

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)

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

Stanislau Stankevich, Rafał Bednarz, Ostrysz Jakub

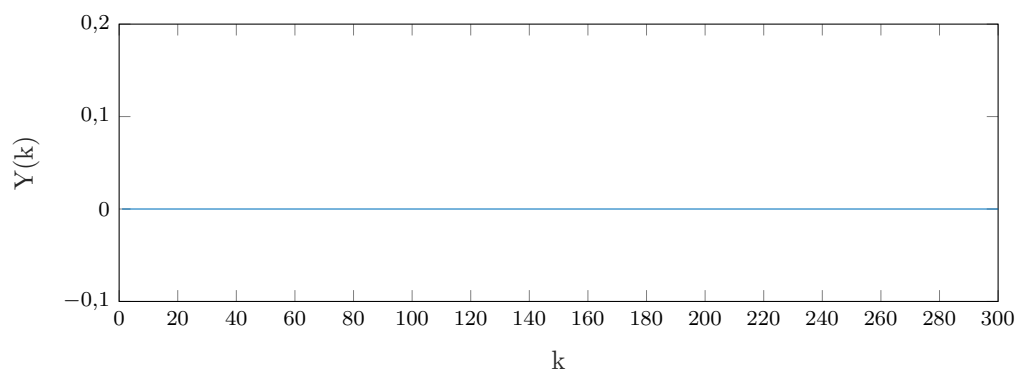
Warszawa, 2021

Spis treści

1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości	2
2. Odpowiedzi skokowe	3
2.1. Odpowiedzi skokowe	3
2.2. Charakterystyka statyczna	3
3. Algorytmy regulacji	5
3.1. Algorytm cyfrowy regulacji PID	5
3.2. Algorytm DMC w wersji analitycznej	5
4. Strojenie prostych regulatorów PID i DMC	6
4.1. Strojenie PID	6
4.1.1. Doprowadzenie układu do oscylacji krytycznych	6
4.1.2. Regulacja wynikająca z ZN	6
4.1.3. Dostrojenie metodą inżynierską	7
4.2. Strojenie DMC	12
5. Algorytmy rozmytej regulacji	20
6. Strojenie rozmytych regulatorów	21
6.1. Strojenie rozmytego PID	21
6.1.1. 2 regulatory lokalne	21
6.1.2. 3 regulatory lokalne	22
6.1.3. 4 regulatory lokalne	23
6.1.4. 5 regulatory lokalne	25
6.2. Strojenie rozmytego DMC	26
6.2.1. 2 regulatory lokalne	26
6.2.2. 3 regulatory lokalne	27
6.2.3. 4 regulatory lokalne	28
6.2.4. 5 regulatorów lokalnych	29
7. Dobór parametru lambda	31
7.0.1. 2 regulatory lokalne	31
8. Laboratorium	33
8.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy	33
8.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych	33
8.3. Testowanie regulatorów z laboratorium 1	35
8.3.1. PID z laboratorium 1	35
8.3.2. DMC z laboratorium 1	37

1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości

Żeby sprawdzić poprawność podanych wartości podajemy na wejście sterowanie $u = 0$ i patrzymy na jakiej wartości się ustali y .



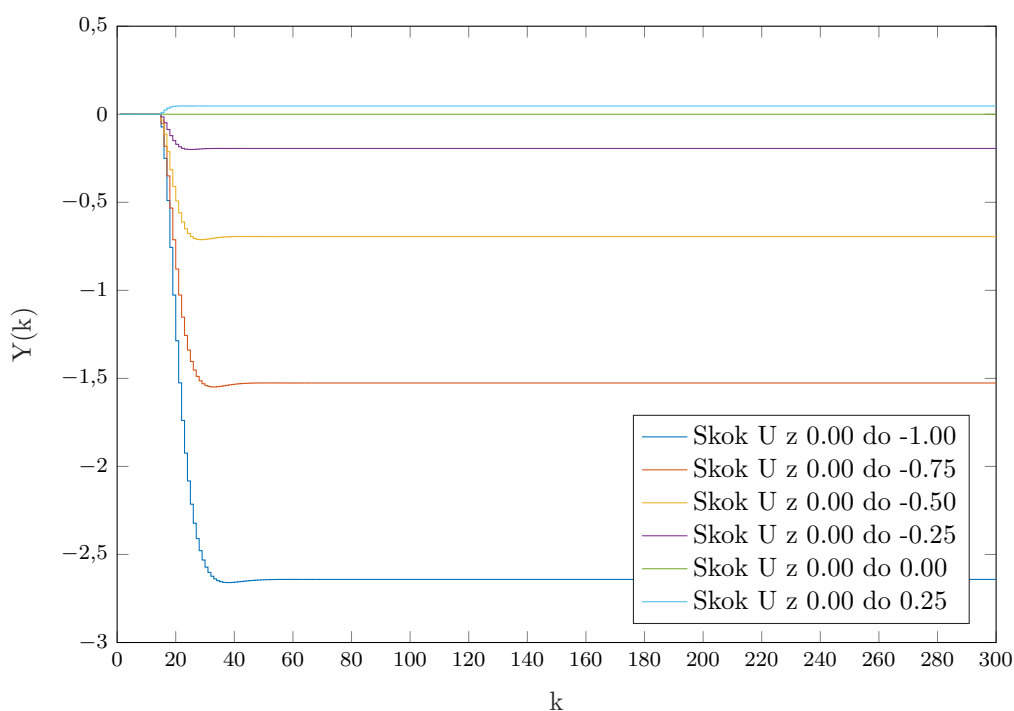
Rys. 1.1. Przebieg wyjścia obiektu przy stałym wejściu: $u = 0$

Jak możemy obserwować wyjście się ustala na poprawnej wartości, czyli na 0.

2. Odpowiedzi skokowe

Rozważamy punkt pracy oraz 5 różnych wartości skoku, z zera do: -1 , $-0,75$, $-0,5$, $-0,25$, $0,25$.

2.1. Odpowiedzi skokowe



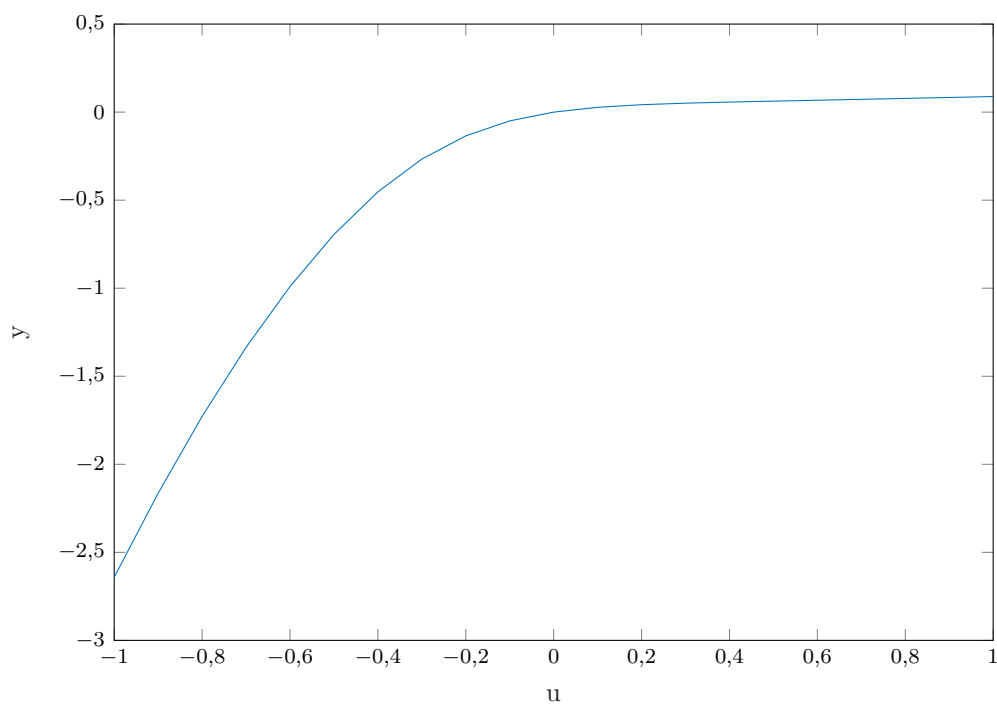
Rys. 2.1. Wykresy odpowiedzi skokowych

Jak widać wartość skoku na wyjściu jest nieproporcjonalna wartości skoku wejścia.

Rozważane były też większe skoki dodatnie, natomiast wyniki leżały bardzo blisko wyjściu ze skoku do 0,25, więc dla lepszej czytelności wykresu nie są one na nim pokazane.

2.2. Charakterystyka statyczna

Po przeprowadzeniu badań o większej częstotliwości próbek dostajemy wykres charakterystyki statycznej:



Rys. 2.2. Wykresy odpowiedzi skokowych

Nie jest to wykres prostej, więc charakterystyka jest nieliniowa.

3. Algorytmy regulacji

3.1. Algorytm cyfrowy regulacji PID

Prawo regulacji cyfrowego PID:

$$u(k) = r_2 e(k-2) + r_1 e(k-1) + r_0 e(k) + u(k-1), \text{ dla } k = 12, 13 \dots N \quad (3.1)$$

Współczynniki regulacji r_i są wyliczane ze standardowych wzorów i zależą od wzmocnienia członu proporcjonalnego K_p , parametru całkowania T_i , parametru różniczkowania T_d , które są parametrami dostrojalnymi regulatora, oraz od wartości okresu próbkowania $T = 0,5s$.

Wartości wejścia i wyjścia będą wystawiane na U_{PP} i Y_{PP} dla $k = 1, 2 \dots 11$, a dla następnych chwil czasu wejście będzie liczone z prawa regulacji, uwzględniając ograniczenia u_{min} , u_{max} , Δu^{max} .

3.2. Algorytm DMC w wersji analitycznej

Prawo regulacji DMC:

$$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) \quad (3.2)$$

Gdzie $\Delta U(k)$ to wektor N_u (horyzont sterowania) przyszłych wartości sterowania, $Y^0(k)$ to przewidywana odpowiedź z modelu procesu, K - macierz policzona raz na początku ze współczynników odpowiedzi skokowej, uwzględniając wybrany współczynnik λ oraz horyzonty predykcji i sterowania.

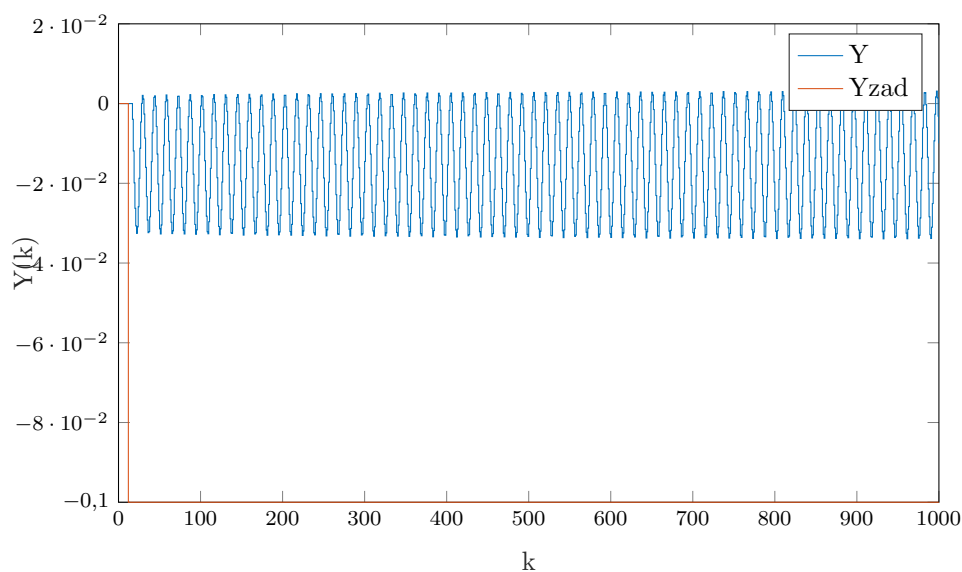
4. Strojenie prostych regulatorów PID i DMC

4.1. Strojenie PID

Do strojenia wybraliśmy metodę Zieglera-Nicholsa, która rozpoczyna się od doprowadzenia układu do oscylacji krytycznych.

4.1.1. Doprowadzenie układu do oscylacji krytycznych

Wartość K , przy której układ osiągnął oscylacji krytycznych to 2,78, $T_{kr} = 7$.

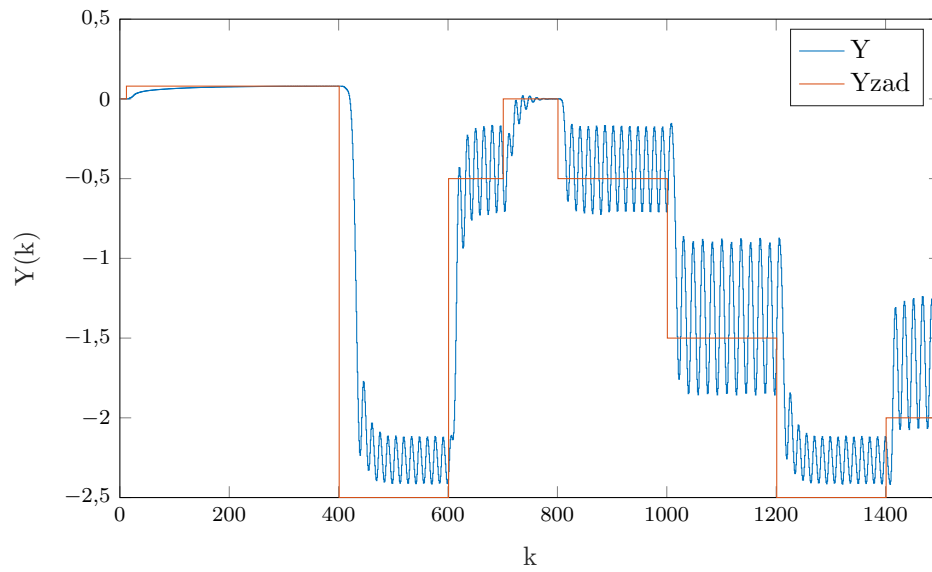
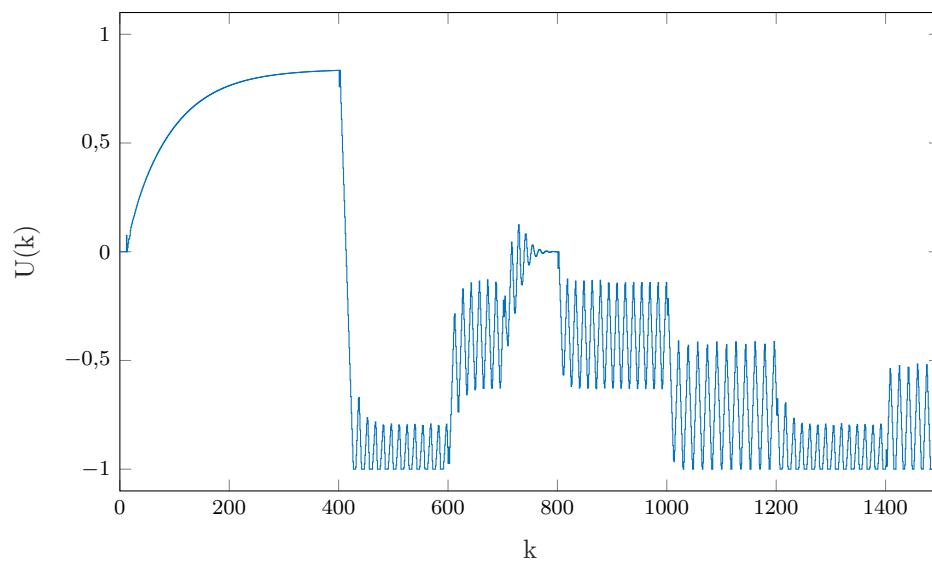


