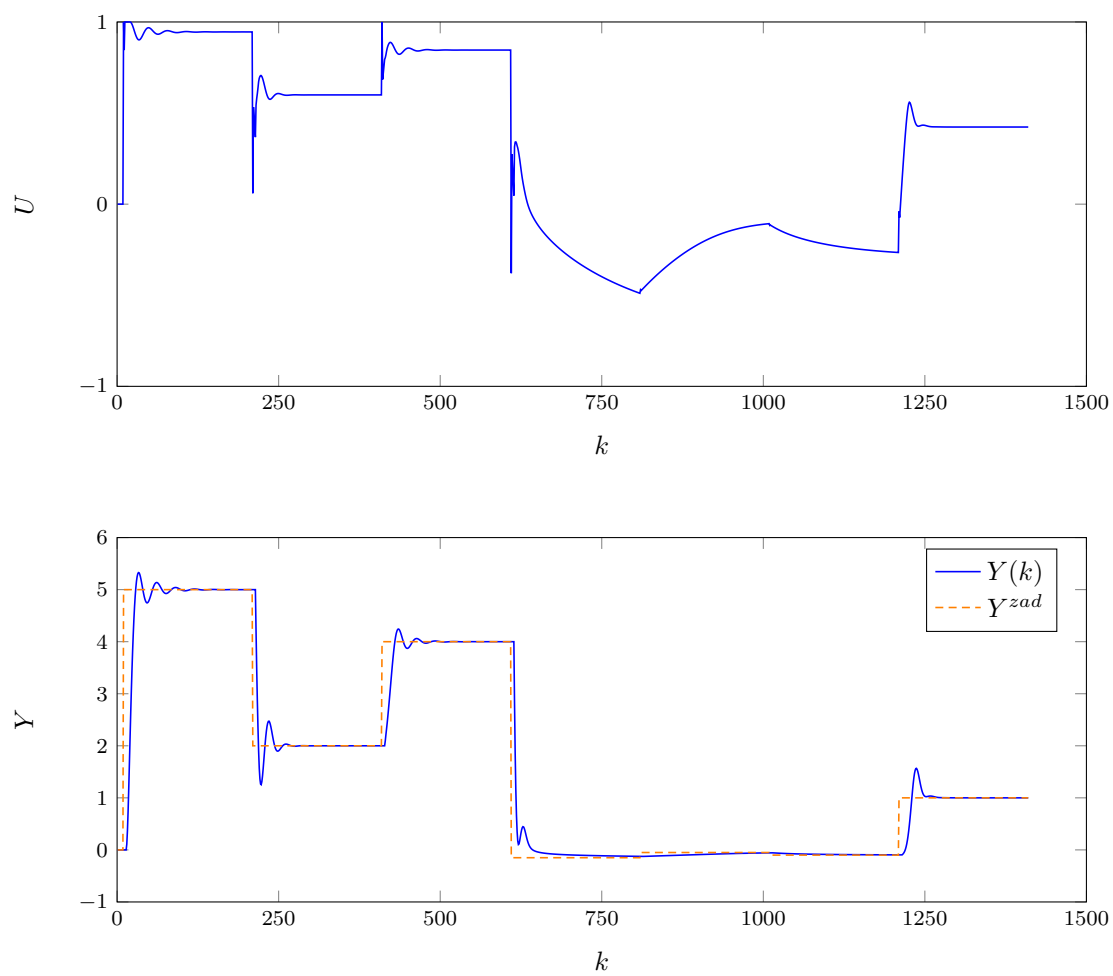
$$u(k) = \frac{\sum_{x=1}^n \mu_{y_x}(y(k)) * u^x(k)}{\sum_{x=1}^n \mu_{y_x}(y(k))} \quad (6.4)$$

6.2. Dwa regulatory lokalne

Z wyglądu charakterystyki statycznej wyraźnie widać, że regulowana przez nas funkcja ma 2 skrajne przedziały liniowe i nieliniowy fragment łączący je. Wobec tego 2 regulatory lokalne powinny wystarczyć. Przyjęliśmy $c=0,5$. Po wielokrotnych testach otrzymaliśmy następujące nastawy regulatorów:

1. $K=0,1$ $T_i=1$ $T_d=0,4$
2. $K=0,11$ $T_i=3$ $T_d=0,8$

Obliczony błąd regulacji wynosił: 462,2845. Przebieg regulacji przedstawiliśmy poniżej na rysunku 6.1. Jak widać zarówno przebieg jak i wartość wskaźnika jakości w tym przypadku są znacznie lepsze niż dla regulatora pojedynczego. Sygnał wyjściowy osiąga każdą z wartości zadanych, a błąd jest prawie o połowę mniejszy. Choć jakość regulacji jest tu zadowalająca i można by na tym poprzestać dalej przedstawimy także wyniki dla większej liczby regulatorów lokalnych.



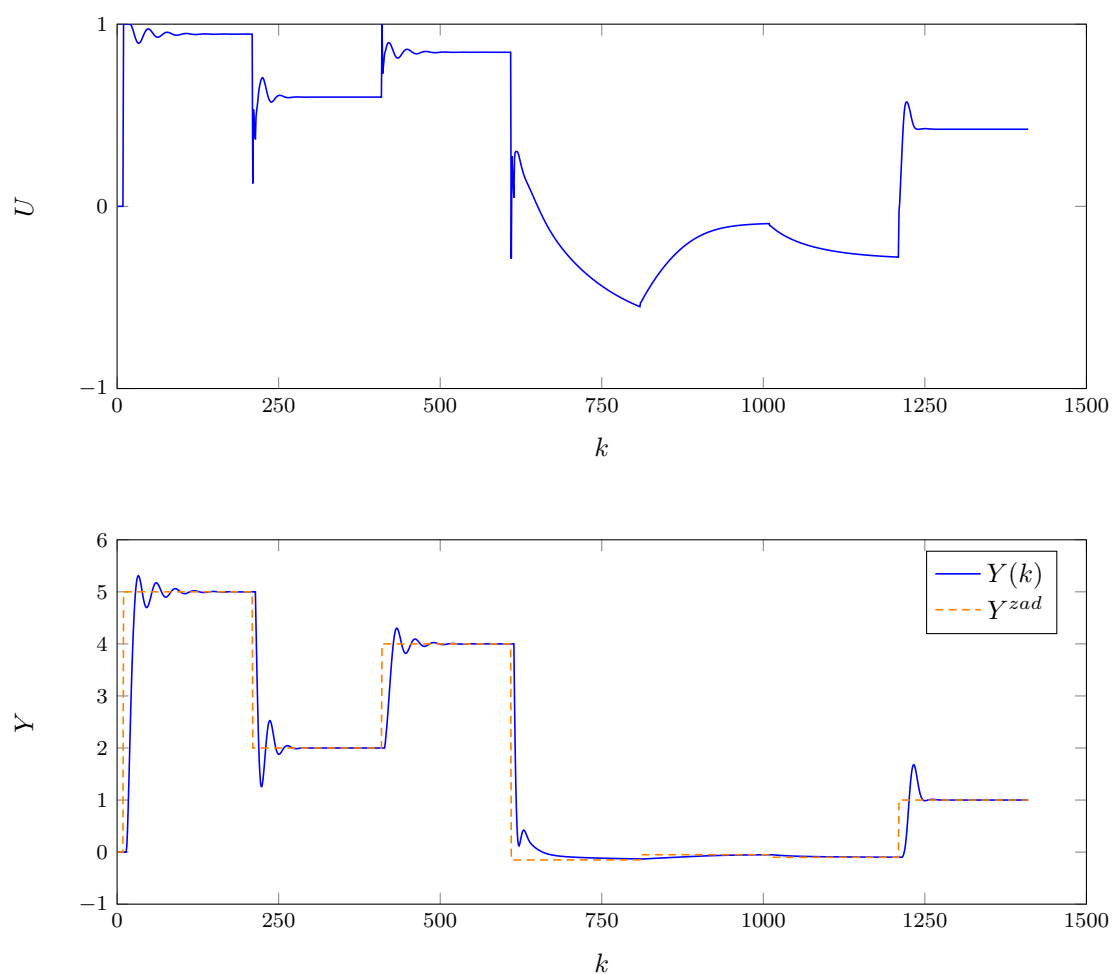
Rys. 6.1. Dwa regulatory lokalne

6.3. Trzy regulatory lokalne

Mając trzy regulatory lokalne przyjęliśmy kolejno $c=[-0,05 \ 1,4]$ (wartości c wypisywane będą od tego momentu zawsze od najniższego do najwyższego regulatora). Otrzymane przez nas optymalne nastawy regulatorów to:

