

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

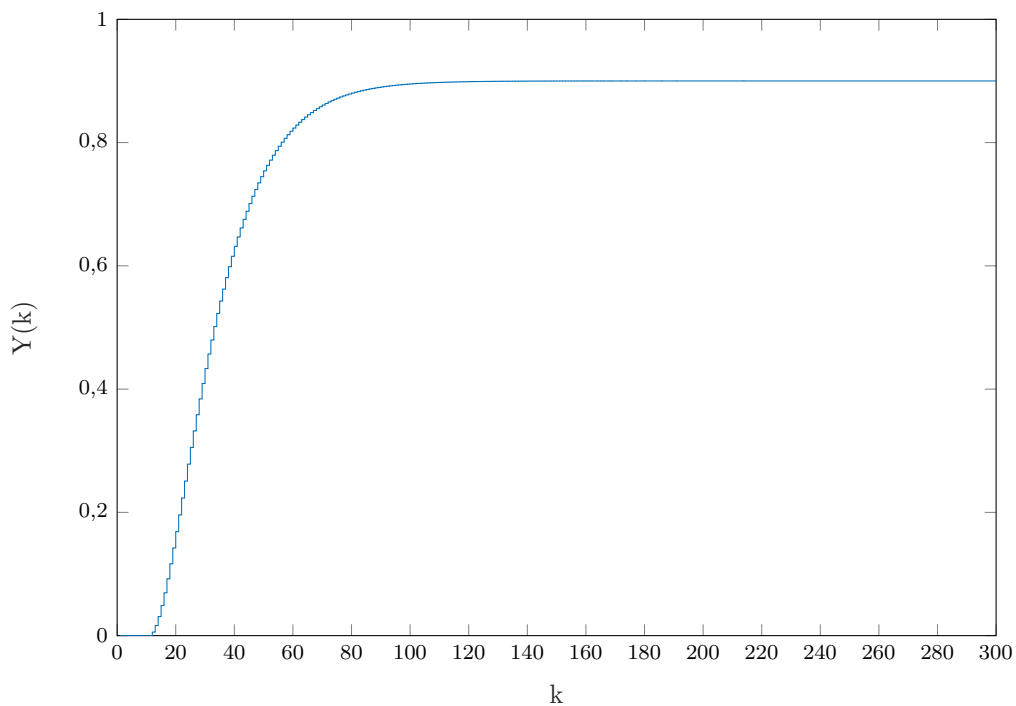
Warszawa, 2021

Spis treści

1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości	2
2. Odpowiedzi skokowe	3
2.1. Odpowiedzi skokowe	3
2.2. Charakterystyka statyczna	3
2.3. Wzmocnienie statyczne	4
3. Przekształcenie odpowiedzi skokowej na potrzeby algorytmu DMC	5
3.1. Przekształcenie odpowiedzi	5
3.2. Wykres odpowiedzi skokowej	5
4. Algorytm regulacji	7
4.1. Algorytm cyfrowy regulacji PID	7
4.2. Algorytm DMC w wersji analitycznej	7
5. Strojenie regulatorów	8
5.1. Strojenie regulatora PID	8
5.2. Strojenie regulatora DMC	10
6. Optymalizacja wskaźników jakości	15
6.1. Regulator PID	15
6.2. Regulator DMC	18
7. Laboratorium	22
7.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy	22
7.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych	22
7.3. Przekształcenie i aproksymacja odpowiedzi skokowej	24
7.4. Dobranie nastaw regulatora PID i parametrów algorytmu DMC	25

1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości

Żeby sprawdzić poprawność podanych wartości podajemy na wejście wartość U_{PP} i patrzymy na jakiej wartości się ustali Y_{PP} .