Rys. 4.1. Oscylacje krytyczne, $K_{kr} = 2,78$, $T_{kr} = 7$

4.1.2. Regulacja wynikająca z ZN

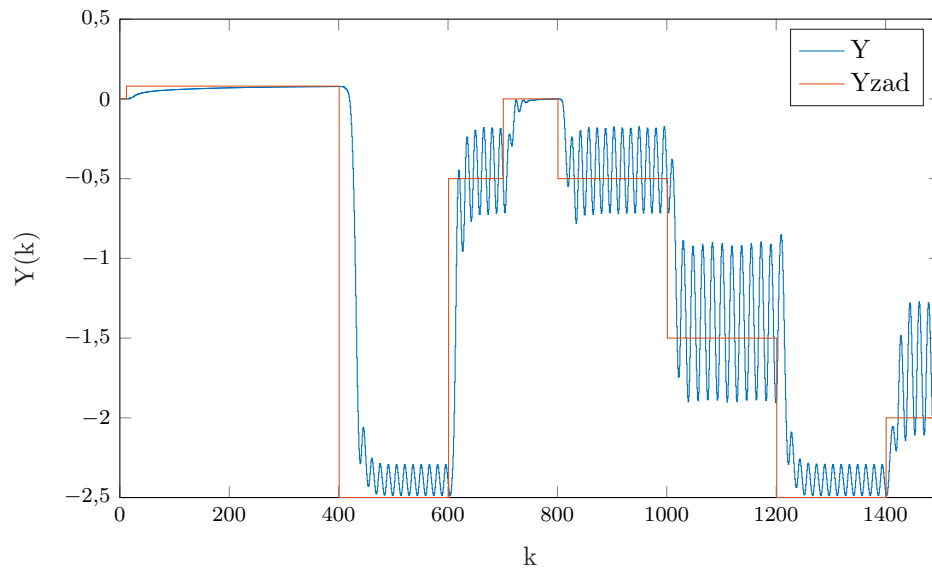
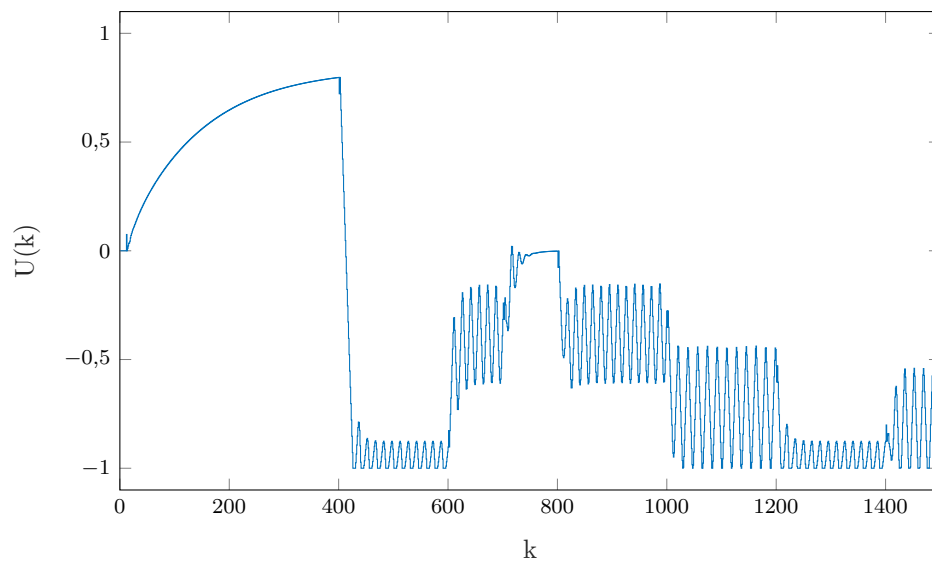
Wyliczone zgodnie z metodą ZN parametry regulatora:

$$K = 1,6680; T_i = 3,5; T_d = 0,84; \quad (4.1)$$

Rys. 4.2. Regulacja, $K = 1,6680; T_i = 3,5; T_d = 0,84;$ Rys. 4.3. Sterowanie, $K = 1,6680; T_i = 3,5; T_d = 0,84;$

4.1.3. Dostrojenie metodą inżynierską

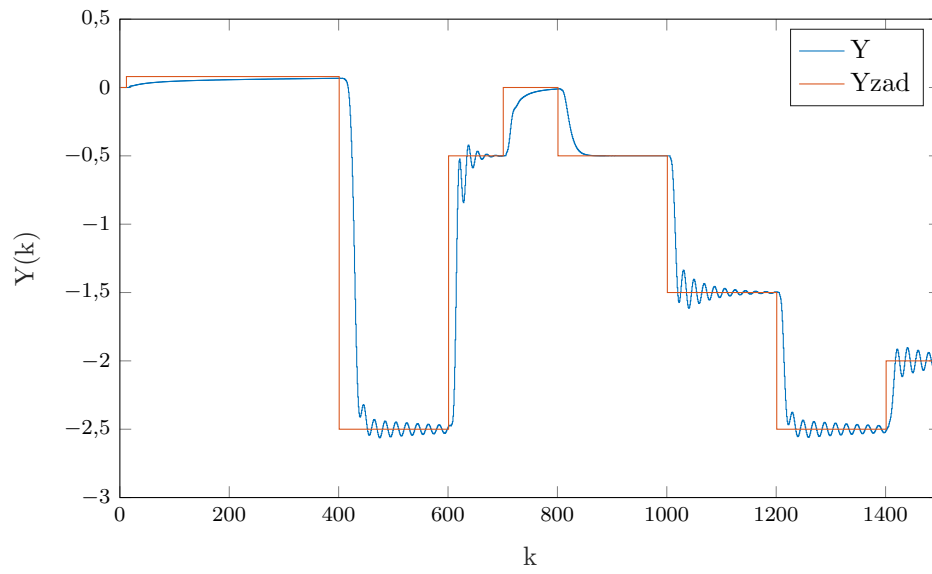
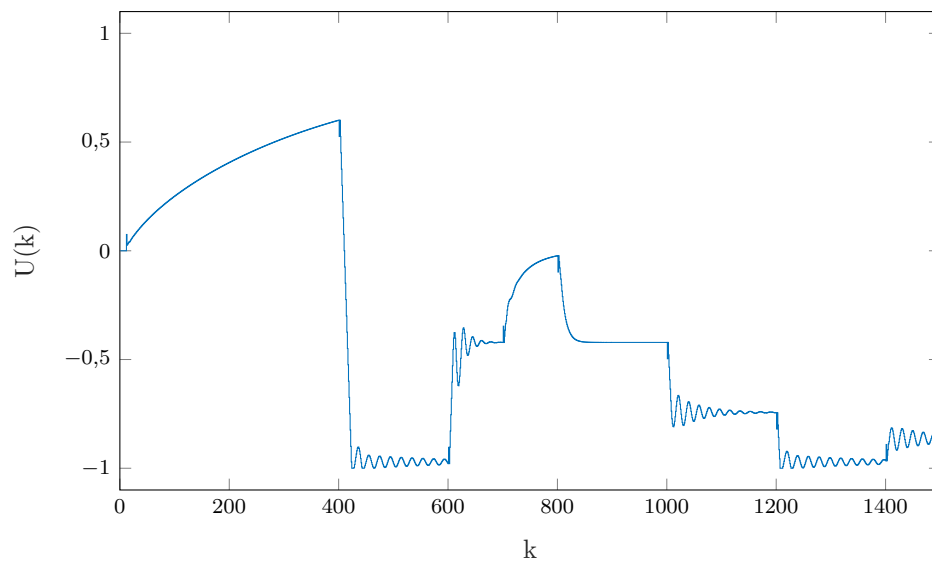
Zmniejszymy K do 1 żeby zmniejszyć oscylacje:

Rys. 4.4. Regulacja, $K = 1; T_i = 3, 5; T_d = 0, 84;$ Rys. 4.5. Sterowanie, $K = 1; T_i = 3, 5; T_d = 0, 84;$

$$E = 3,2788 \cdot 10^7 \quad (4.2)$$

Błąd się zmniejszył, więc kontynuujemy zmniejszanie K :

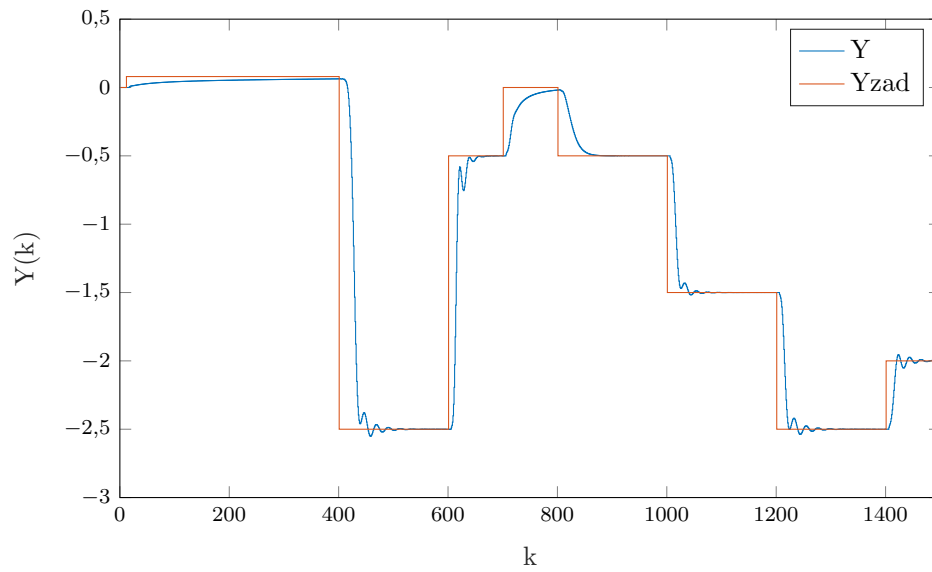
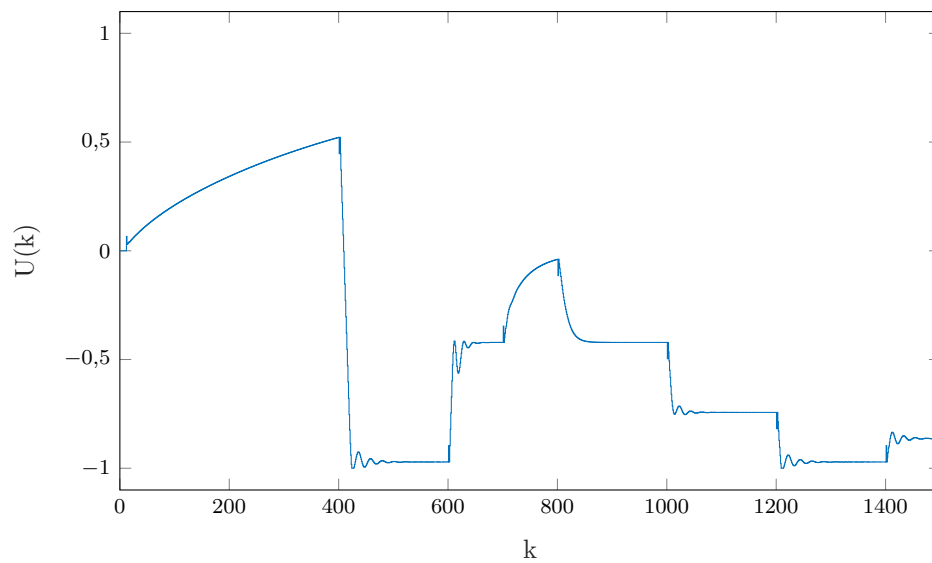
$$K = 0,4 \quad (4.3)$$

Rys. 4.6. Regulacja, $K = 0,4; T_i = 3,5; T_d = 0,84;$ Rys. 4.7. Sterowanie, $K = 0,4; T_i = 3,5; T_d = 0,84;$

$$E = 2,4440 \cdot 10^2 \quad (4.4)$$

Kontynuujemy zmniejszanie K :

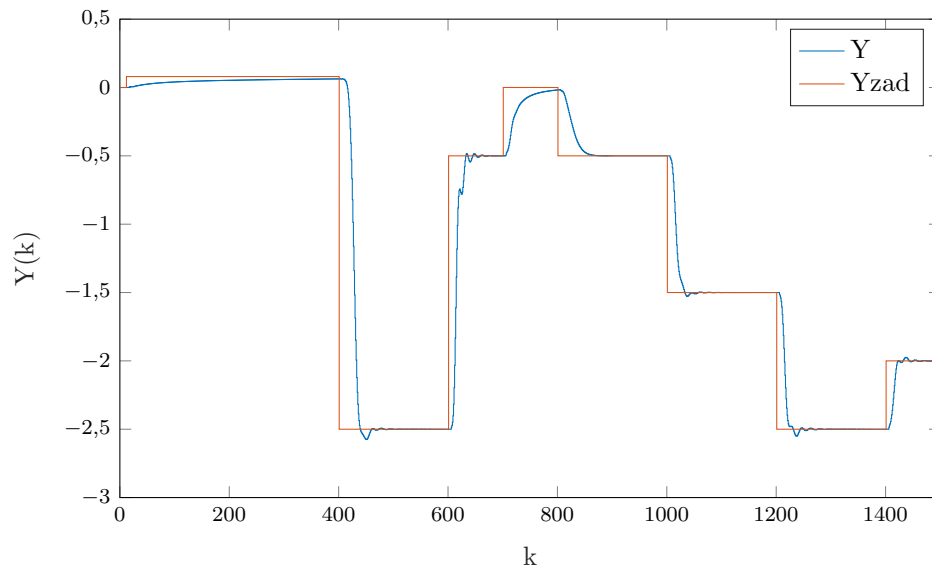
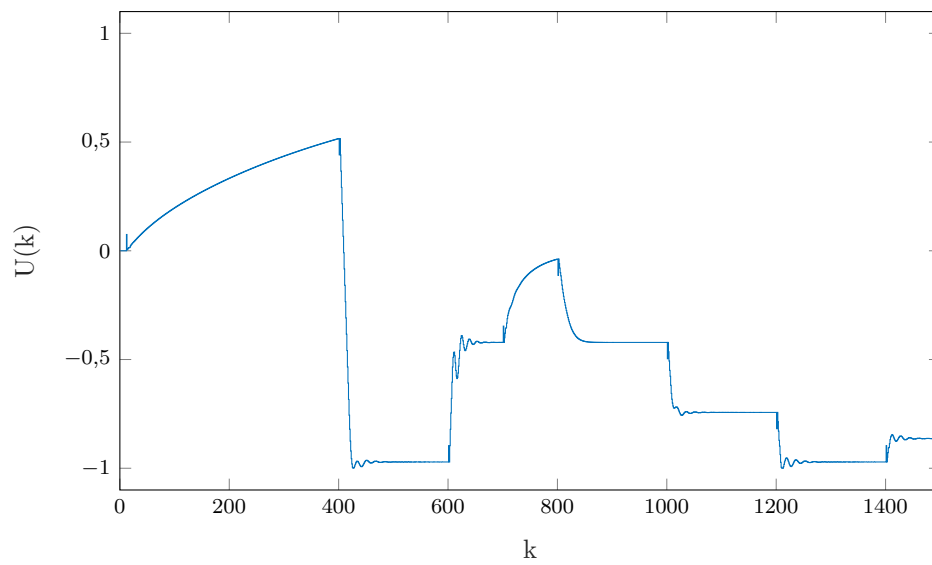
$$K = 0,3 \quad (4.5)$$

Rys. 4.8. Regulacja, $K = 0,3; T_i = 3,5; T_d = 0,84$;Rys. 4.9. Sterowanie, $K = 0,3; T_i = 3,5; T_d = 0,84$;

$$E = 2,3993 \cdot 10^2 \quad (4.6)$$

Zwiększymy T_d , żeby uniknąć gwałtownych zmian sygnału sterującego:

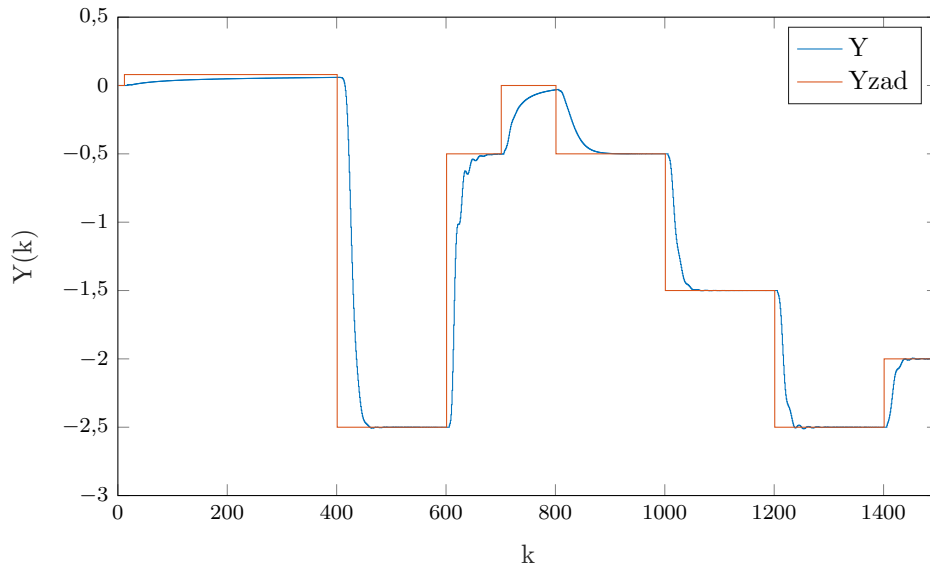
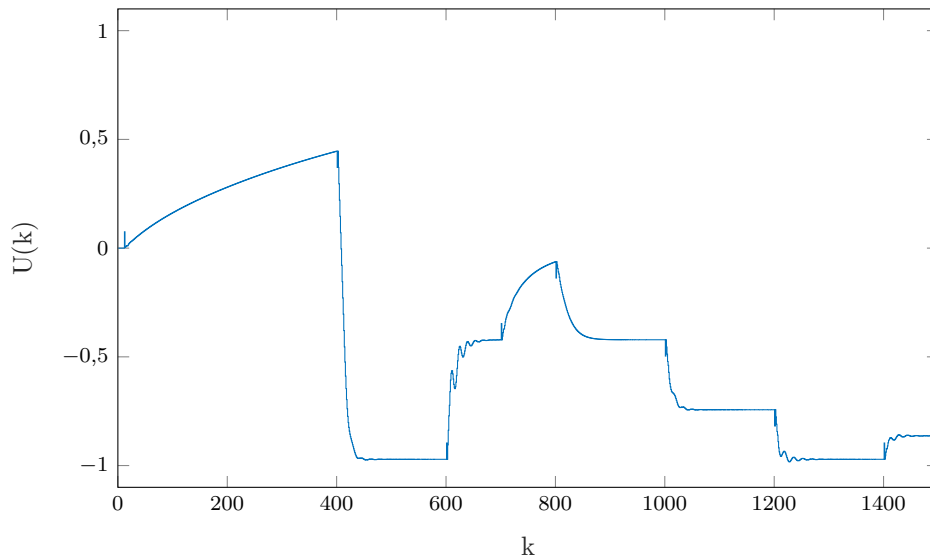
$$K = 0,3; T_d = 1,54 \quad (4.7)$$