1. $K=0,21 \ T_i=1 \ T_d=0,01$
2. $K=0,08 \ T_i=2 \ T_d=0,5$
3. $K=0,11 \ T_i=3 \ T_d=0,7$

Wartość błędu średniokwadratowego wynosiła: 460,0519. Błąd jest niemalże taki sam jak dla dwóch regulatorów. Nie zaszła także żadna widoczna zmiana w przebiegu sygnału wyjściowego. Na tej podstawie możemy powiedzieć, że zastosowanie trzech regulatorów nie ma tu sensu, ponieważ nie wnosi poprawy regulacji zwiększając przy tym złożoność obliczeniową. Wyniki dla tego regulatora przedstawiliśmy poniżej na wykresie 6.2.



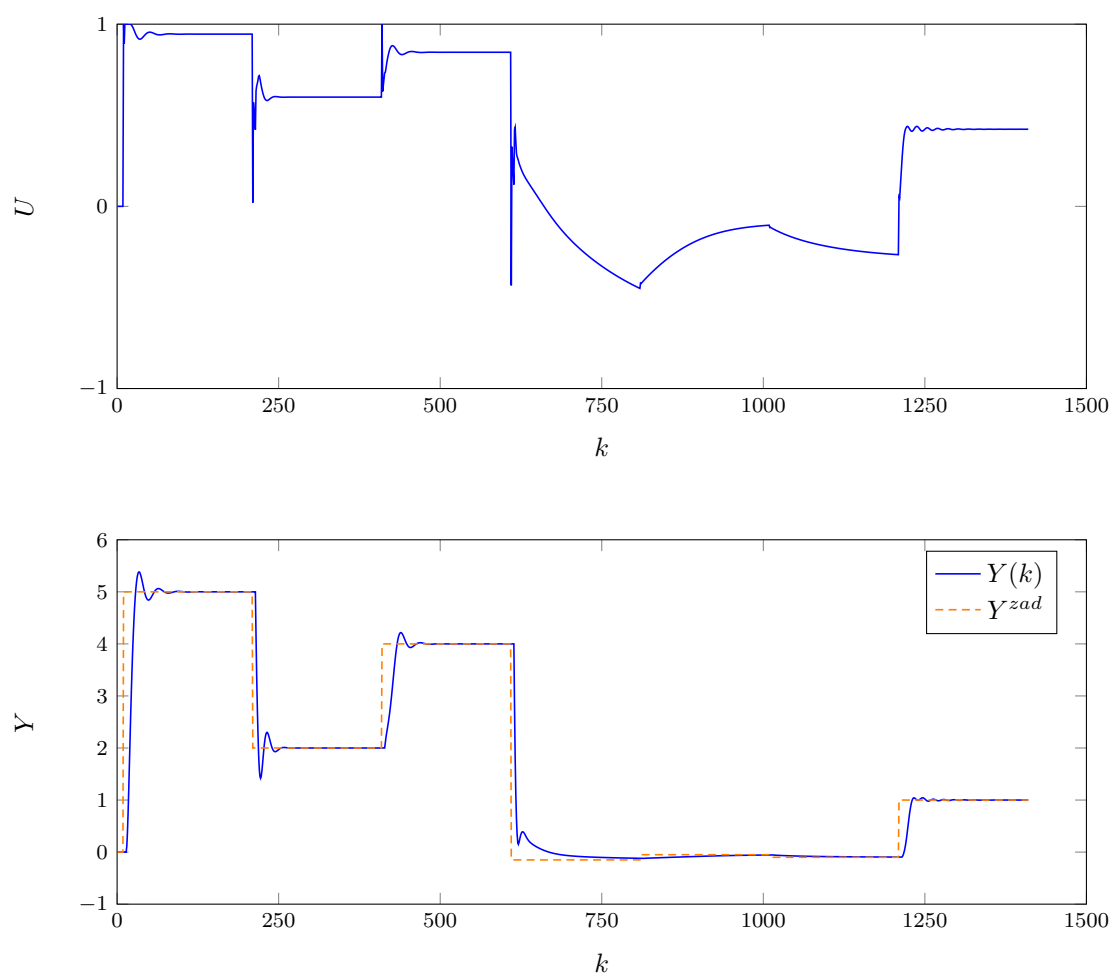
Rys. 6.2. Trzy regulatory lokalne

6.4. Cztery regulatory lokalne

Mając trzy regulatory lokalne przyjęliśmy kolejno $c=[-0,05 \ 0,5 \ 1,4]$. Otrzymane przez nas optymalne nastawy regulatorów to:

1. $K=0,32 \ T_i=2 \ T_d=0,1$
2. $K=0,02 \ T_i=1 \ T_d=1,2$
3. $K=0,27 \ T_i=3 \ T_d=1,3$
4. $K=0,1 \ T_i=3 \ T_d=1$

Wartość błędu średniokwadratowego wynosiła: 460,1370. Choć błąd jest niemalże taki sam jak w poprzednich przypadkach, dodanie czwartego regulatora zmniejszyło znacznie oscylacje sygnału wyjściowego przy skoku wartości zadanej. Na tej podstawie możemy powiedzieć, że zastosowanie czterech regulatorów jest tutaj korzystniejsze. Wyniki dla tego regulatora przedstawiliśmy poniżej na wykresie 6.3.