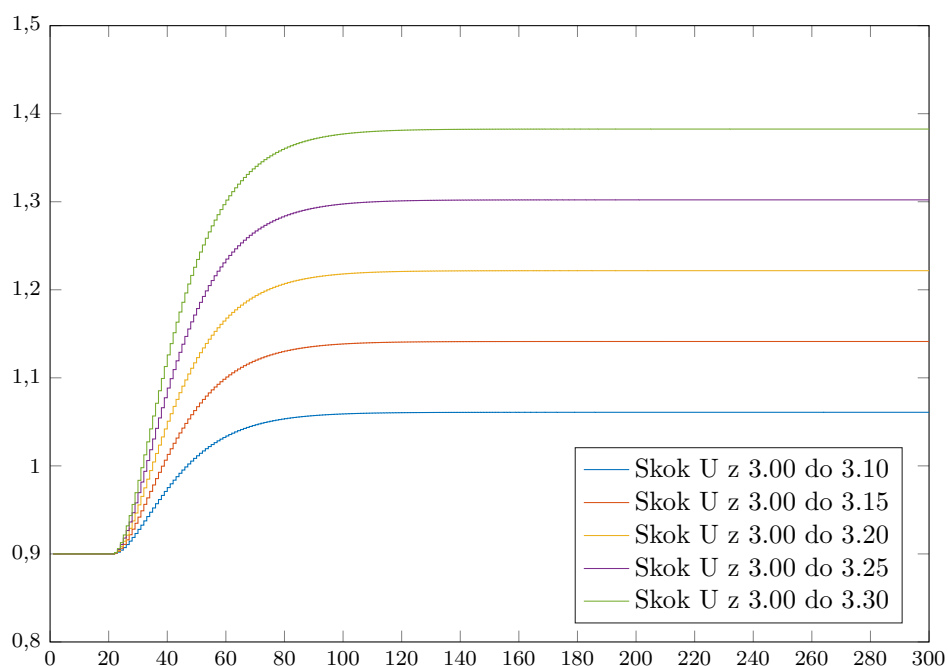
Rys. 1.1. Przebieg wyjścia obiektu przy stałym wejściu równym U_{PP}

Jak możemy obserwować wyjście się ustala na poprawnej wartości, czyli na 0,9.

2. Odpowiedzi skokowe

2.1. Odpowiedzi skokowe

Rozważamy 5 różnych wartości skoku: 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3.

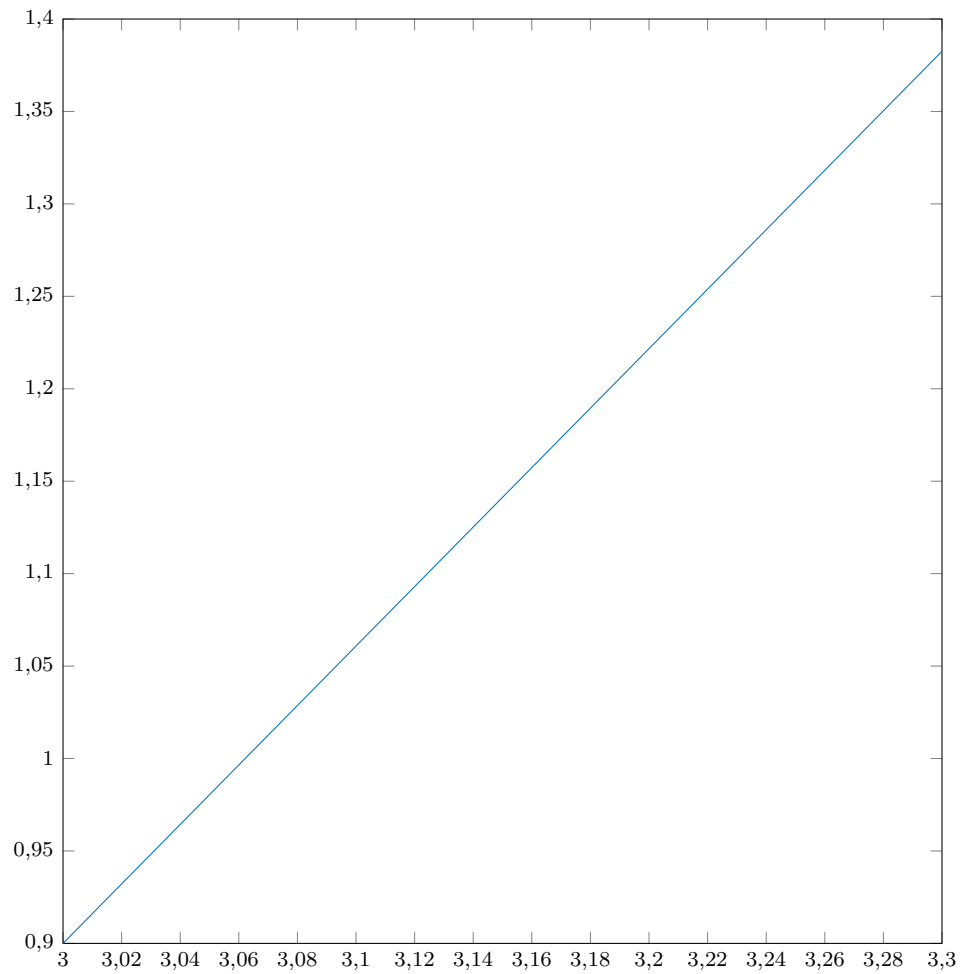


Rys. 2.1. Wykresy odpowiedzi skokowych

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

2.2. Charakterystyka statyczna

Jako dane do wykresu bierzemy 6 punktów. Pierwszy punkt to U_{PP} i Y_{PP} . Kolejne punkty to wejścia razem ze skokiem i odpowiednie wartości wyjścia.