Rys. 4.10. Regulacja, $K = 0,3; T_i = 3,5; T_d = 1,54;$ Rys. 4.11. Sterowanie, $K = 0,3; T_i = 3,5; T_d = 1,54;$

$$E = 2,4063 \cdot 10^2 \quad (4.8)$$

Zwiększymy T_i , żeby zmniejszyć uchyb:

$$K = 0,3; T_i = 4,5; T_d = 1,54; \quad (4.9)$$

Rys. 4.12. Regulacja, $K = 0,3; T_i = 4,5; T_d = 1,54;$ Rys. 4.13. Sterowanie, $K = 0,3; T_i = 4,5; T_d = 1,54;$

$$E = 2,3932 \cdot 10^2 \quad (4.10)$$

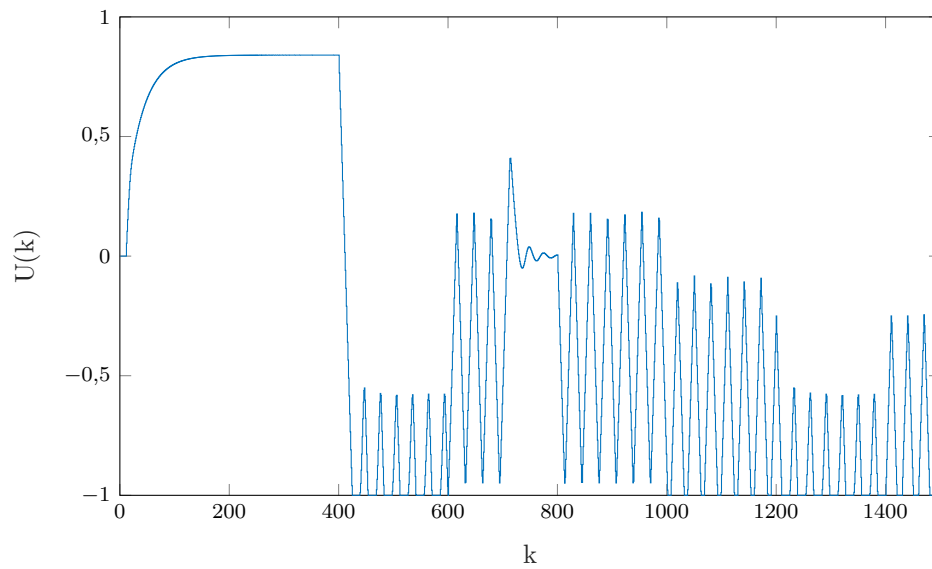
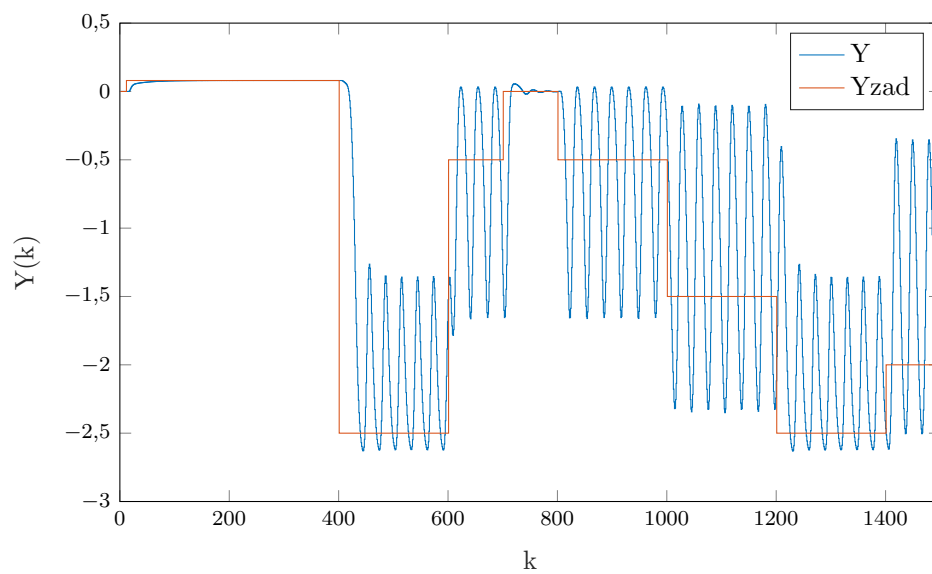
Zostańmy przy tych parametrach:

$$K = 0,3; T_d = 1,54; T_i = 4,5; \quad (4.11)$$

4.2. Strojenie DMC

W wyniku badania odpowiedzi skokowej uzyskano wektor s o długości 15. Rozpoczynamy więc badania od największych możliwych horyzontów predykcji i sterowania oraz parametru λ równym 1:

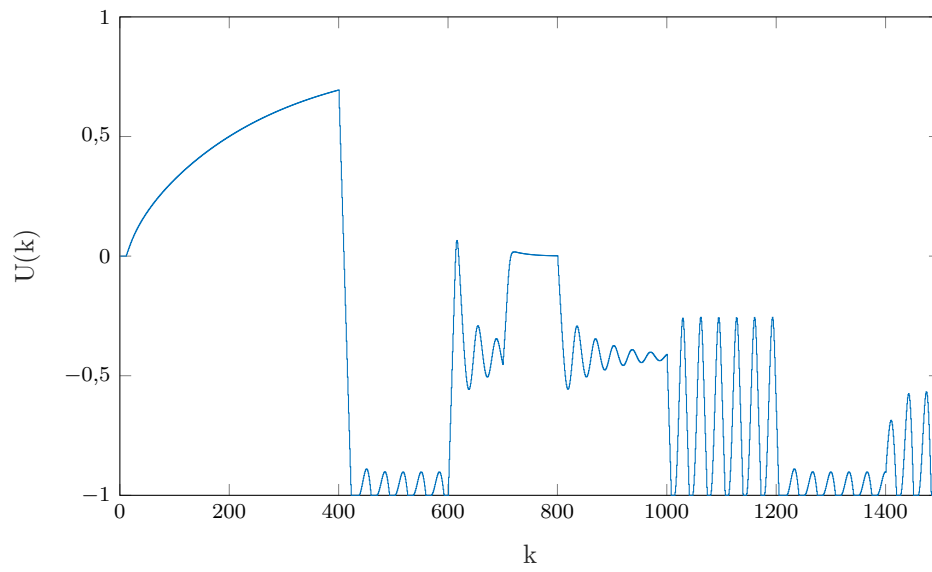
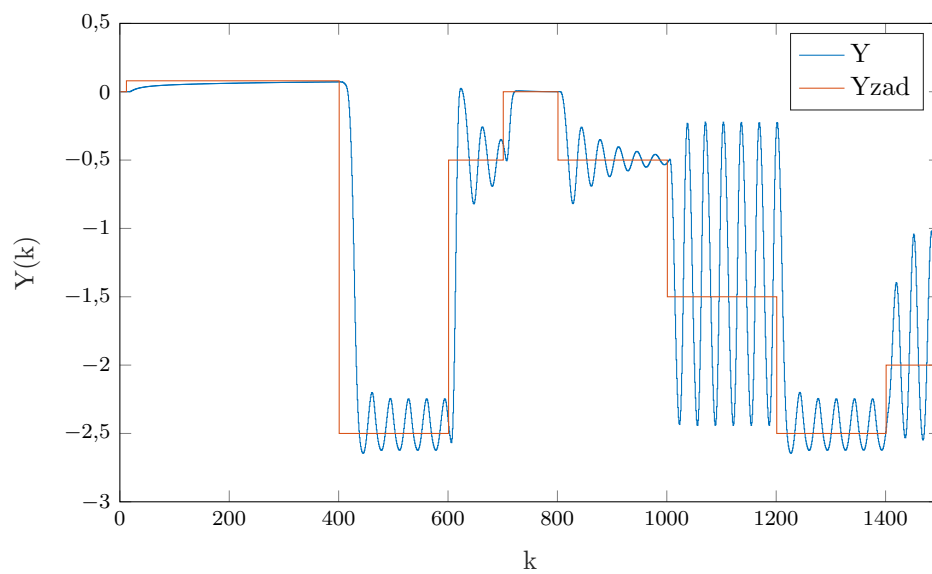
$$N = 15; N_u = 15; \lambda = 1 \quad (4.12)$$

Rys. 4.14. Regulacja DMC, $N = 15$; $N_u = 15$; $\lambda = 1$ Rys. 4.15. Sterowanie DMC, $N = 15$; $N_u = 15$; $\lambda = 1$

$$E = 689,3821 \quad (4.13)$$

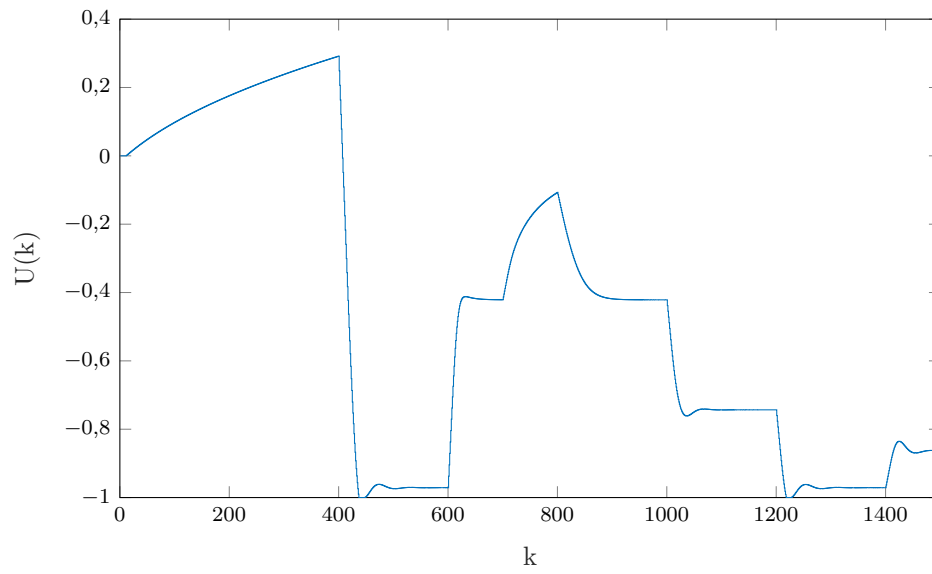
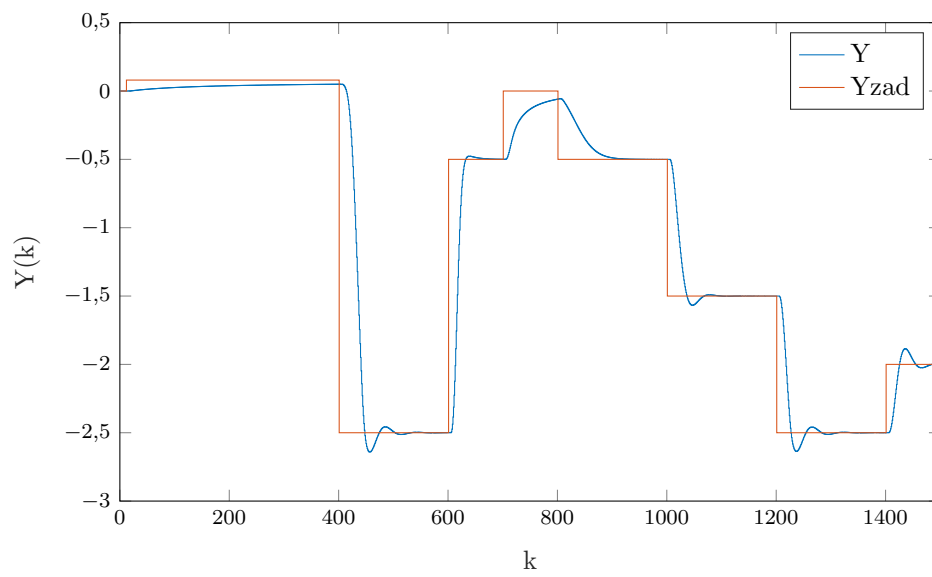
Będziemy zwiększać parametr λ żeby uniknąć gwałtownych zmian sygnału sterującego:

$$N = 15; N_u = 15; \lambda = 10 \quad (4.14)$$

Rys. 4.16. Regulacja DMC, $N = 15$; $N_u = 15$; $\lambda = 10$ Rys. 4.17. Sterowanie DMC, $N = 15$; $N_u = 15$; $\lambda = 10$

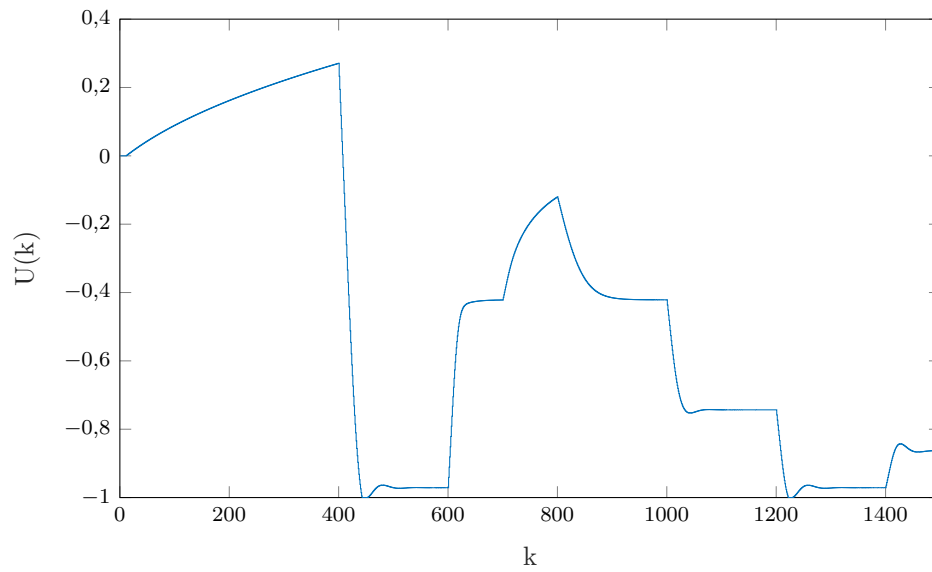
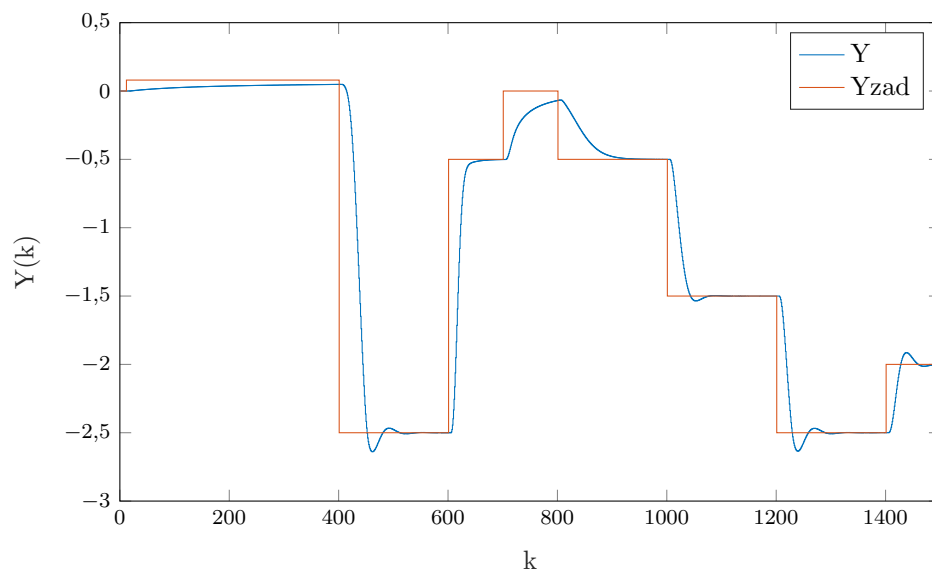
$$E = 415,6314 \quad (4.15)$$

$$N = 15; N_u = 15; \lambda = 50 \quad (4.16)$$

Rys. 4.18. Regulacja DMC, $N = 15$; $N_u = 15$; $\lambda = 50$ Rys. 4.19. Sterowanie DMC, $N = 15$; $N_u = 15$; $\lambda = 50$