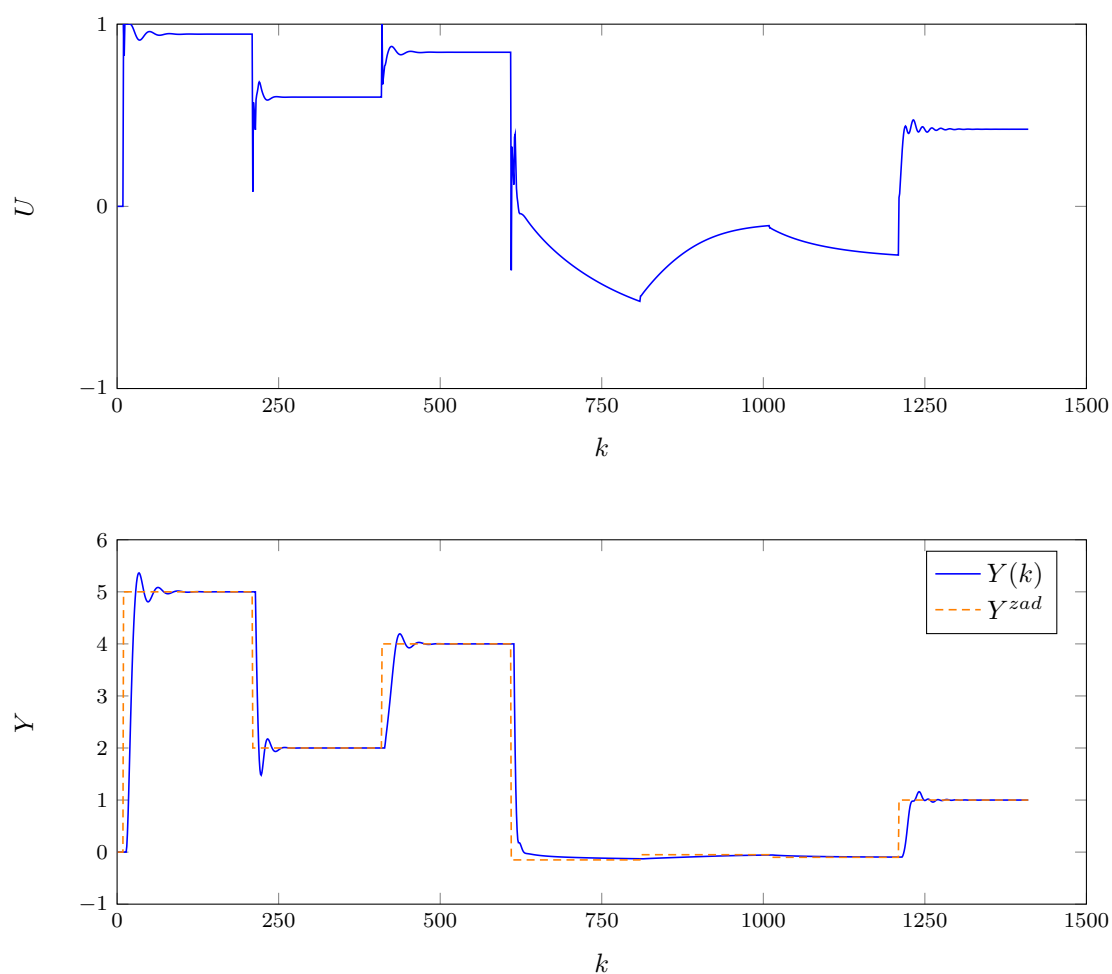
Rys. 6.3. Cztery regulatory lokalne

6.5. Pięć regulatorów lokalnych

Mając trzy regulatory lokalne przyjęliśmy kolejno $c=[-0,05 \ 0,25 \ 0,5 \ 1,4]$. Otrzymane przez nas optymalne nastawy regulatorów to:

1. $K=0,34 \ T_i=2 \ T_d=0,01$
2. $K=0,01 \ T_i=1 \ T_d=1,1$
3. $K=0,42 \ T_i=5 \ T_d=0,9$
4. $K=0,18 \ T_i=2 \ T_d=2,5$
5. $K=0,1 \ T_i=3 \ T_d=0,9$

Wartość błędu średniokwadratowego wynosiła: 454,7003. Błąd regulacji jest nieco niższy niż dla poprzednich przypadków. Przebieg wykresu także nieco się poprawił, zwłaszcza dla czwartego skoku wartości zadanej. Wyniki dla tego regulatora przedstawiliśmy poniżej na wykresie 6.4.