Rys. 2.2. Charakterystyka statyczna $y(u)$

2.3. Wzmocnienie statyczne

Jak widać z powyższego wykresu, charakterystyka jest prawie idealnie liniowa. Wyliczone wzmocnienie statyczne:

$$K_{\text{stat}} = 1,6085 \quad (2.1)$$

3. Przekształcenie odpowiedzi skokowej na potrzeby algorytmu DMC

3.1. Przekształcenie odpowiedzi

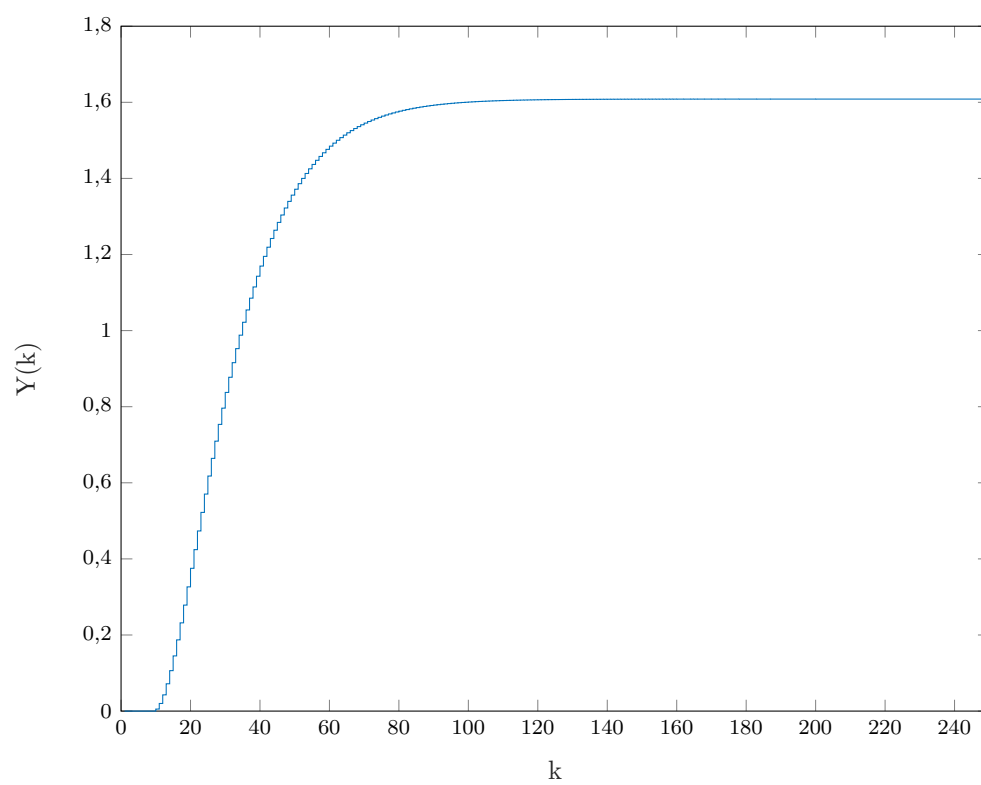
Odpowiedź skokowa wykorzystywana w algorytmach DMC tworzona jest przy skoku jednostkowym od chwili $k=0$ (od $k \geq 0$ sygnał sterujący ma wartość 1, a dla $k < 0$ wartość 0). Żadna z odpowiedzi skokowych z podpunktu 2 nie posiada tej własności, dlatego też należy skorzystać z poniższego wzoru:

$$S_i = \frac{Y(i) - Y_{pp}}{\Delta U}, \text{ dla } i = 1, 2 \dots D \quad (3.1)$$

Przy jego pomocy można wyznaczyć kolejne zestawy liczb $s_1, s_2 \dots$, które są kolejnymi wartościami wyznaczanej odpowiedzi skokowej. We wzorze Y_{pp} oznacza wyjście w punkcie pracy, ΔU wartość skoku sygnału sterującego. Natomiast $Y(i)$ to wartości przekształcanej odpowiedzi skokowej, dla kolejnych chwil od momentu wystąpienia skoku sygnału sterującego. Do przekształcenia odpowiedzi skokowej według powyższego wzoru wybrano odpowiedź procesu dla zmiany sygnału sterującego o $\Delta U = 0,3$ (skok z $U_{pp} = 3$ do $U = 3,3$). Skok sygnału sterującego zadany był w chwili $k=12$.