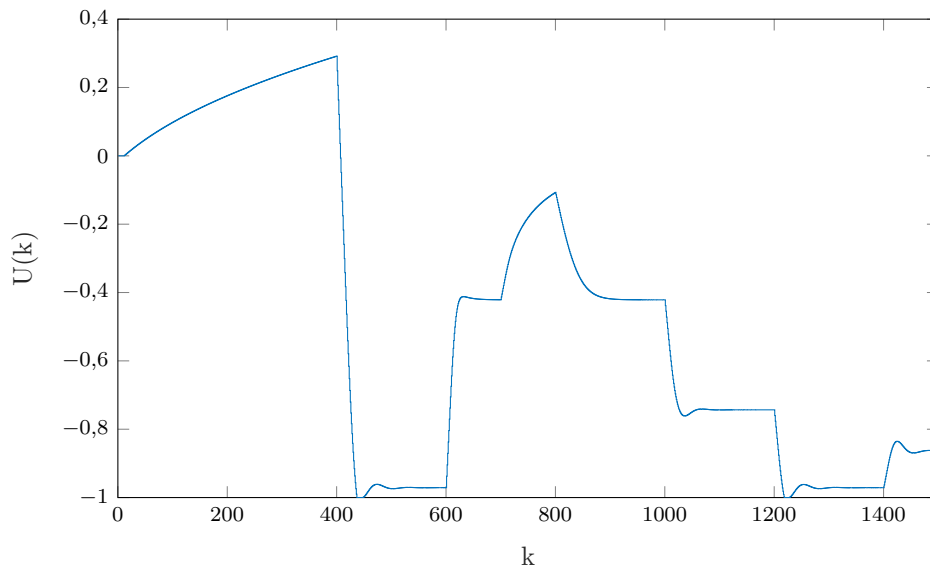
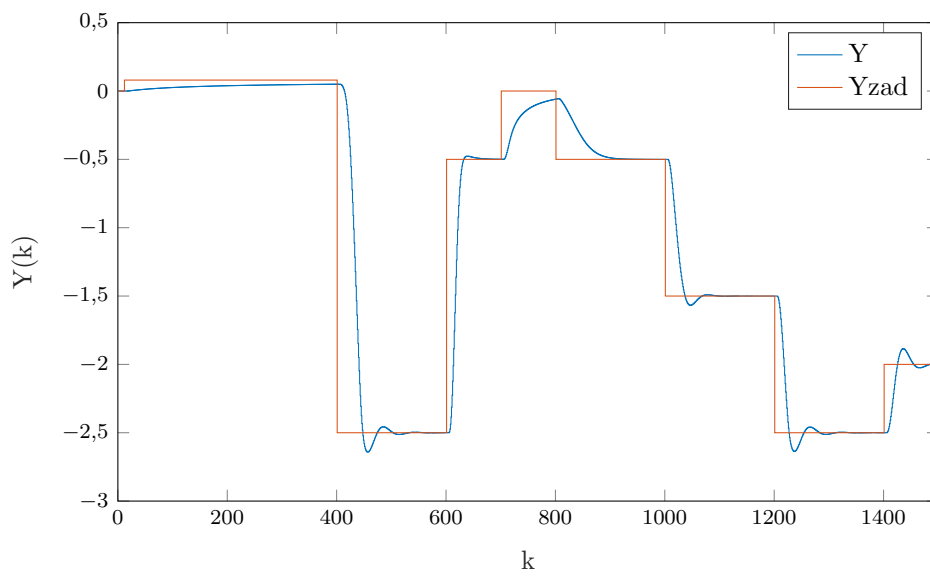
$$E = 276,9352 \quad (4.17)$$

$$N = 14; N_u = 14; \lambda = 50 \quad (4.18)$$

Rys. 4.20. Regulacja DMC, $N = 14$; $N_u = 14$; $\lambda = 50$ Rys. 4.21. Sterowanie DMC, $N = 14$; $N_u = 14$; $\lambda = 50$

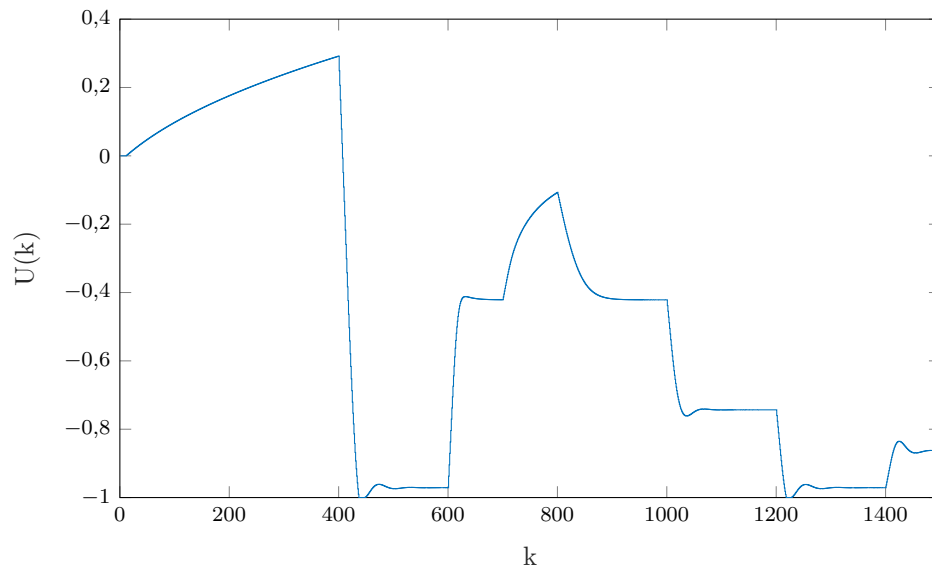
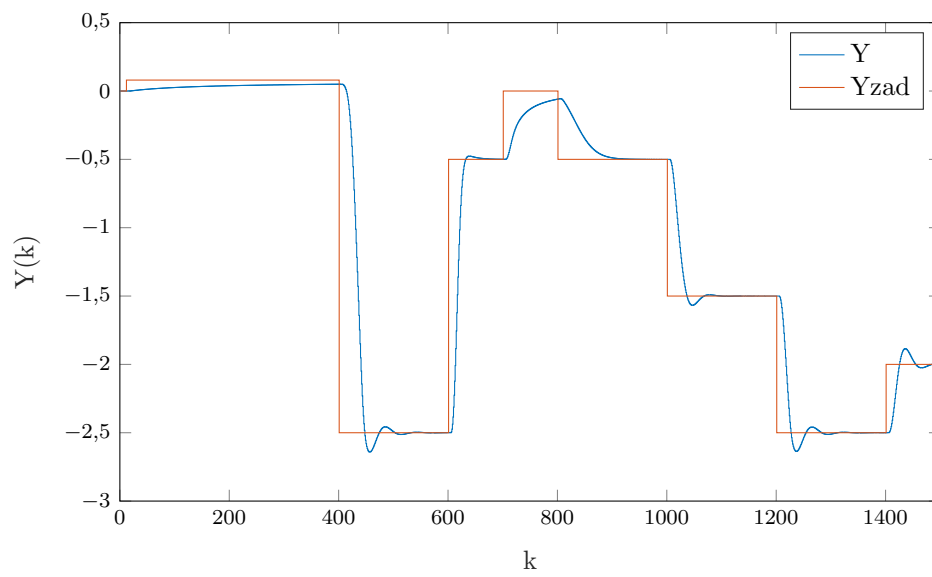
$$E = 293,5752 \quad (4.19)$$

$$N = 15; N_u = 10; \lambda = 50 \quad (4.20)$$

Rys. 4.22. Regulacja DMC, $N = 15$; $N_u = 10$; $\lambda = 50$ Rys. 4.23. Sterowanie DMC, $N = 15$; $N_u = 10$; $\lambda = 50$

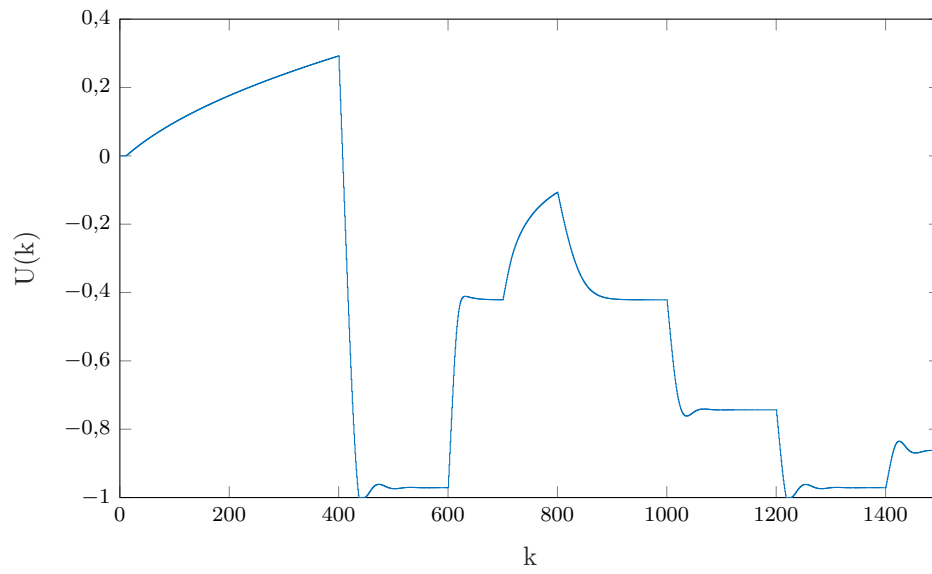
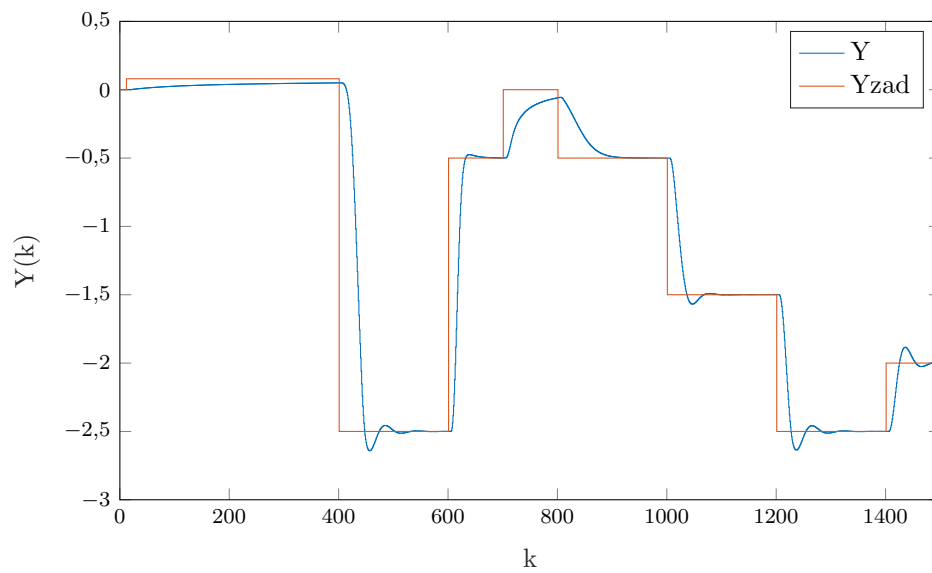
$$E = 276,9350 \quad (4.21)$$

$$N = 15; N_u = 5; \lambda = 50 \quad (4.22)$$

Rys. 4.24. Regulacja DMC, $N = 15$; $N_u = 5$; $\lambda = 50$ Rys. 4.25. Sterowanie DMC, $N = 15$; $N_u = 5$; $\lambda = 50$

$$E = 276,8338 \quad (4.23)$$

$$N = 15; N_u = 1; \lambda = 50 \quad (4.24)$$

Rys. 4.26. Regulacja DMC, $N = 15$; $N_u = 1$; $\lambda = 50$ Rys. 4.27. Sterowanie DMC, $N = 15$; $N_u = 1$; $\lambda = 50$

$$E = 276,3756 \quad (4.25)$$

5. Algorytmy rozmytej regulacji

TODO: opis implementacji
tu jakiś kod ewentualnie

6. Strojenie rozmytych regulatorów

Strojenie regulatorów rozmytych jest czasochłonne, jeżeli chodzi o regulatory PID, natomiast tylko nieco bardziej skomplikowane jeżeli chodzi o regulatory DMC. Zaczniemy od strojenia PID.

6.1. Strojenie rozmytego PID

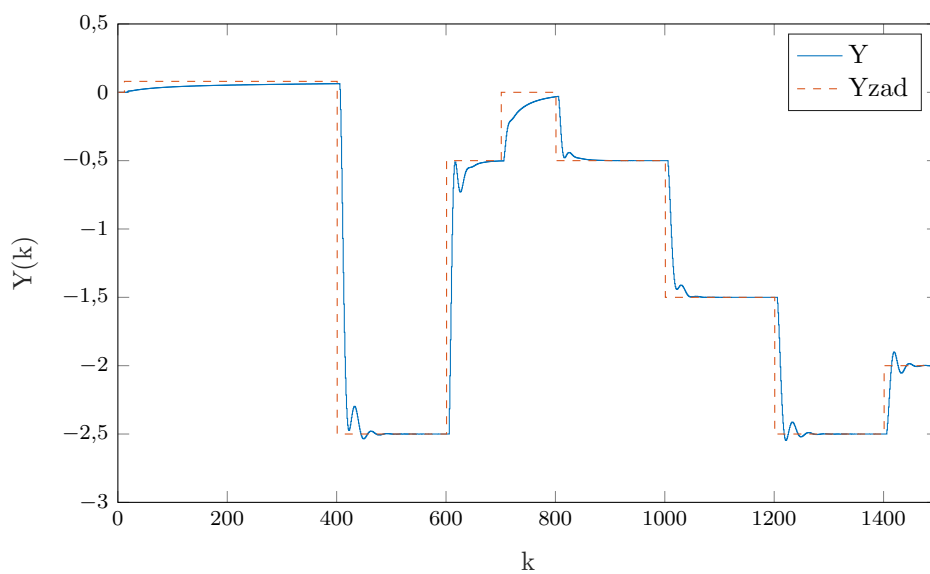
6.1.1. 2 regulatory lokalne

Parametry PID_1 :

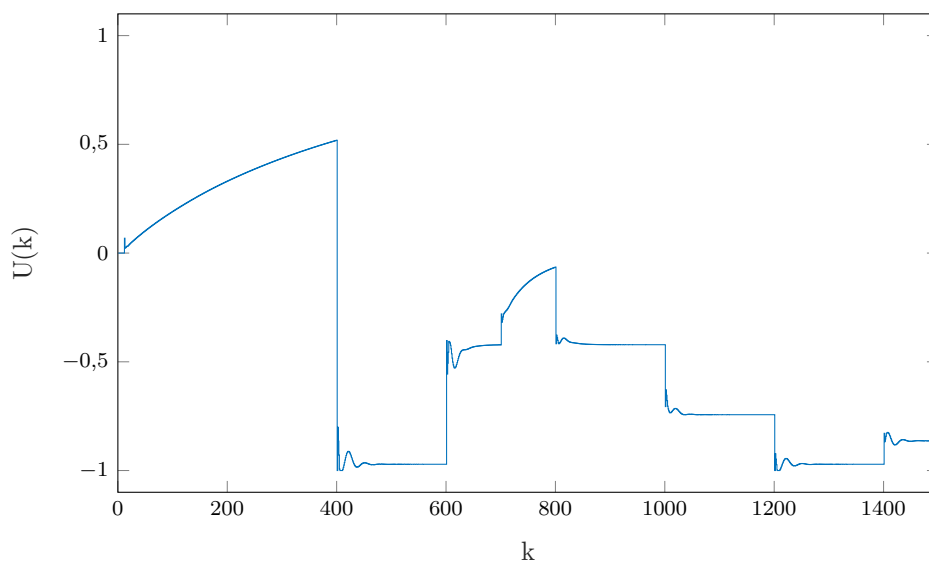
$$\begin{aligned} K &= 0,17; \\ T_i &= 3,4; \\ T_d &= 0,3. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Parametry PID_2 :

$$\begin{aligned} K &= 0,5; \\ T_i &= 5,6; \\ T_d &= 0,9. \end{aligned} \tag{6.2}$$



Rys. 6.1. Regulacja rozmyta PID, 2 regulatory



Rys. 6.2. Sterowanie rozmyte PID, 2 regulatory

$$E = 117,8557 \quad (6.3)$$

Regulacja nie jest najładniejsza, ale wskaźnik jakości jest znacznie mniejszy niż we wcześniejszych eksperymentach.