Rys. 6.4. Pięć regulatorów lokalnych

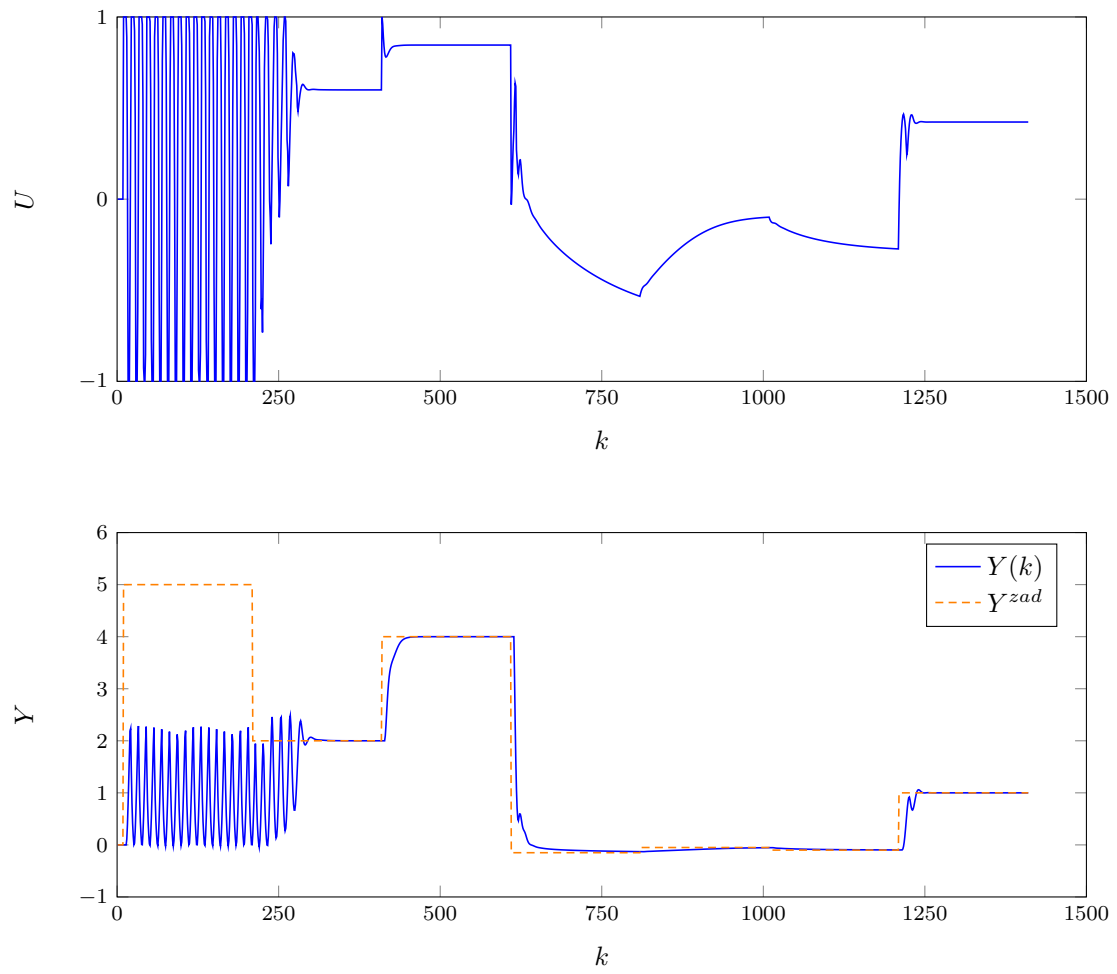
6.6. Podsumowanie rozmytego PID

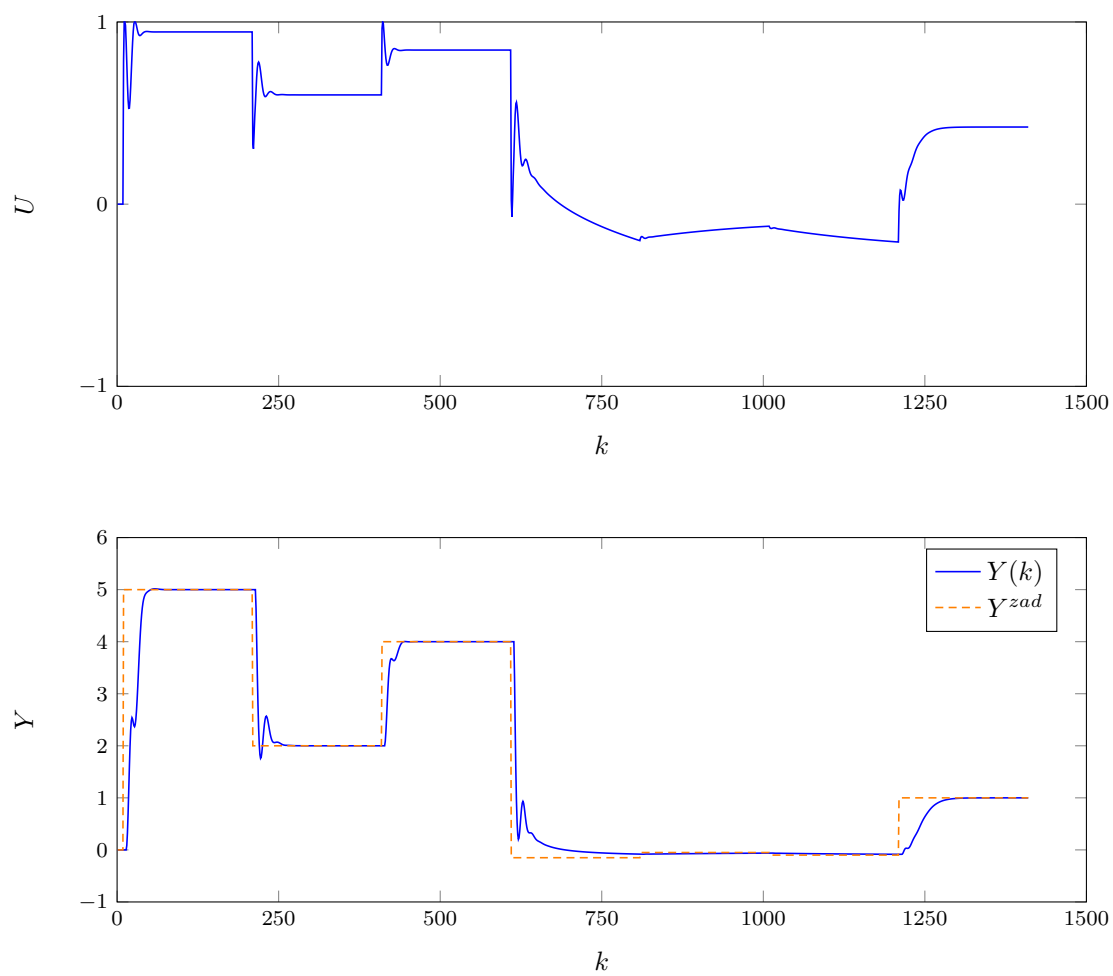
Z użyciem rozmytego regulatora PID udało się uzyskać znacznie lepsze wyniki regulacji niż przy pojedynczym PID'zie. Najlepszy przebieg i najmniejszą wartość wskaźnika jakości otrzymaliśmy dla pięciu regulatorów lokalnych. Należy jednak pamiętać, że im więcej regulatorów lokalnych tym większa złożoność obliczeniowa algorytmu. Ponieważ posiadany obiekt to jedynie funkcja w Matlabie, to niezależnie od ilości algorytmów regulacja wykonuje się niemalże natychmiastowo. Gdybyśmy jednak mieli do czynienia z obiektem rzeczywistym, to w zależności od jego charakteru moglibyśmy stwierdzić, że lepiej wykorzystać tylko dwa regulatory lokalne w celu zaoszczędzenia czasu obliczeń.

7. Zadanie 6: Rozmyty regulator DMC

7.1. Funkcja przynależności

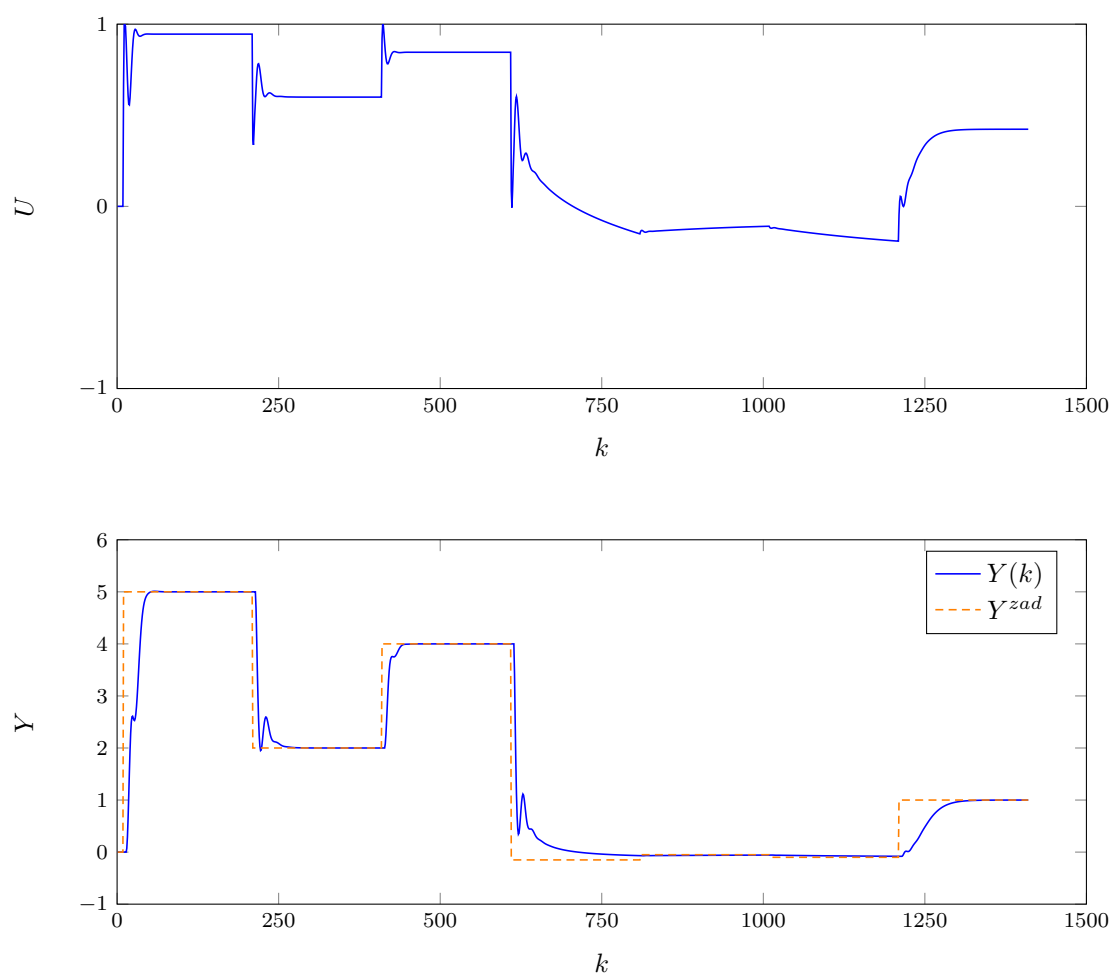
Wartości wskaźnika przynależności μ dla regulatora DMC liczyliśmy tak samo jak dla regulatora PID. Zmienił się jednak sposób liczenia sterowania. Ponieważ w regulatorze DMC nowe sterowanie $u(k)$ obliczane jest poprzez dodanie do poprzedniego sterowania $u(k-1)$ wartości zmiany sterowania $\Delta u(k)$ obliczonej z DMC to logicznym wydaje się uśrednianie $\Delta u(k)$ i dopiero obliczanie aktualnego sterowania. Dodatkowo zdecydowaliśmy się na zmianę wartości parametrów d funkcji przynależności z $d=10$ na $d=0,4$. Zmiana ta wynika z tego, że mimo wielokrotnych testów wyniki dla $d=10$ były bardzo niezadowalające, sygnał wyjściowy wpadał w oscylacje i odmawiał dążenia do wartości zadanej. Poniżej przedstawiliśmy wykresy pokazujące wyższość nowej wartości d nad starą (7.1 i 7.2). Dla regulatora DMC potrzebne były także odpowiednie dla konkretnych przedziałów odpowiedzi skokowe. Dla najniższego przedziału używaliśmy odpowiedzi uzyskanej przy zmianie sterowania z -1 na $-0,9$, a dla najwyższego z $0,9$ na 1 . Dla reszty przedziałów używaliśmy odpowiedzi otrzymanych przy skokach z dolnego c do górnego c dla danego przedziału. Wszystkie używane odpowiedzi były oczywiście znormalizowane do postaci używanej w algorytmie DMC. Dla wszystkich regulatorów lokalnych używaliśmy jednakowych wartości N i N_u wynoszących odpowiednio 15 i 1 . Wartości te różnią się od tych dla pojedynczego DMC, ponieważ jego nastawy i tak nie dawały zadowalających wyników, a po przeprowadzeniu licznych testów zauważyliśmy, że działają one lepiej. Wartość λ ustaliliśmy neutralnie na 10 (jej wartość i tak będziemy dobierać w zadaniu 7).