3.2. Wykres odpowiedzi skokowej

Po wyliczeniu kolejnych współczynników s i naniesieniu ich na wykres odpowiedź skokowa wygląda następująco:



Rys. 3.1. Odpowiedź skokowa przekształcona

4. Algorytmy regulacji

4.1. Algorytm cyfrowy regulacji PID

Prawo regulacji cyfrowego PID:

$$u(k) = r_2 e(k-2) + r_1 e(k-1) + r_0 e(k) + u(k-1), \text{ dla } k = 12, 13 \dots N \quad (4.1)$$

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} .

4.2. Algorytm DMC w wersji analitycznej

Prawo regulacji DMC:

$$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) \quad (4.2)$$

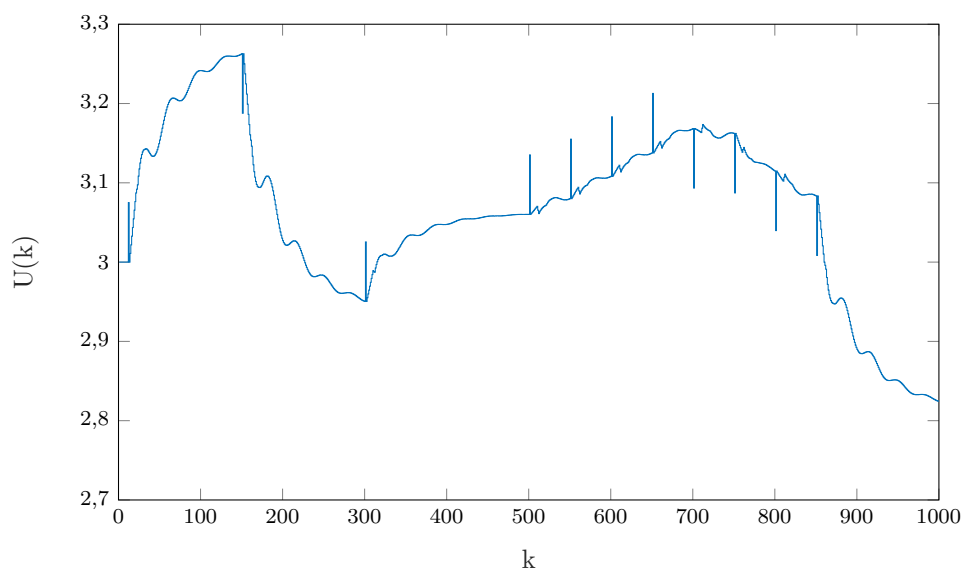
Gdzie $\Delta U(k)$ to wektor N_u (horyzont sterowania) przyszłych wartości sterowania, $Y^0(k)$ to przewidywana odpowiedź z modelu procesu, K - macierz policzona raz na początku ze współczynników odpowiedzi skokowej, uwzględniając wybrany współczynnik λ oraz horyzonty predykcji i sterowania.

5. Strojenie regulatorów

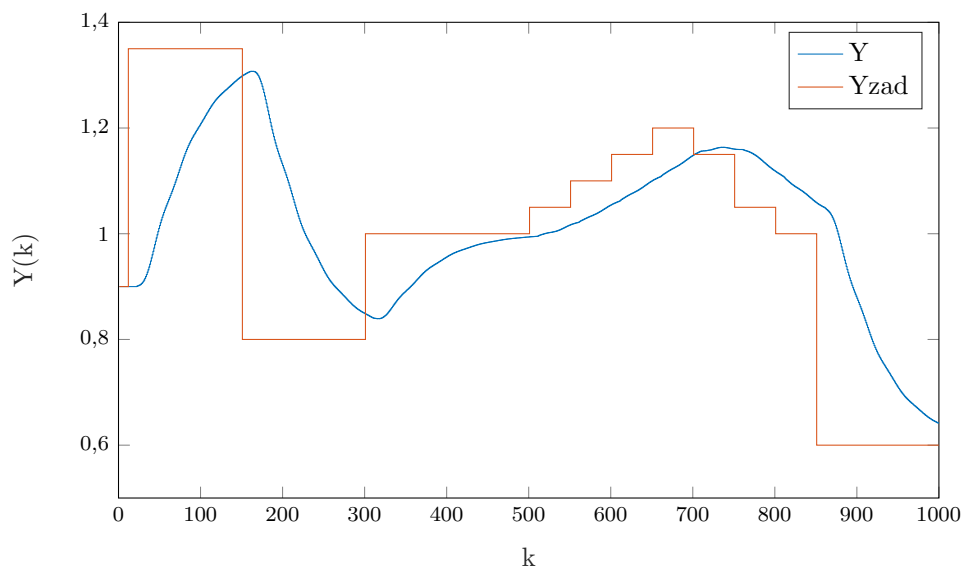
5.1. Strojenie regulatora PID

Otrzymane metodą ZN nastawy regulatora PID: $K_p = 1.212$, $T_i = 25$, $T_d = 6$.