6.1.2. 3 regulatory lokalne

Parametry PID_1 :

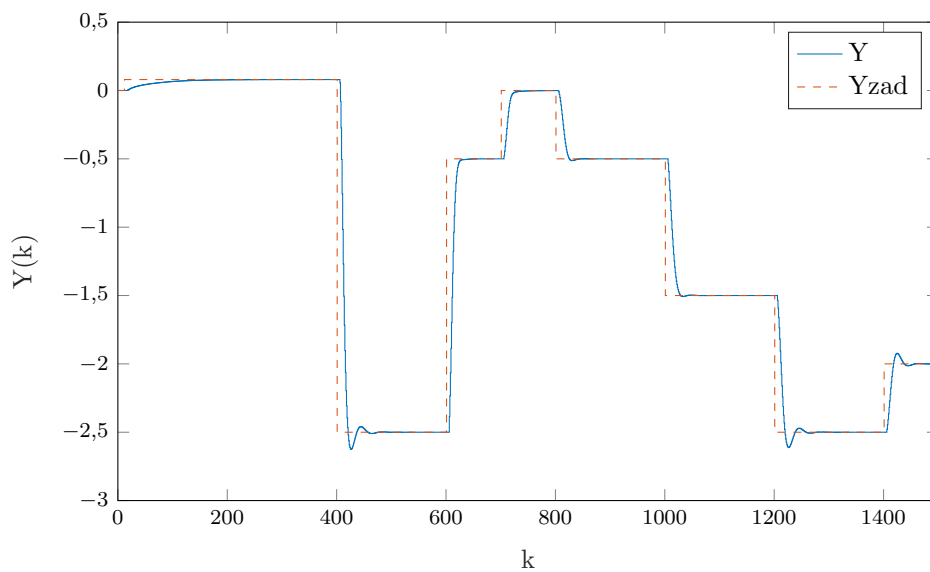
$$\begin{aligned} K &= 0,1; \\ T_i &= 2,2; \\ T_d &= 0,5. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Parametry PID_2 :

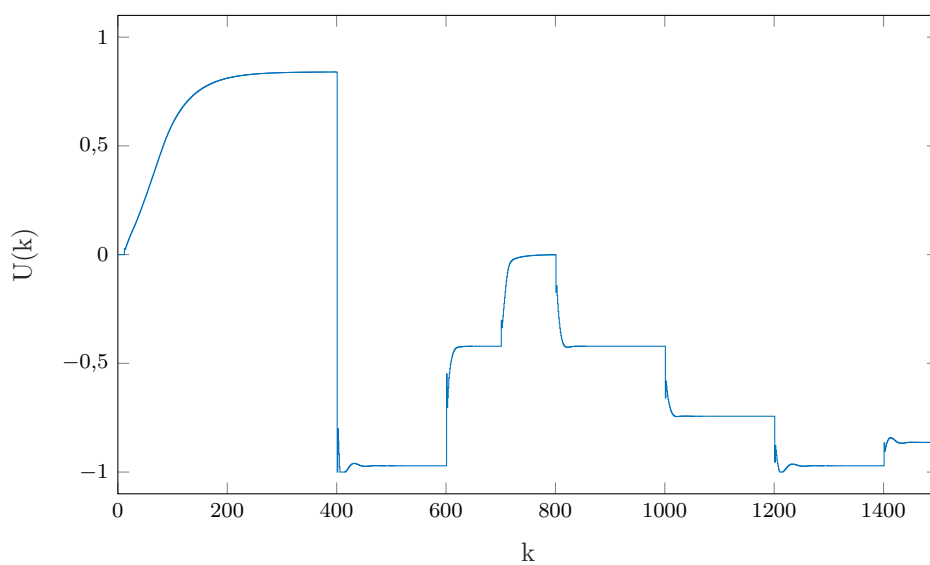
$$\begin{aligned} K &= 0,15; \\ T_i &= 0,8; \\ T_d &= 0,5. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Parametry PID_3 :

$$\begin{aligned} K &= 0,8; \\ T_i &= 1,1; \\ T_d &= 1. \end{aligned} \quad (6.6)$$



Rys. 6.3. Regulacja rozmyta PID, 3 regulatory



Rys. 6.4. Sterowanie rozmyte PID, 3 regulatory

$$E = 126,2527 \quad (6.7)$$

Regulacja wygląda dużo lepiej, lecz wskaźnik błędy się zwiększył.

6.1.3. 4 regulatory lokalne

Parametry PID_1 :

$$\begin{aligned} K &= 0,12; \\ T_i &= 3; \\ T_d &= 0,9. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Parametry PID_2 :

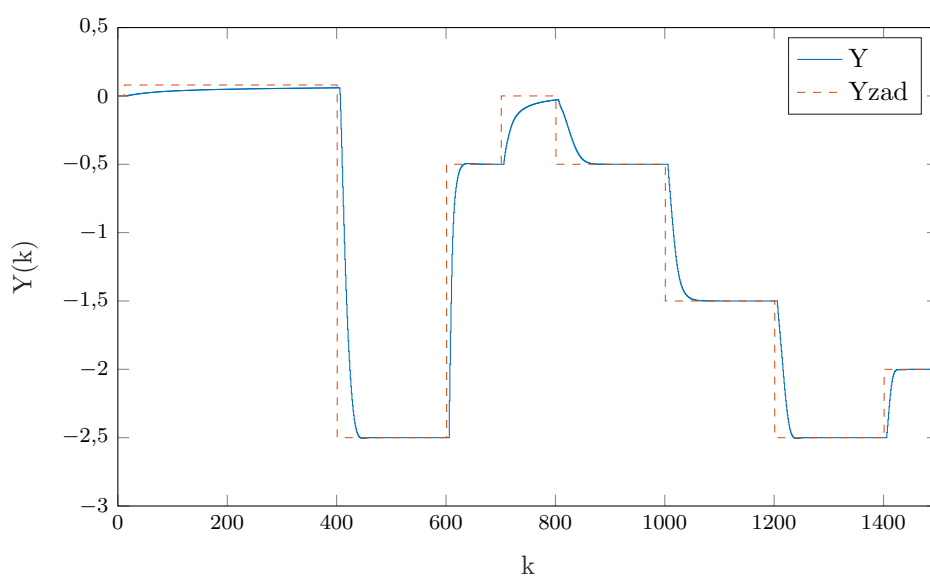
$$\begin{aligned} K &= 0,07; \\ T_i &= 1,3; \\ T_d &= 1,5. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Parametry PID_3 :

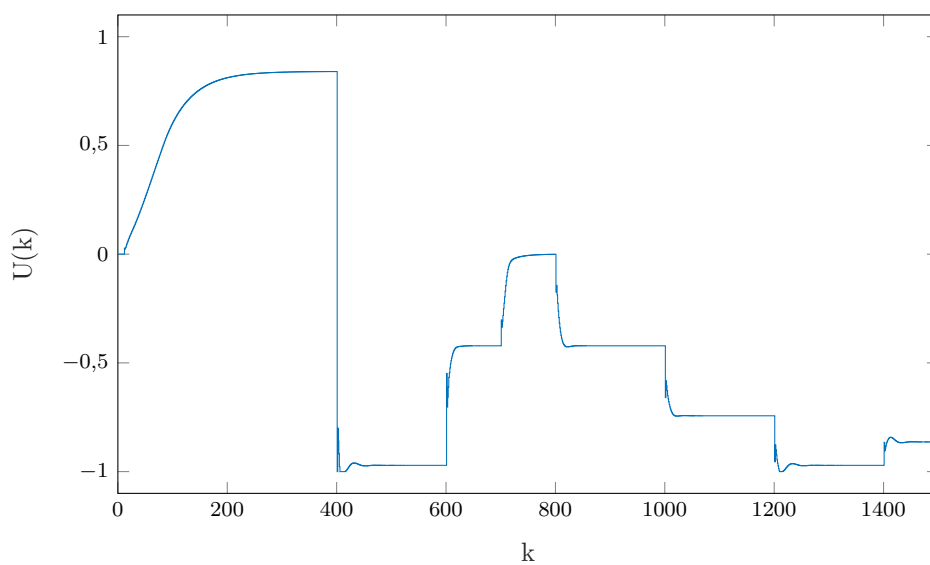
$$\begin{aligned} K &= 0,2; \\ T_i &= 3; \\ T_d &= 1. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Parametry PID_4 :

$$\begin{aligned} K &= 0,5; \\ T_i &= 1; \\ T_d &= 1. \end{aligned} \quad (6.11)$$



Rys. 6.5. Regulacja rozmyta PID, 4 regulatory



Rys. 6.6. Sterowanie rozmyte PID, 4 regulatory

$$E = 141,3047 \quad (6.12)$$

6.1.4. 5 regulatory lokalne

Parametry PID_1 :

$$\begin{aligned} K &= 0,12; \\ T_i &= 3; \\ T_d &= 1,05. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Parametry PID_2 :

$$\begin{aligned} K &= 0,2; \\ T_i &= 2,3; \\ T_d &= 0,8. \end{aligned} \quad (6.14)$$

Parametry PID_3 :

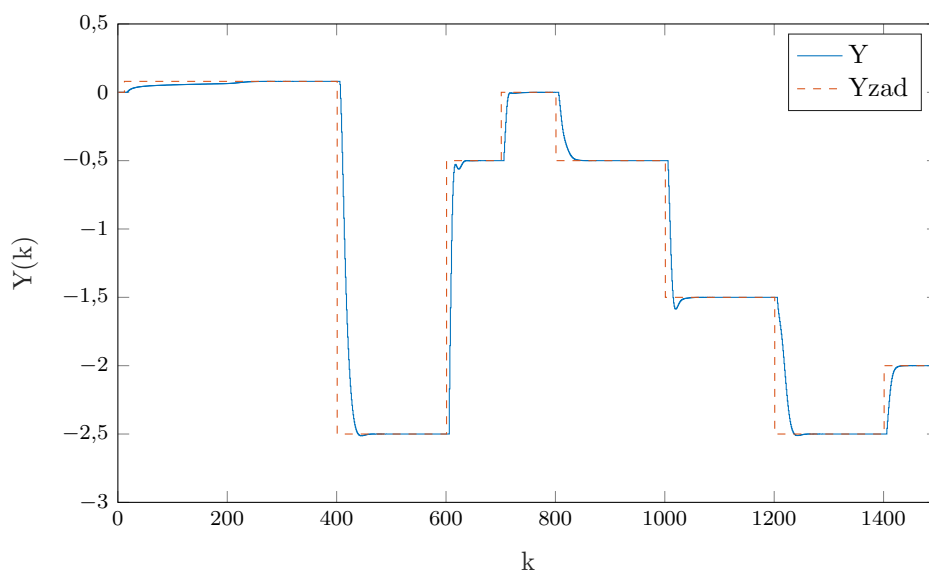
$$\begin{aligned} K &= 0,4; \\ T_i &= 1,5; \\ T_d &= 0,3. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Parametry PID_4 :

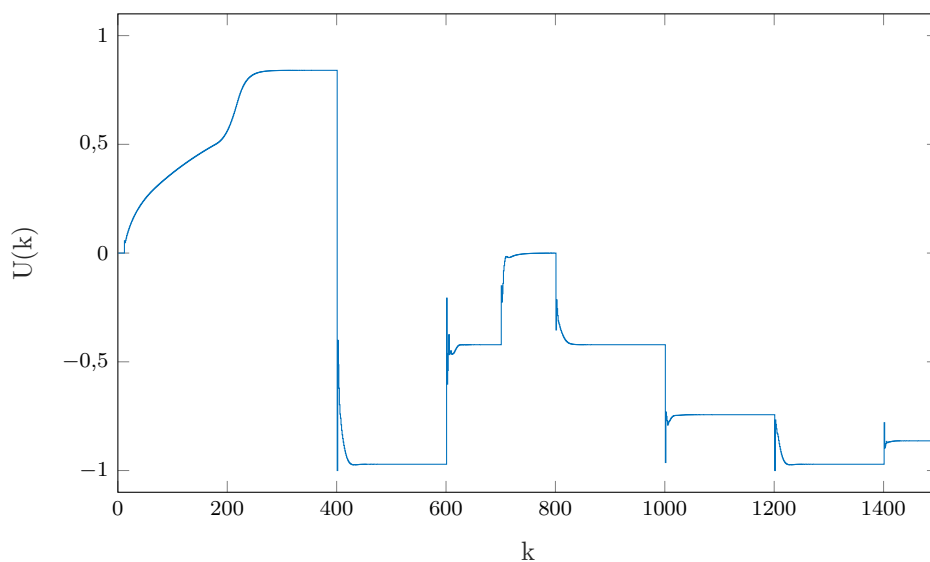
$$\begin{aligned} K &= 0,3; \\ T_i &= 1,9; \\ T_d &= 1,7. \end{aligned} \quad (6.16)$$

Parametry PID_5 :

$$\begin{aligned} K &= 0,7; \\ T_i &= 0,4; \\ T_d &= 0,7. \end{aligned} \quad (6.17)$$



Rys. 6.7. Regulacja rozmyta PID, 4 regulatory



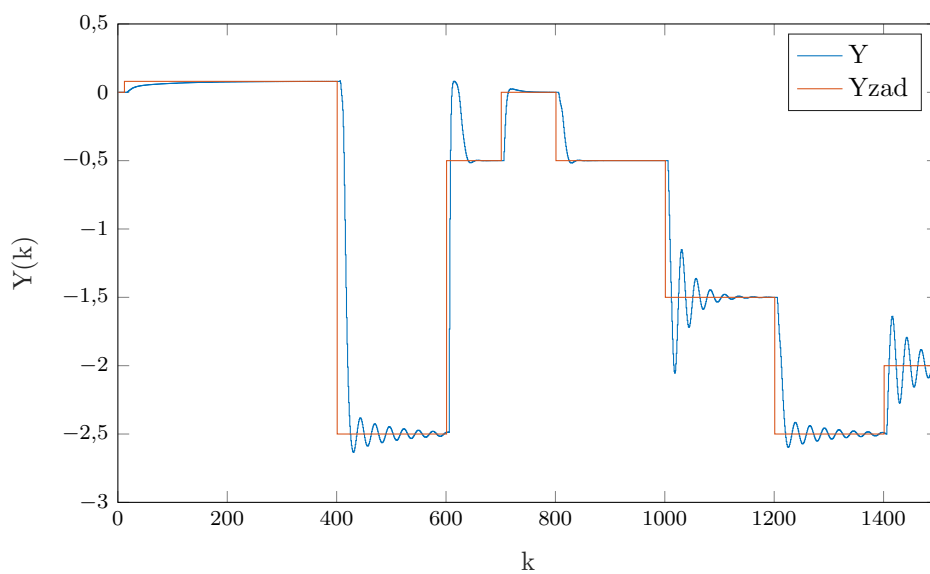
Rys. 6.8. Sterowanie rozmyte PID, 4 regulatory

$$E = 133,7945 \quad (6.18)$$

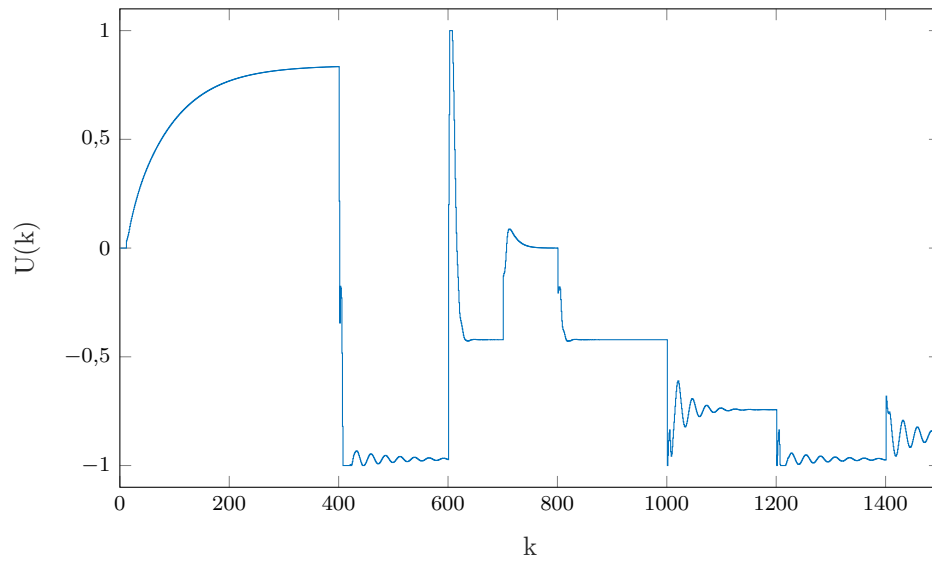
6.2. Strojzenie rozmytego DMC

Najlepszymi horyzontami dla wszystkich rodzajów rozmytego DMC okazały się $N = 10$, $N_u = 1$. Poniżej są przedstawione wyniki badań DMC z różną ilością regulatorów lokalnych oraz $\lambda = 1$.