Rys. 7.1. $d = 10$

Rys. 7.2. $d = 0,4$

7.2. Dwa regulatory lokalne

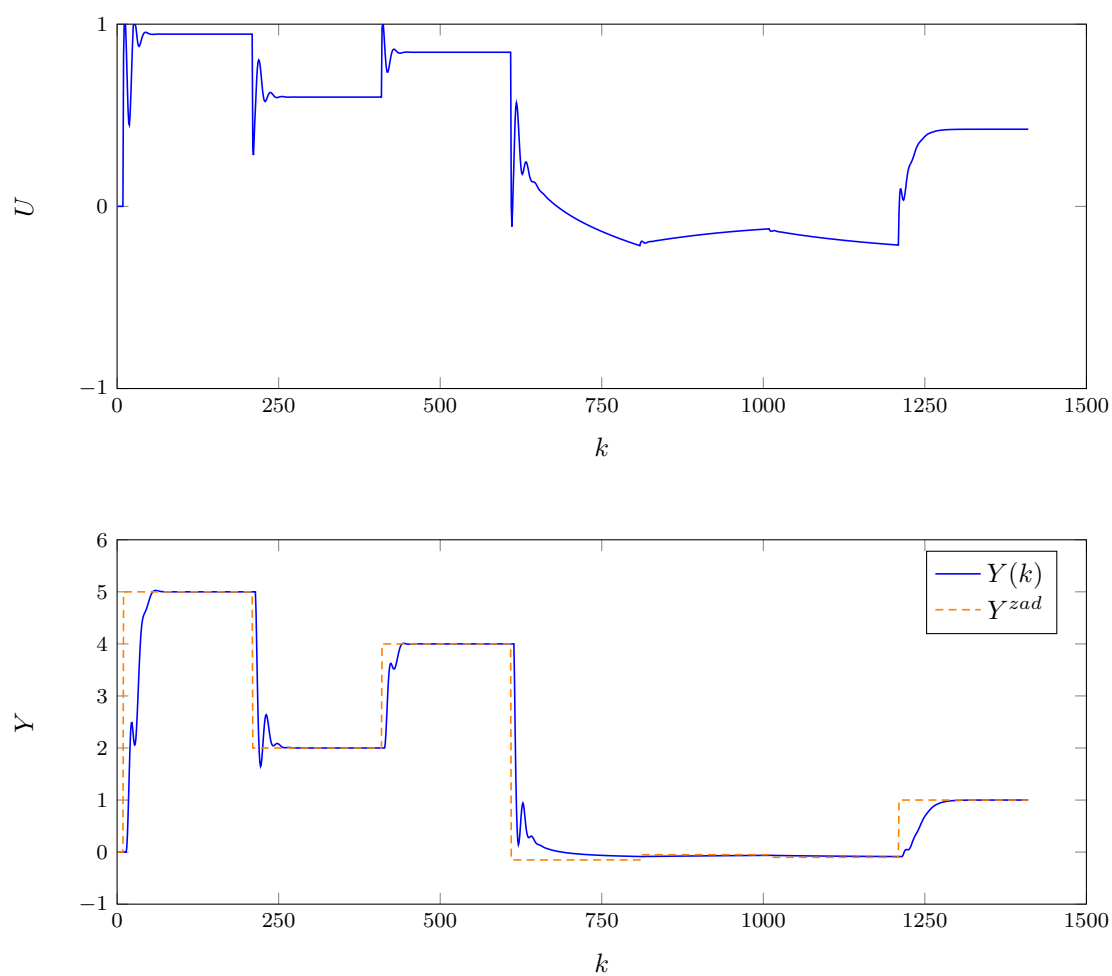
Z wyglądu charakterystyki statycznej wyraźnie widać, że regulowana przez nas funkcja ma 2 skrajne przedziały liniowe i nieliniowy fragment łączący je. Wobec tego 2 regulatory lokalne powinny wystarczyć. Przyjęliśmy $c=0,5$. Otrzymany przebieg przedstawiliśmy na wykresie 7.3. Obliczony błąd regulacji wynosił: 568,1155. Jest to wynik o wiele lepszy niż dla zwykłego DMC. Choć regulatorowi nie udało się w każdym przypadku osiągnąć dokładnie wartości zadanej (co widać przy czwartym skoku), to ogólny przebieg jest raczej zadowalający.



Rys. 7.3. Dwa regulatory lokalne

7.3. Trzy regulatory lokalne

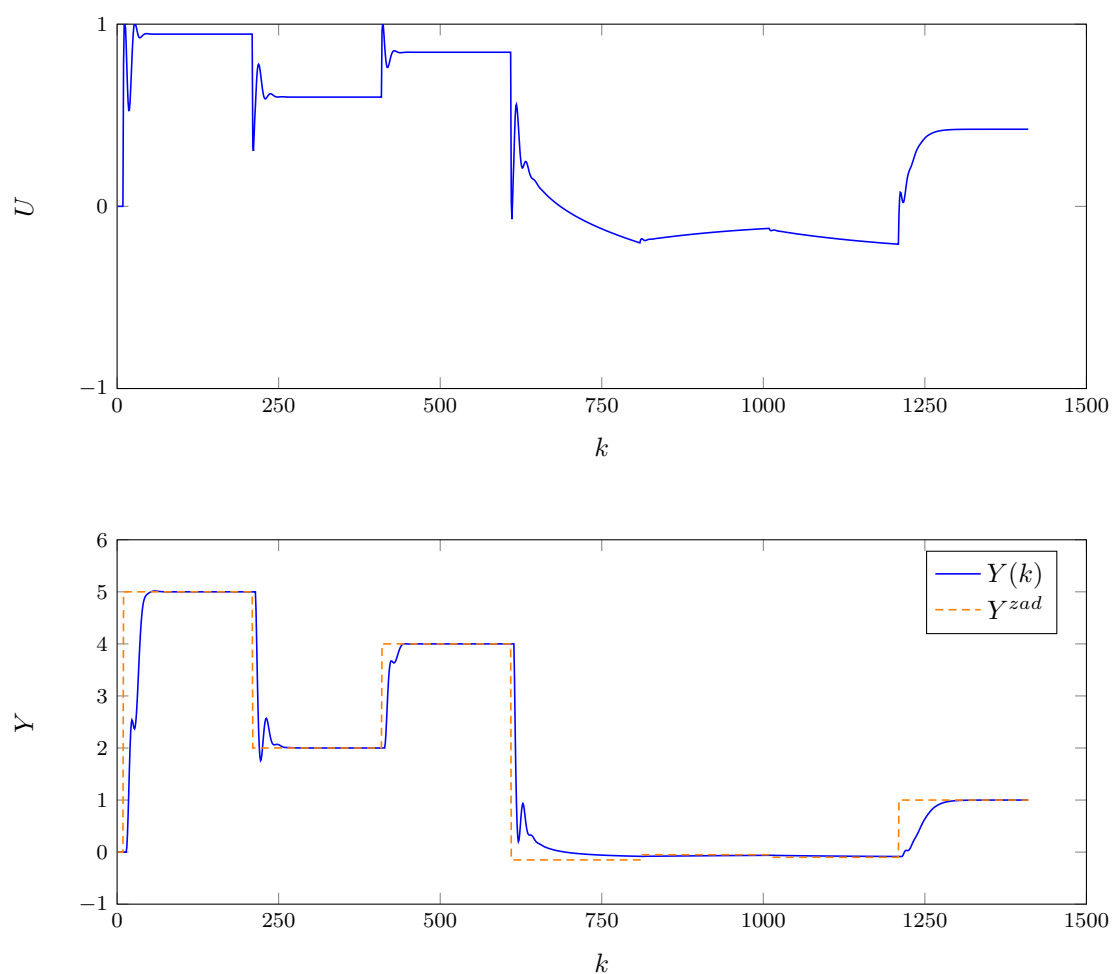
Mając trzy regulatory lokalne przyjęliśmy kolejno $c=[-0,05 \ 1,4]$. Otrzymany przebieg przedstawiliśmy na wykresie 7.4. Obliczony błąd regulacji wynosił: 565,2050. Wartość wskaźnika jakości jest niewiele lepsza niż w poprzednim podpunkcie. Nie widać także żadnej znaczącej zmiany w przebiegu regulacji.



Rys. 7.4. Trzy regulatory lokalne

7.4. Cztery regulatory lokalne

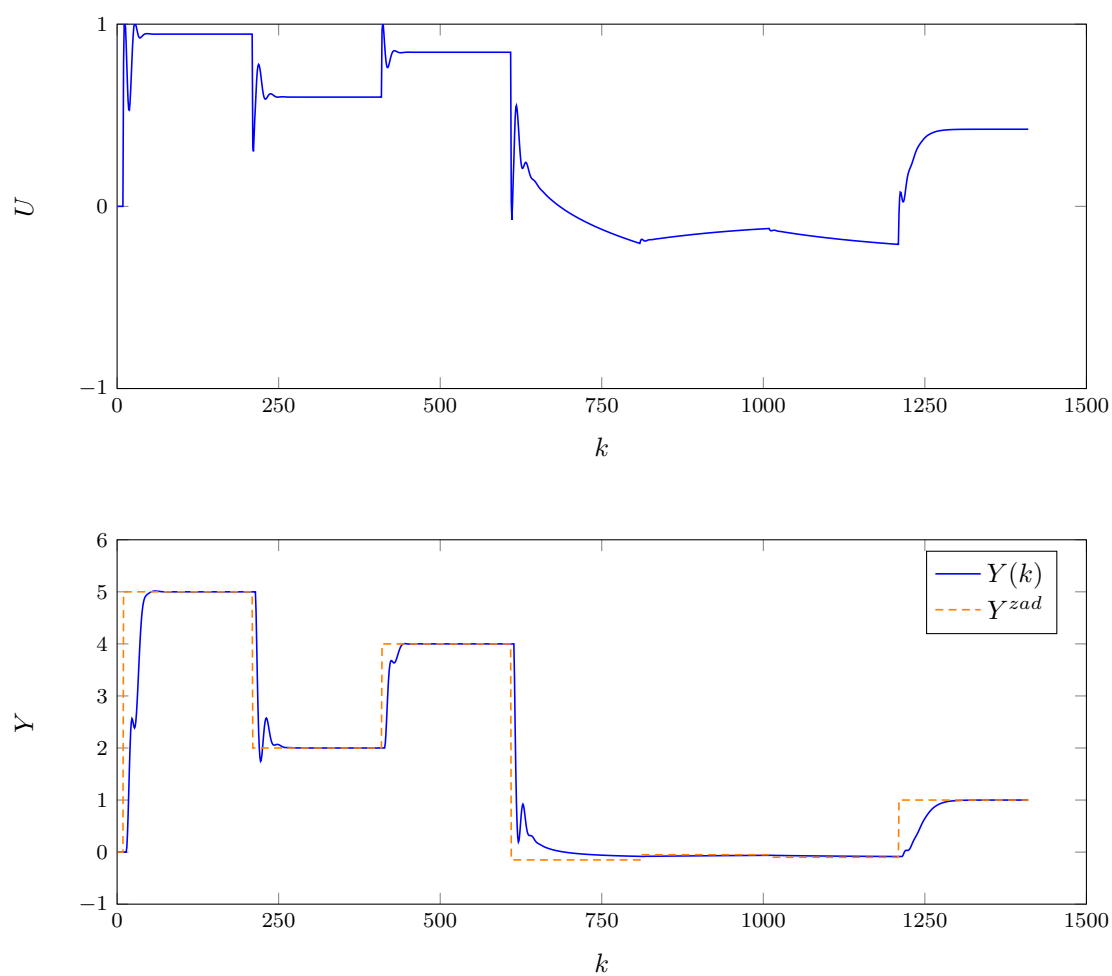
Mając trzy regulatory lokalne przyjęliśmy kolejno $c=[-0,05 \ 0,5 \ 1,4]$. Otrzymany przebieg przedstawiliśmy na wykresie 7.5. Obliczony błąd regulacji wynosił: 553,4929. Wartość wskaźnika jakości jest nieco lepsza niż dla trzech i dwóch regulatorów lokalnych. Polepszenia w przebiegu sygnału wyjściowego są nieduże, ale widoczne gołym okiem (szczególnie dla pierwszego i trzeciego skoku wartości zadanej).



Rys. 7.5. Cztery regulatory lokalne

7.5. Pięć regulatorów lokalnych

Mając trzy regulatory lokalne przyjęliśmy kolejno $c=[-0,05 \ 0,25 \ 0,5 \ 1,4]$. Otrzymany przebieg przedstawiliśmy na wykresie 7.6. Obliczony błąd regulacji wynosił: 551,9820. Choć wartość wskaźnika jakości jest nieco lepsza niż dla innych konfiguracji, to w porównaniu do poprzedniego podpunktu nie widać żadnych znaczących zmian w przebiegu regulacji.



Rys. 7.6. Pięć regulatorów lokalnych

7.6. Podsumowanie DMC

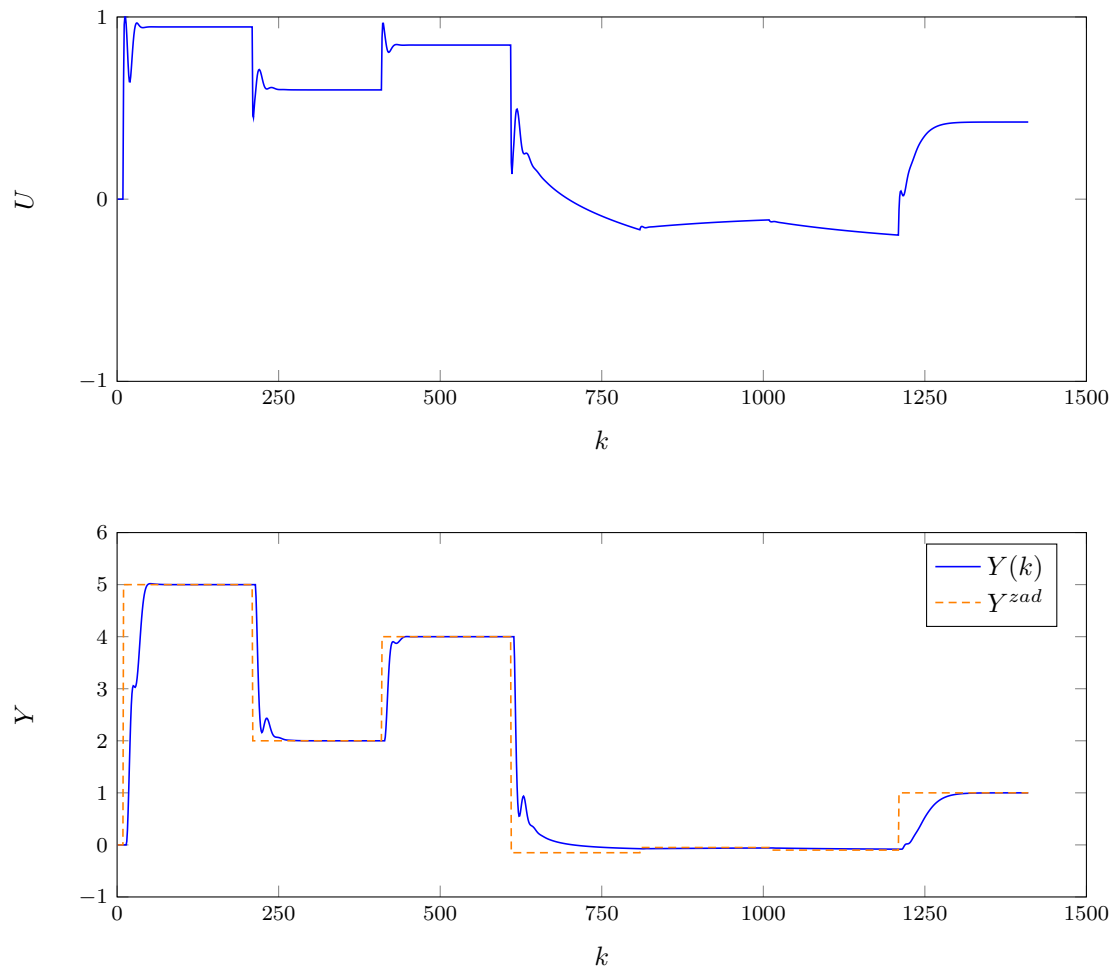
Otrzymany rozmyty DMC działa lepiej niż zwykły. Błąd regulacji jest kilkukrotnie mniejszy, a otrzymane przebiegi gładsze. Najlepszy przebieg jak i najniższą wartość wskaźnika jakości otrzymana została dla pięciu regulatorów lokalnych. Mimo wszystko dla naszego obiektu rozmyty algorytm DMC bez zmiany parametru λ nie jest tak dokładny jak rozmyty PID.