6.2.1. 2 regulatory lokalne



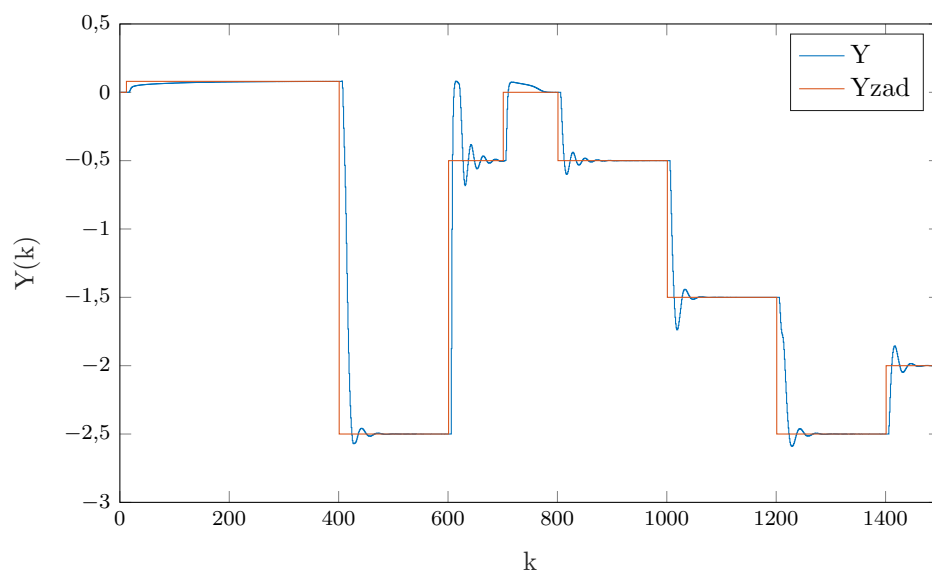
Rys. 6.9. Regulacja rozmyta DMC, 2 regulatory



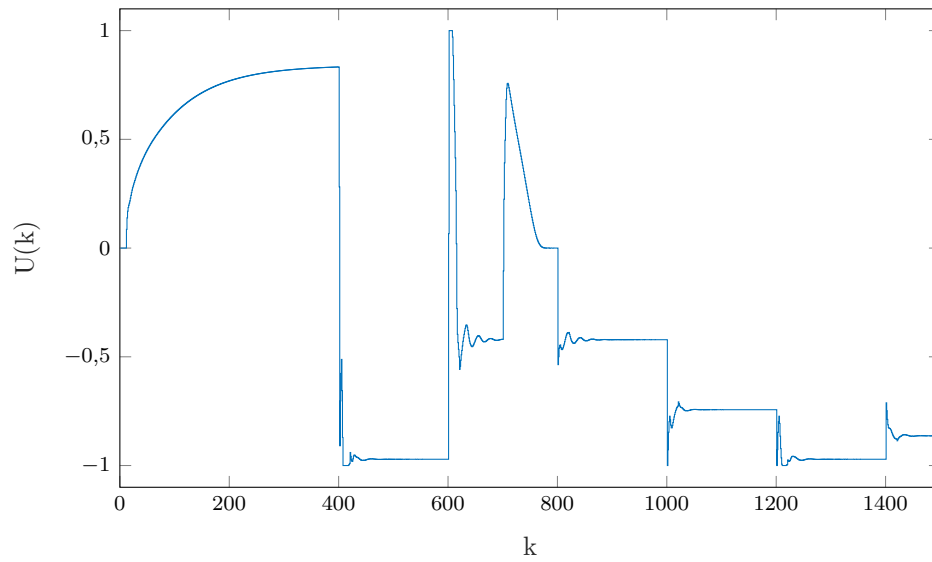
Rys. 6.10. Sterowanie rozmyte DMC, 2 regulatory

$$E = 145,7136 \quad (6.19)$$

6.2.2. 3 regulatory lokalne



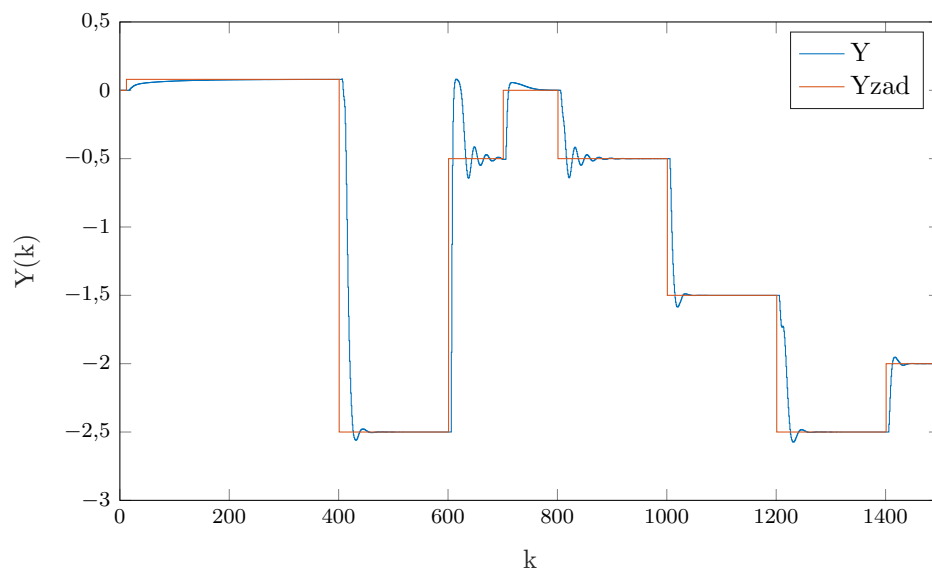
Rys. 6.11. Regulacja rozmyta DMC, 3 regulatory



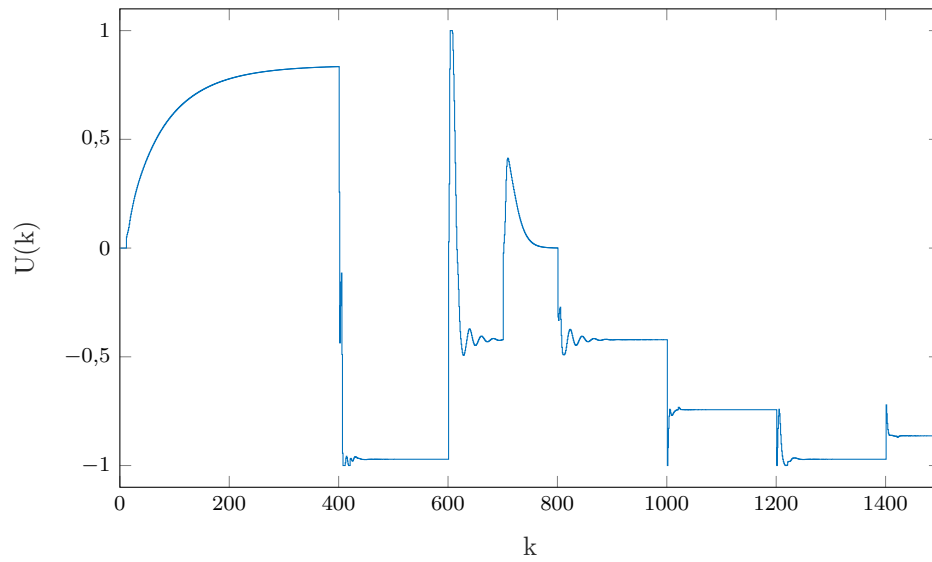
Rys. 6.12. Sterowanie rozmyte DMC, 3 regulatory

$$E = 127,8804 \quad (6.20)$$

6.2.3. 4 regulatory lokalne



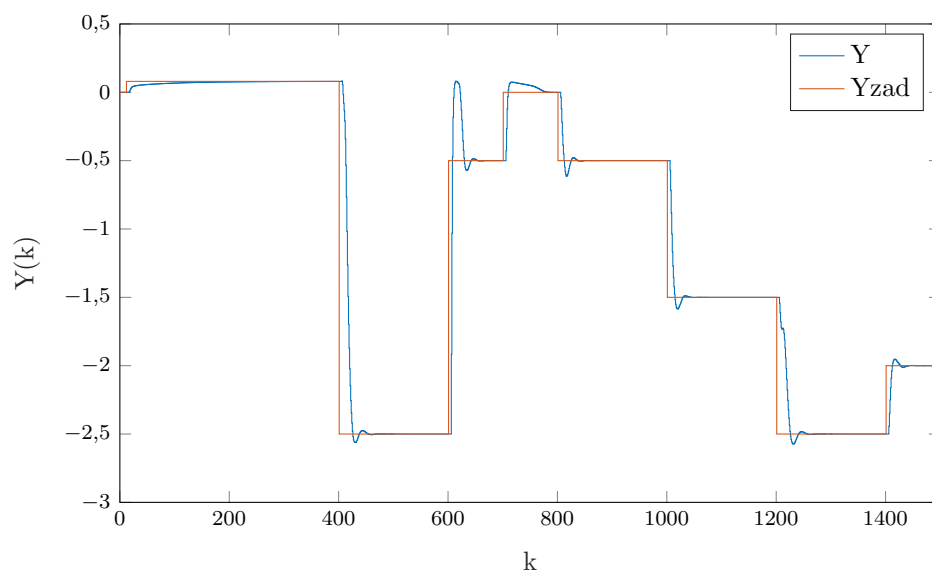
Rys. 6.13. Regulacja rozmyta DMC, 4 regulatory



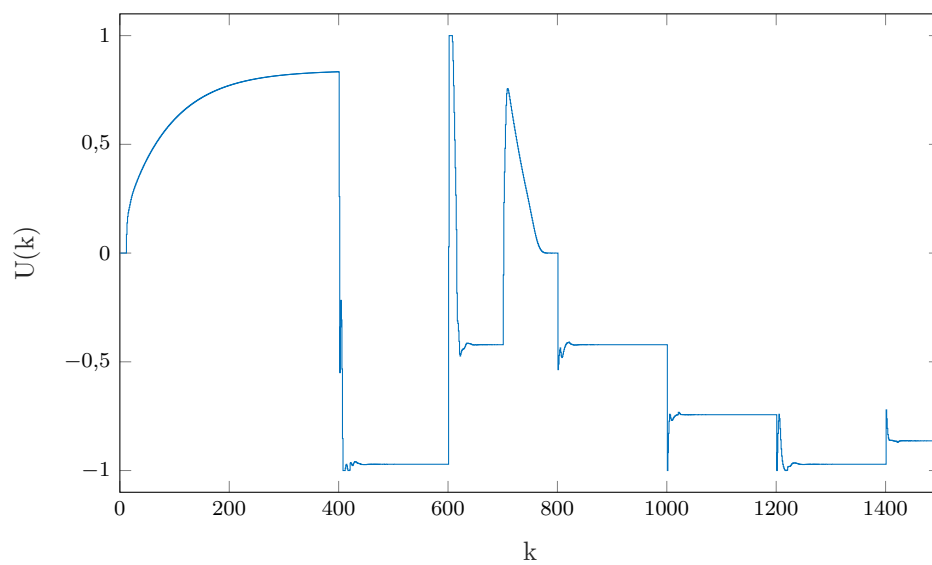
Rys. 6.14. Sterowanie rozmyte DMC, 4 regulatory

$$E = 143,4687 \quad (6.21)$$

6.2.4. 5 regulatorów lokalnych



Rys. 6.15. Regulacja rozmyta DMC, 5 regulatorów



Rys. 6.16. Sterowanie rozmyte DMC, 5 regulatorów

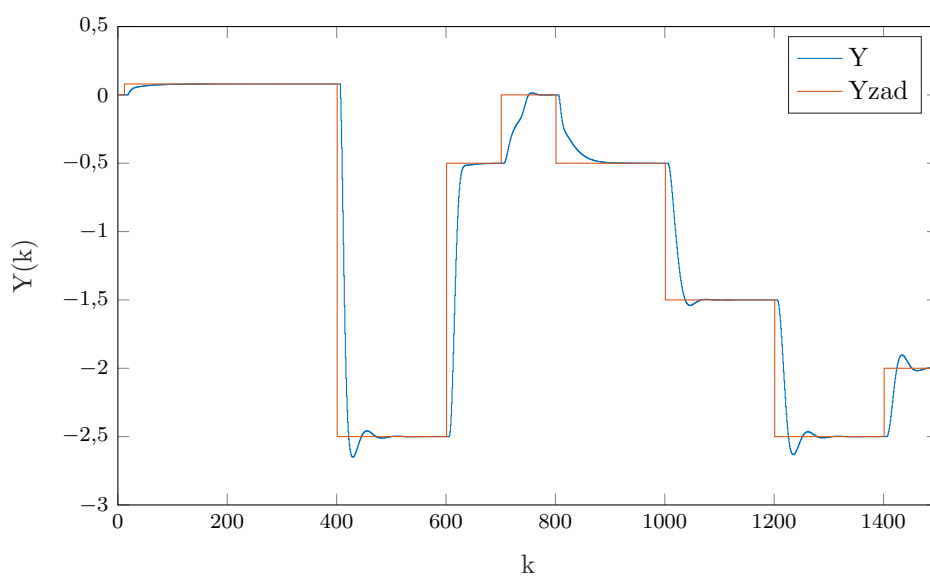
$$E = 139,3503 \quad (6.22)$$

7. Dobór parametru lambda

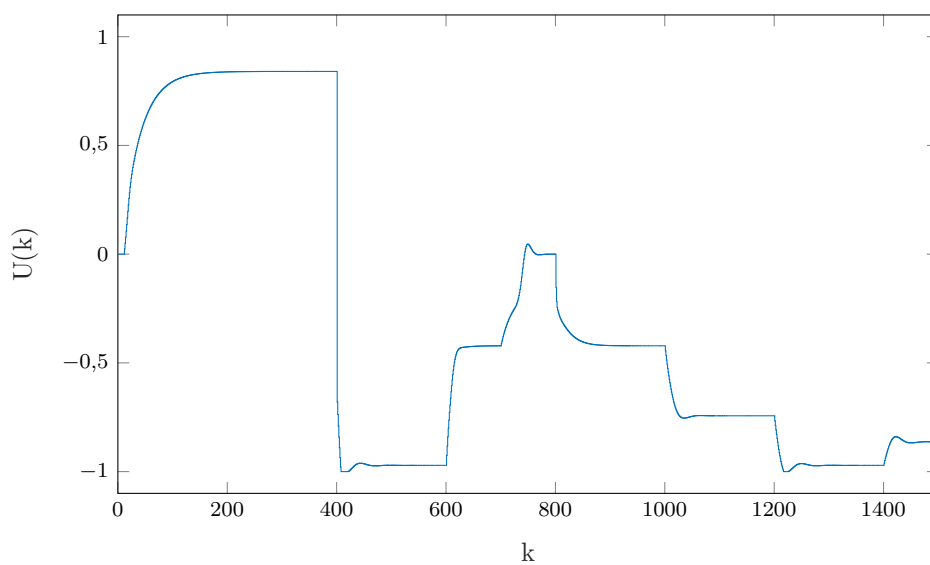
Poniżej są przedstawione wyniki eksperymentów z dobranymi parametrami λ .