8. Zadanie 7: Dobór parametrów lambda regulatora DMC

W poprzednim zadaniu zajmowaliśmy się jedynie zakresami i funkcjami przynależności regulatorów lokalnych, nie zwracając uwagi na inne parametry DMC, takie jak N , N_u i λ . Choć zmniejszanie dwóch pierwszych zazwyczaj nie przynosi znacznej poprawy w regulacji, a jedynie zmniejsza złożoność obliczeniową przypadku to trzeci z nich ma ogromny wpływ na jakość regulowanego sygnału wyjścia. Poniżej przedstawiamy działanie algorytmu regulacji DMC z tymi samymi funkcjami przynależności, ale z oddzielnie dobranymi wartościami λ dla każdego z regulatorów.

8.1. Dwa regulatory lokalne

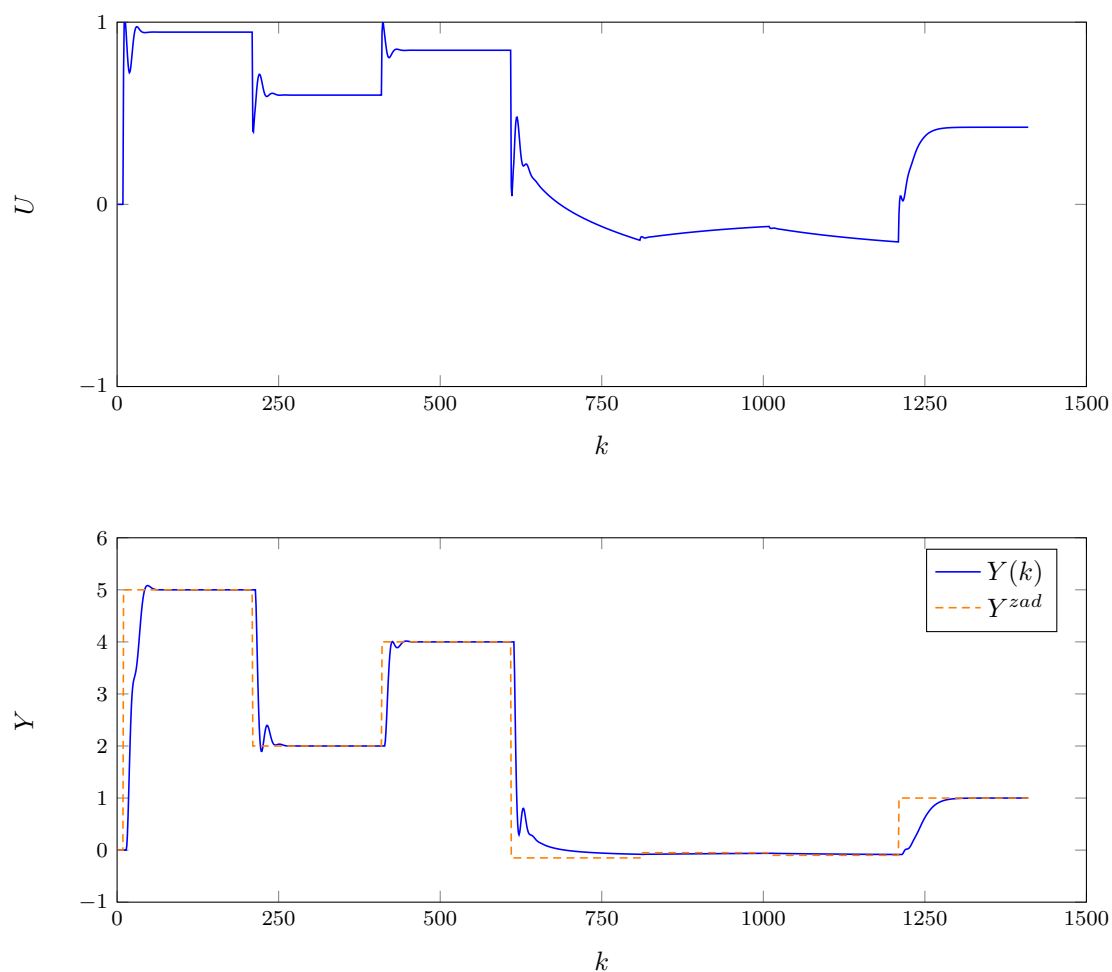
Poniżej na wykresie 8.1 przedstawiono otrzymany przebieg regulacji dla otrzymanych po wielu testach nastaw: $\lambda_1 = 11$, $\lambda_2 = 0,1$. Błąd regulacji wyniósł 558.6919. Jak widać spowodowało to kolosalną poprawę. Błąd regulacji jest niższy niż bez dobierania λ , ale nie aż tak dobry jak dla pięciu regulatorów w poprzednim zadaniu. Wygląd przebiegu natomiast jest lepszy niż którykolwiek wcześniejszy dla algorytmu DMC. Jak mogło by się spodziewać dobranie odpowiednich λ znacznie poprawiło jakość regulacji.



Rys. 8.1. Dwa regulatory lokalne

8.2. Trzy regulatory lokalne

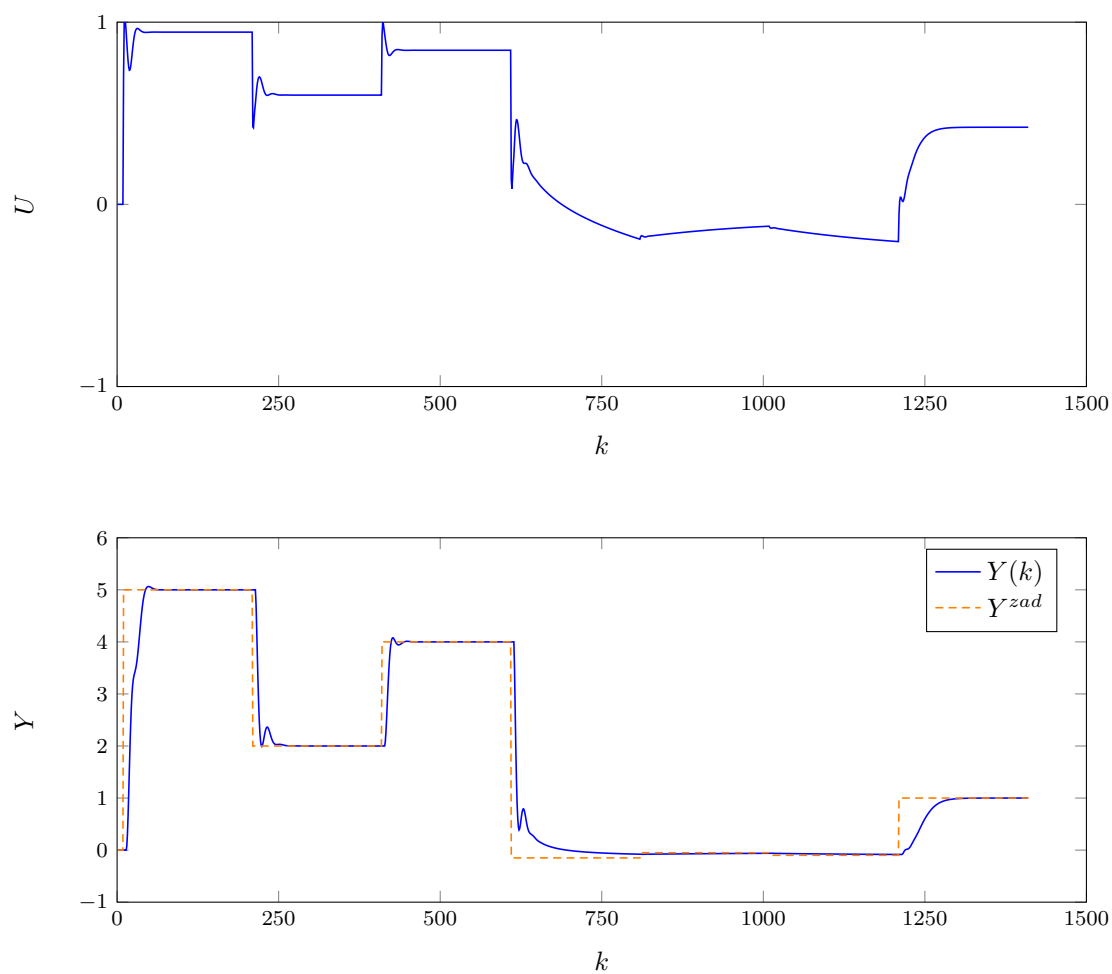
Dla trzech regulatorów lokalnych w wyniku testowania otrzymaliśmy nastawy $\lambda_1 = 100$, $\lambda_2 = 0,1$ i $\lambda_3 = 0,1$ oraz błąd regulacji zaledwie 521,8022. Choć w porównaniu do poprzedniego podpunktu poprawa przebiegu jest na pierwszy rzut oka niewidoczna, to błąd jest najniższy spośród wszystkich wyliczonych dla regulatora DMC. Oznacza to, że przy dobieraniu λ dla ledwie trzech regulatorów lokalnych (8.2) otrzymaliśmy lepsze wyniki niż dla pięciu regulatorów bez dobierania.



Rys. 8.2. Trzy regulatory lokalne

8.3. Cztery regulatory lokalne

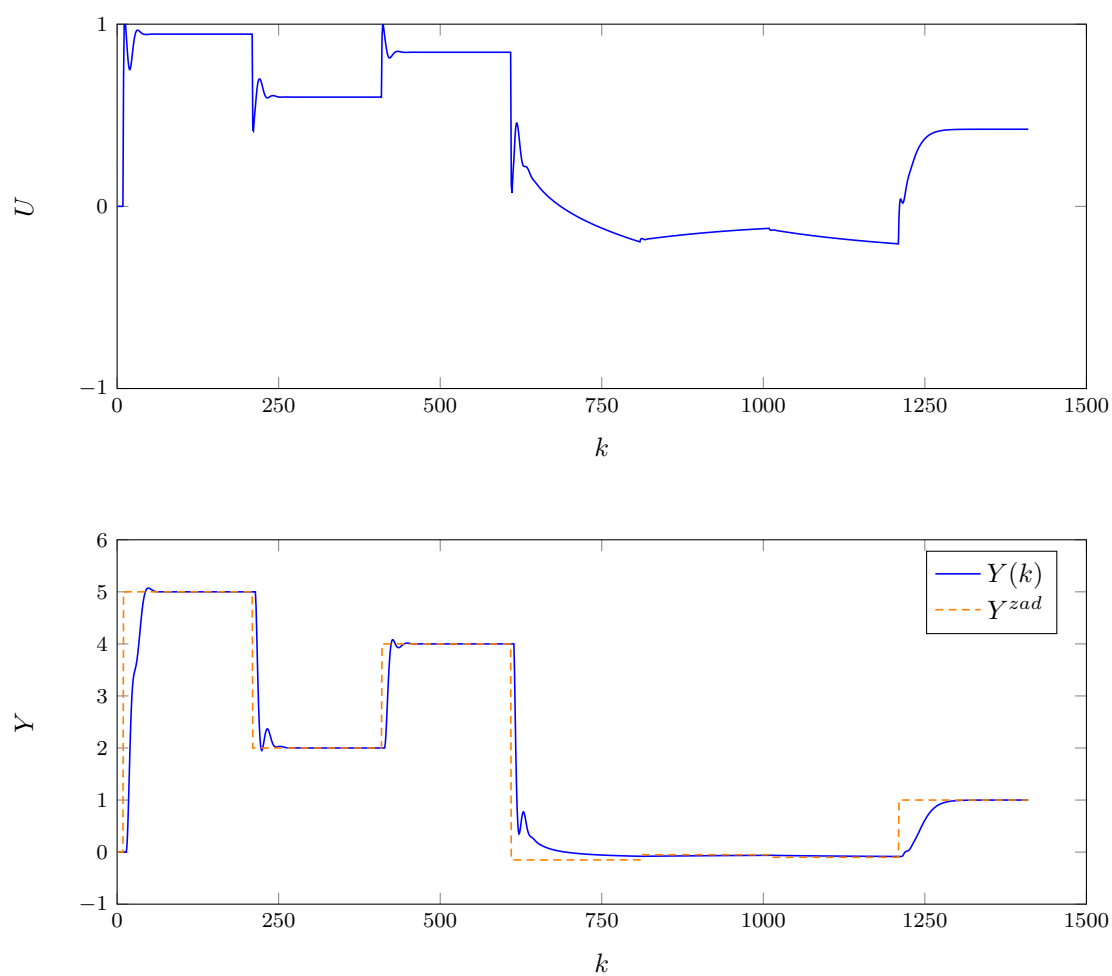
Regulacja dla czterech regulatorów lokalnych nie przyniosła lepszych rezultatów niż dla trzech. Co więcej dla dobranych nastaw $\lambda_1 = 32$, $\lambda_2 = 0,1$, $\lambda_3 = 0,1$ i $\lambda_4 = 0,1$, błąd regulacji uległ powiększeniu 526,0591. Przy braku widocznej poprawy w przebiegu regulacji możemy jednoznacznie stwierdzić, że nie jest to najlepsze rozwiązanie.



Rys. 8.3. Cztery regulatory lokalne

8.4. Pięć regulatorów lokalnych

Wynik dla ostatniej konfiguracji, pięciu regulatorów lokalnych, także nie przyniósł poprawy w stosunku do trzech regulatorów. Dla nastaw $\lambda_1 = 70$, $\lambda_2 = 0,1$, $\lambda_3 = 0,1$, $\lambda_4 = 0,1$ i $\lambda_5 = 0,1$ błąd wyniósł 521.6016 czyli niemalże tyle samo co dwa podpunkty wcześniej. W przebiegu także nie widać żadnej widocznej poprawy.



Rys. 8.4. Pięć regulatorów lokalnych

8.5. Podsumowanie DMC z dobranymi nastawami λ

Po dobraniu odpowiednich wartości parametrów λ regulatorów lokalnych regulacja uległa znacznej poprawie. Zarówno wartość wskaźnika jakości jak i wygląd przebiegu sygnału wyjściowego uległy poprawie. Najlepsze wyniki zostały otrzymane dla konfiguracji pięciu regulatorów, aczkolwiek wyniki dla trzech regulatorów są tak podobne do najlepszych, że gdybyśmy musieli minimalizować złożoność obliczeniową algorytmu wybralibyśmy go bez zwłoki. Niestety mimo dobrania jak najlepszych parametrów jakość regulacji nie jest lepsza niż najlepsza otrzymana dla regulatora PID. Choć co do przewagi wyglądu przebiegu regulacji można by się kłócić to błąd regulacji jest o około 70 wyższy. Choć jest to niespodziewane (regulator DMC zazwyczaj uzyskuje lepsze wyniki niż DMC), to można znaleźć bardzo proste wytłumaczenie tego zjawiska. Pierwsza możliwość jest taka, że posiadany przez nas obiekt jest na tyle specyficzny, że algorytm PID jest dla niego lepszy niż DMC. Drugą (bardziej prawdopodobną) możliwością jest to, że mimo wielokrotnych testów nie udało nam się dobrać najlepszych wartości parametrów.