7.0.1. 2 regulatory lokalne

$$\lambda_1 = 320; \lambda_2 = 0,4; \quad (7.1)$$



Rys. 7.1. Regulacja rozmyta DMC, 2 regulatory

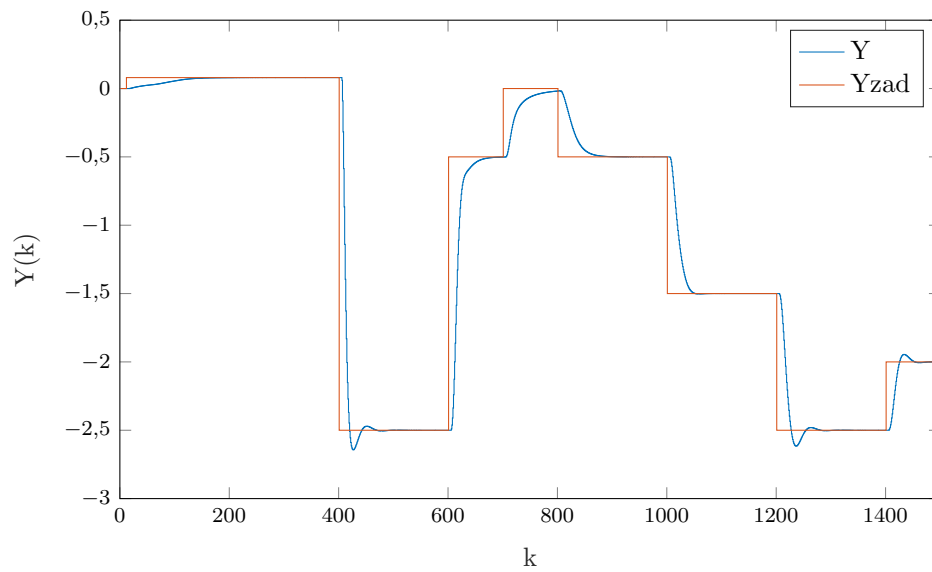


Rys. 7.2. Sterowanie rozmyte DMC, 2 regulatory

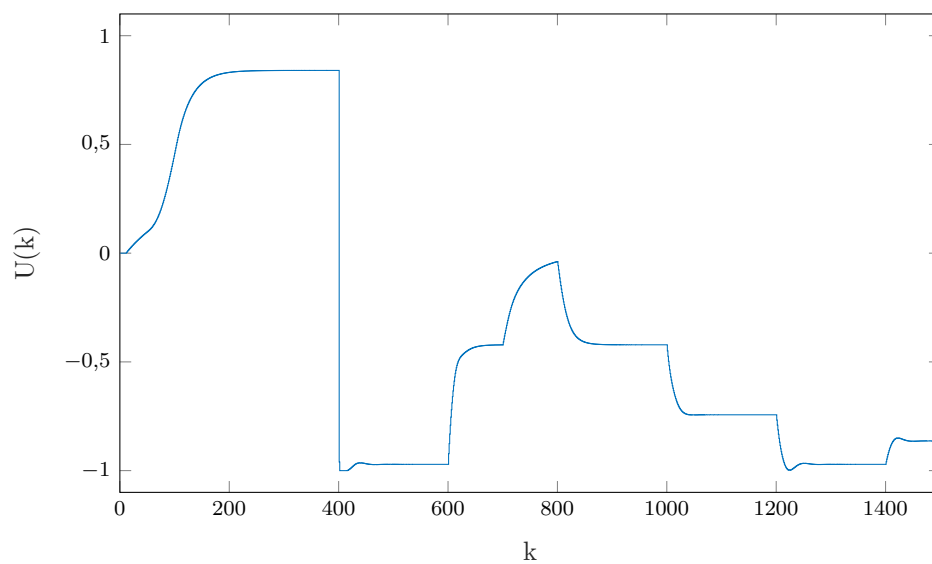
$$E = 158,7436 \quad (7.2)$$

7.0.2. 3 regulatory lokalne

$$\lambda_1 = 320; \lambda_2 = 40; \lambda_3 = 0,3; \quad (7.3)$$



Rys. 7.3. Regulacja rozmyta DMC, 3 regulatory

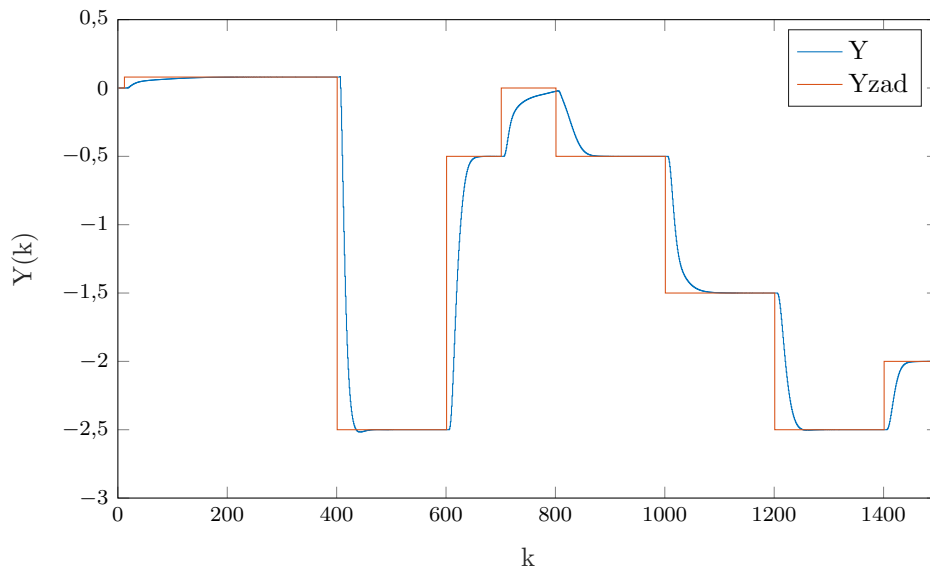


Rys. 7.4. Sterowanie rozmyte DMC, 3 regulatory

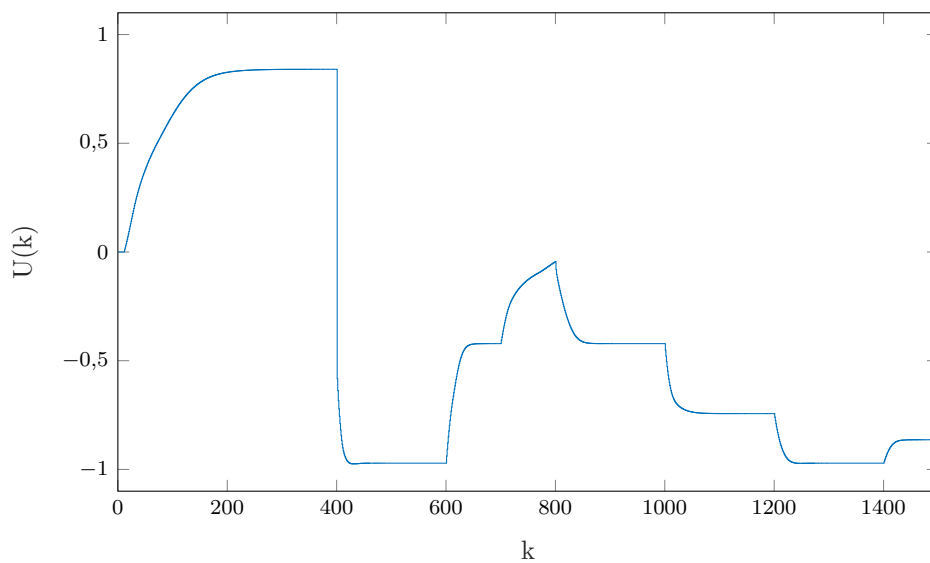
$$E = 152,9056 \quad (7.4)$$

7.0.3. 4 regulatory lokalne

$$\lambda_1 = 500; \lambda_2 = 160; \lambda_3 = 1; \lambda_4 = 0,4; \quad (7.5)$$



Rys. 7.5. Regulacja rozmyta DMC, 4 regulatory

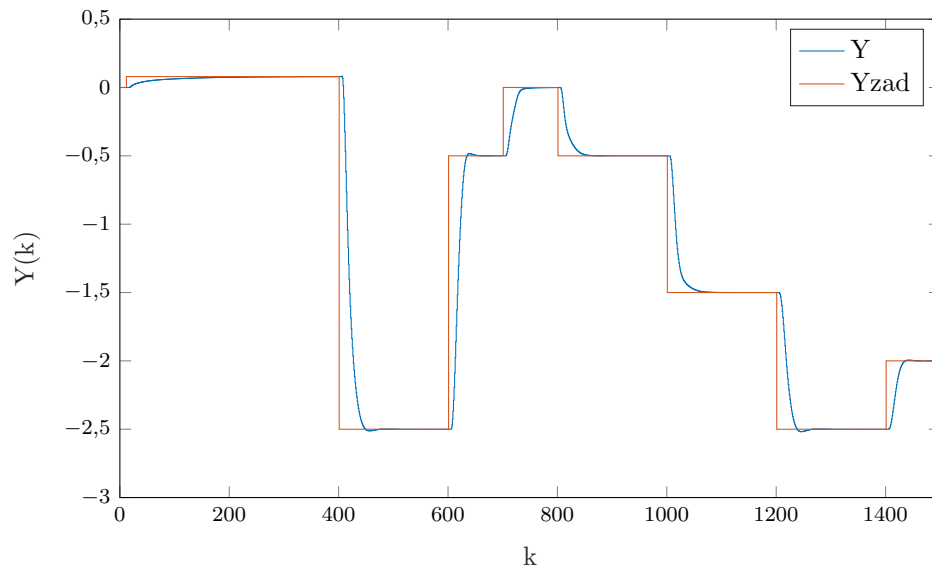


Rys. 7.6. Sterowanie rozmyte DMC, 4 regulatory

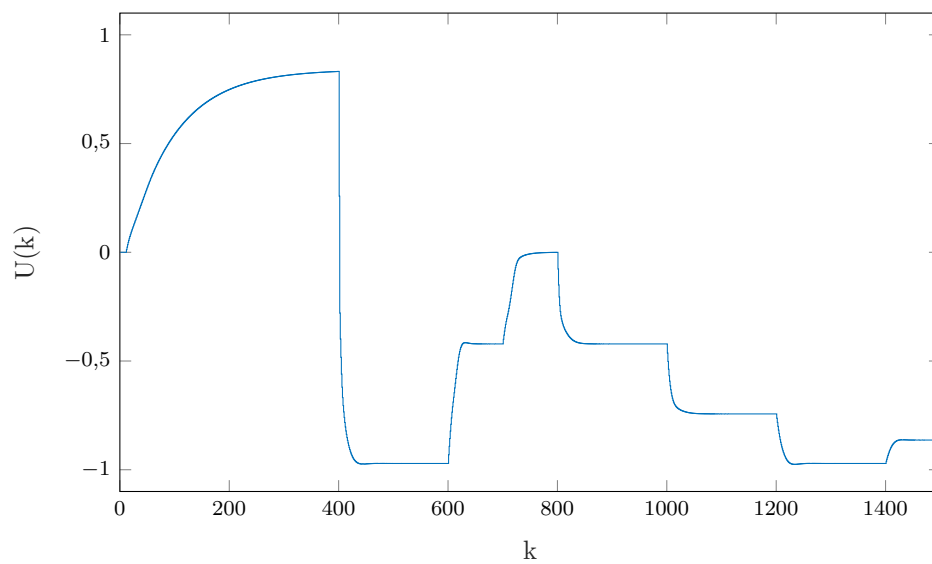
$$E = 178,6968 \quad (7.6)$$

7.0.4. 5 regulatorów lokalnych

$$\lambda_1 = 400; \lambda_2 = 150; \lambda_3 = 10; \lambda_4 = 1; \lambda_5 = 1; \quad (7.7)$$



Rys. 7.7. Regulacja rozmyta DMC, 5 regulatorów



Rys. 7.8. Sterowanie rozmyte DMC, 5 regulatorów

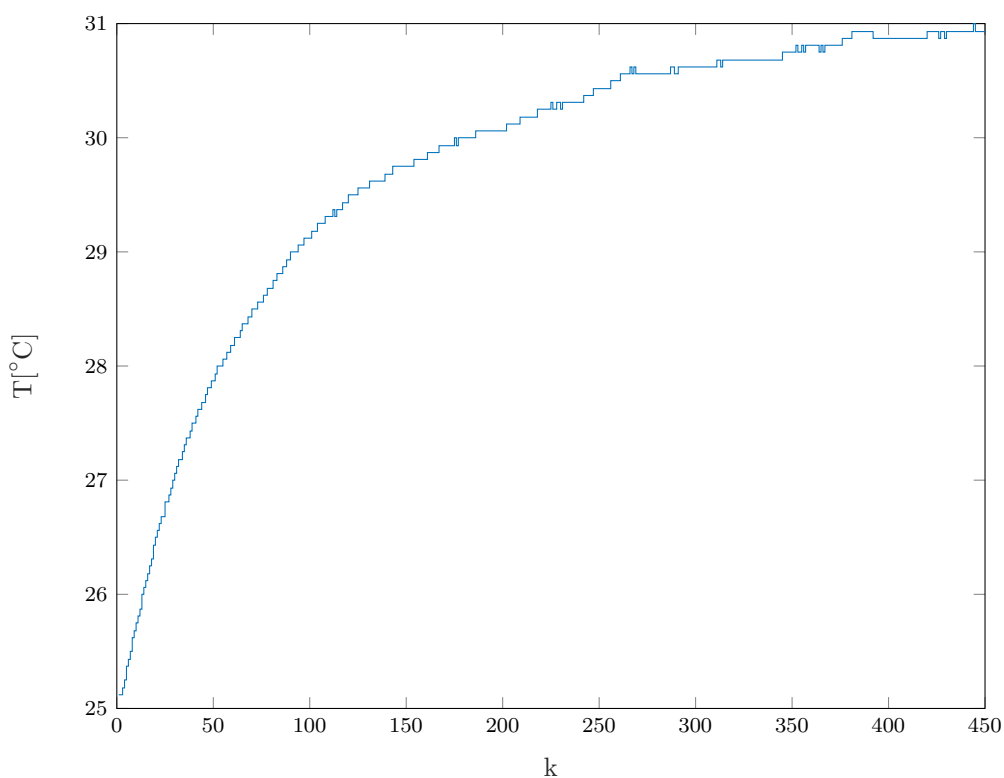
$$E = 185,2058 \quad (7.8)$$

8. Laboratorium

8.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy

W celu określenia wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy ustawiono moc wentylatora $W1 = 50\%$, a moc grzałki $G1 = 25\%$. Po czasie około 8 minut temperatura odczytywana przez czujnik temperatury zaczęła się stabilizować na poziomie $T1 = 30,93^{\circ}\text{C}$.

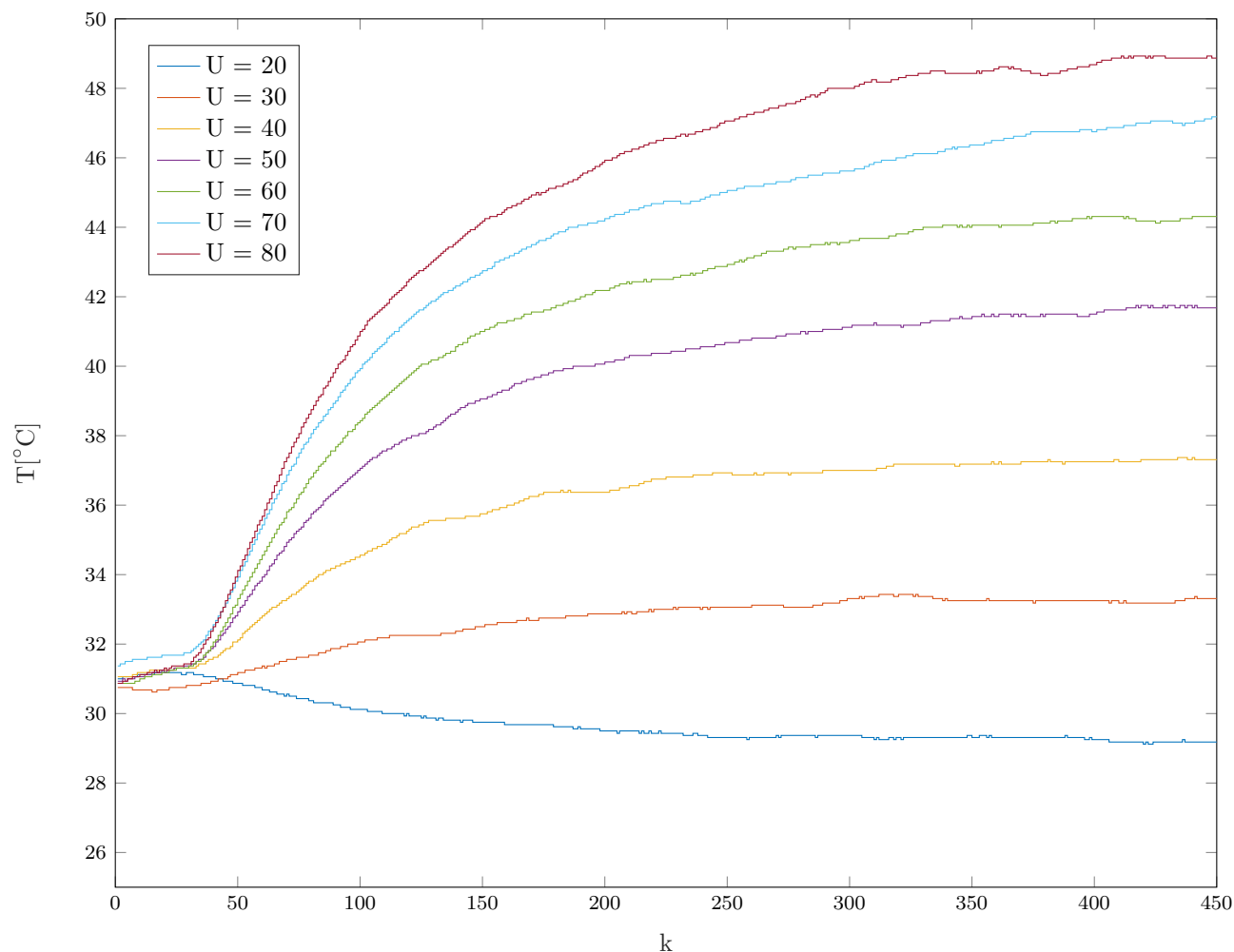
Niestety z powodu ciągłego ruchu powietrza związanego z przemieszczaniem się osób w sali i dużej ilości tych osób wpływających na temperaturę sali oraz czułość stanowiska pomiarowego temperatura odczytywana przez czujnik zaczęła odbiegać i lekko oscylować wokół tej temperatury.



Rys. 8.1. Pomiar temperatury w punkcie pracy

8.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych

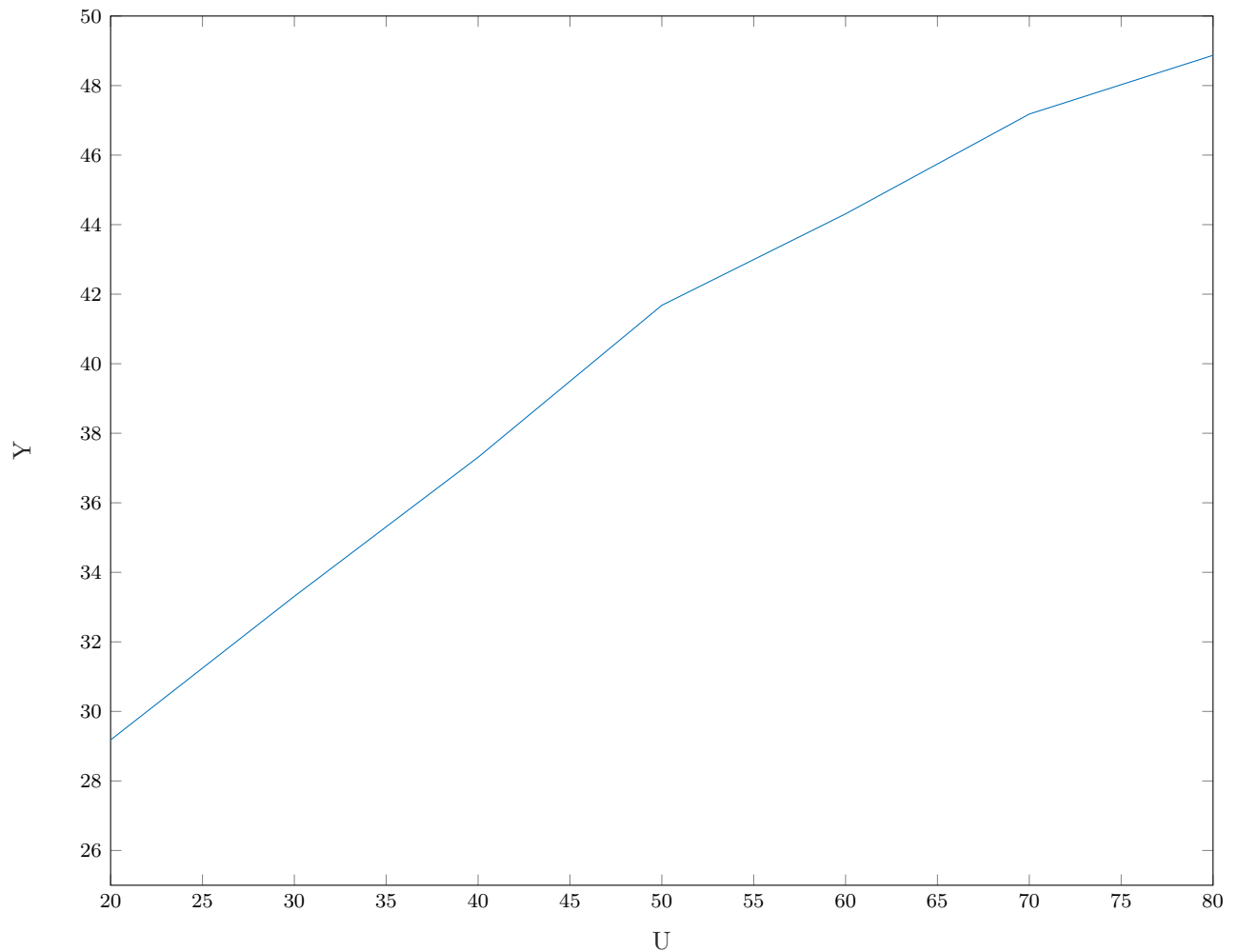
Doprowadziliśmy układ do stanu stabilnego dla 7 różnych wartości sterowania: $U = 20$, $U = 30$, $U = 40$, $U = 50$, $U = 60$, $U = 70$, $U = 80$.



Rys. 8.2. Przebiegi wyjścia dla różnych sterowań

Analizując otrzymane wykresy można wywnioskować, że właściwości statyczne procesu jeżeli i są w przybliżeniu liniowe, to tylko w pewnych zakresach. Zmiany wartości odpowiedzi skokowej dla tych samych chwil są w przybliżeniu proporcjonalne dla pierwszych trzech sterowań oraz dla trzech ostatnich, ale to w przybliżeniu i ogólnie własności statyczne nie są liniowe.

W celu sprawdzenia założeń narysowano charakterystykę statyczną procesu.



Rys. 8.3. Charakterystyka statyczna procesu

Która potwierdziła przypuszczenia, na jej podstawie można stwierdzić, że właściwości statyczne procesu nie są liniowe, a więc nie da się wyliczyć wzmocnienia statycznego.

8.3. Testowanie regulatorów z laboratorium 1

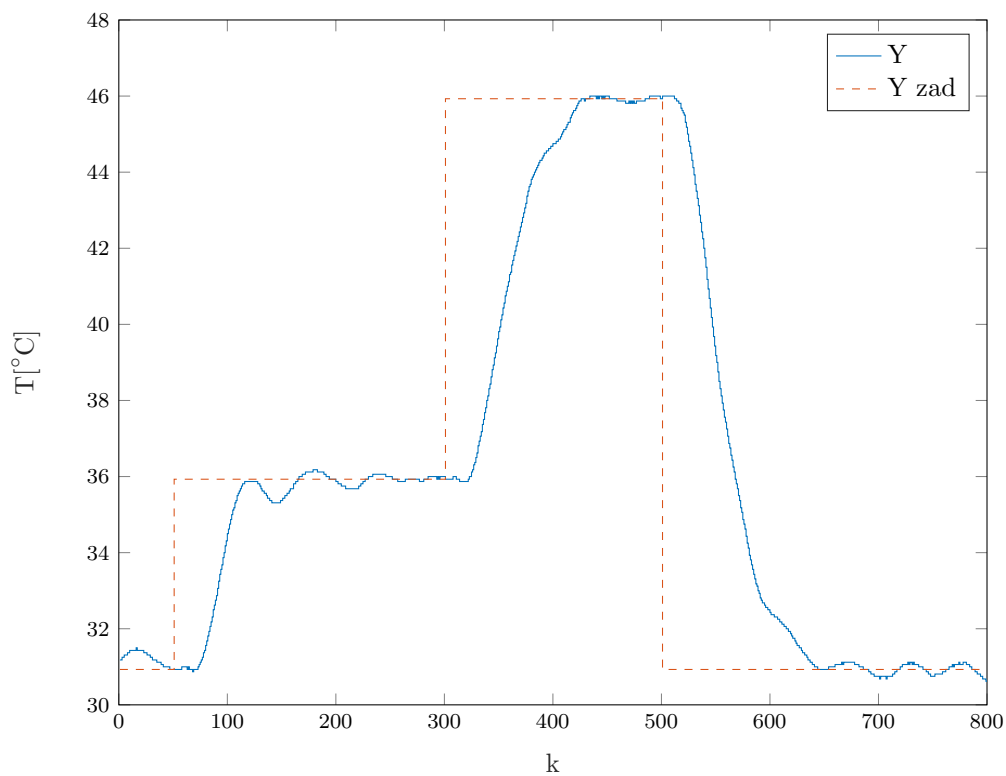
8.3.1. PID z laboratorium 1

W danym podejściu wykorzystaliśmy PID z laboratorium pierwszego, ale w celu stabilizacji regulacji obniżyliśmy wzmocnienie z wartości $K = 30$ do wartości $k = 25$.

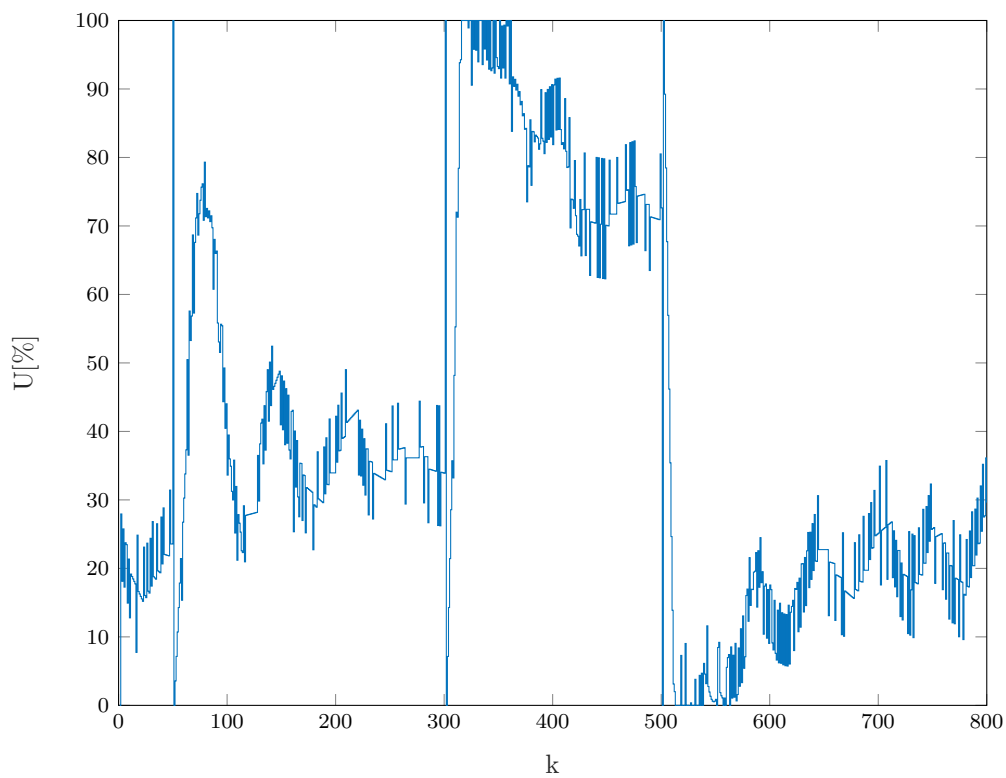
Parametry regulatora:

$$K = 30; T_i = 35; T_d = 4, 5; \quad (8.1)$$

Wyniki działania regulacji:



Rys. 8.4. Regulacja PID z laboratorium 1



Rys. 8.5. Sterowanie PID z laboratorium 1

Wartość wskaźnika jakości:

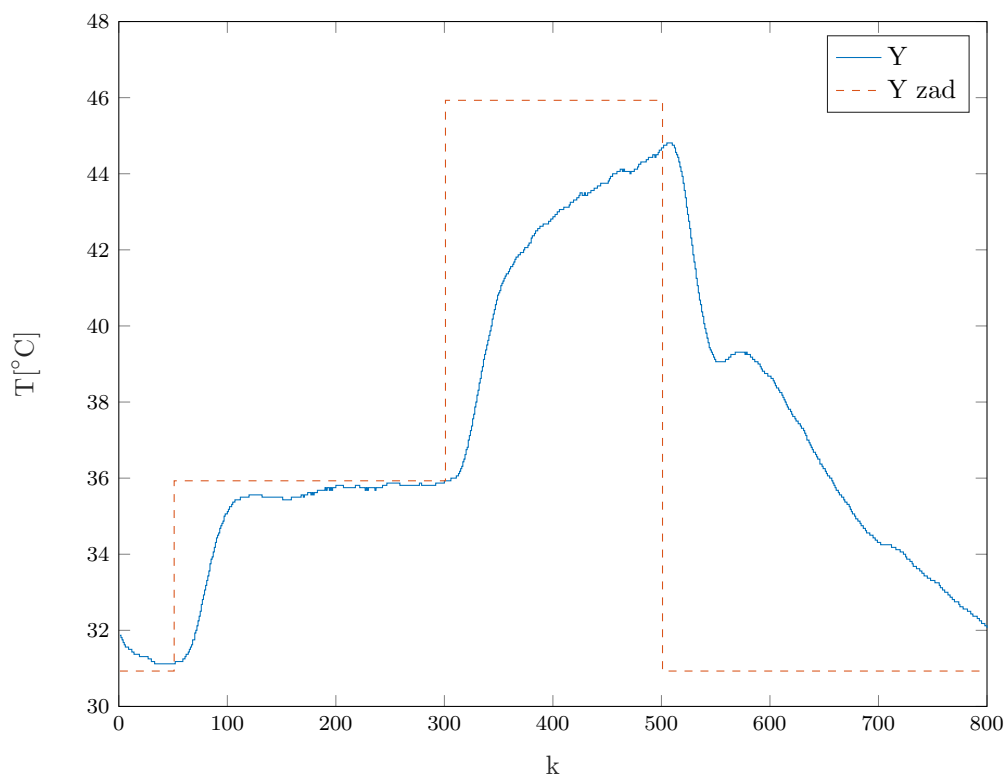
$$E = 19,3149 \quad (8.2)$$

8.3.2. DMC z laboratorium 1

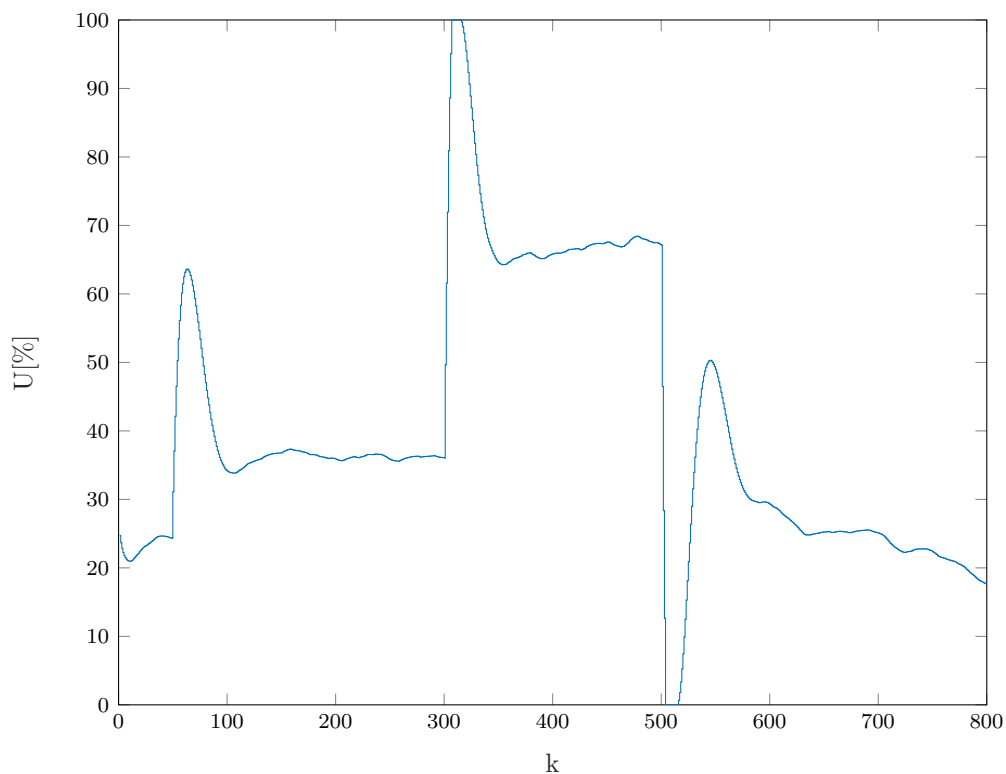
Wykorzystaliśmy parametry DMC z laboratorium drugiego:

$$N = 90; N_u = 10; \lambda = 0,4; = \quad (8.3)$$

Wyniki działania regulacji:



Rys. 8.6. Regulacja DMC z laboratorium 1



Rys. 8.7. Sterowanie DMC z laboratorium 1

Wartość wskaźnika jakości:

$$E = 23,7559 \quad (8.4)$$

Jak widać, DMC działa gorzej, ponieważ jego działanie mocno zależy od odpowiedzi skokowej, która się zmieniała.