Wyniki symulacji o długości $n = 1000$ dla parametrów:



Rys. 5.1. Sterowanie PID dla parametrów ZN

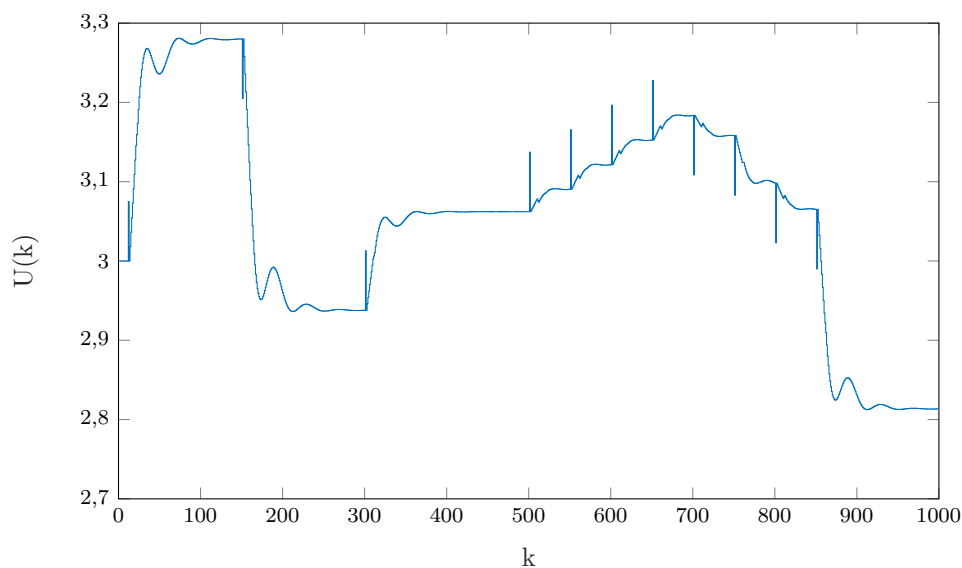


Rys. 5.2. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów ZN

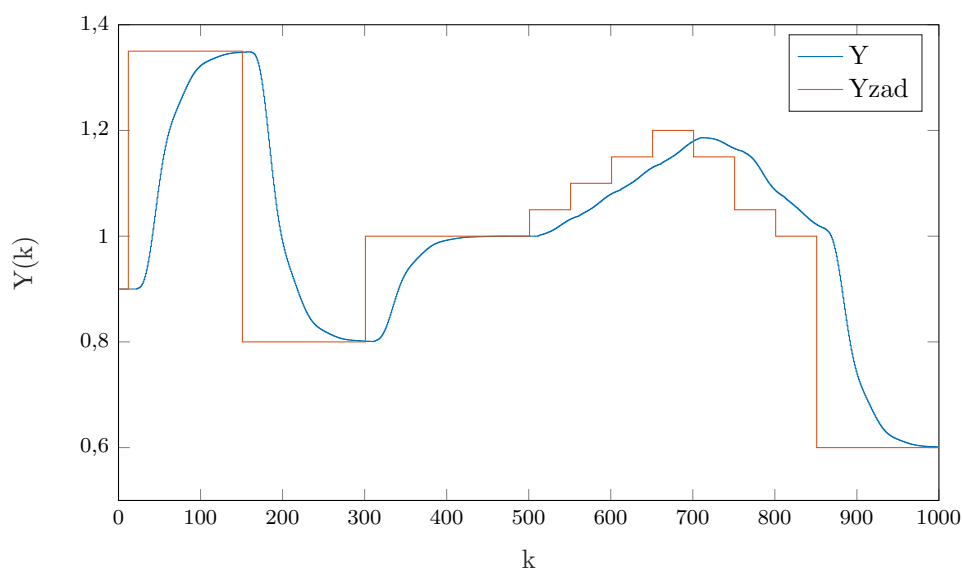
Wskaźnik jakości regulacji:

$$E = 36,0711 \quad (5.1)$$

Zmieniając T_i i T_d na 15 i 4 odpowiednio:



Rys. 5.3. Sterowanie PID dla parametrów $K = 1,212$, $T_i = 15$, $T_d = 4$



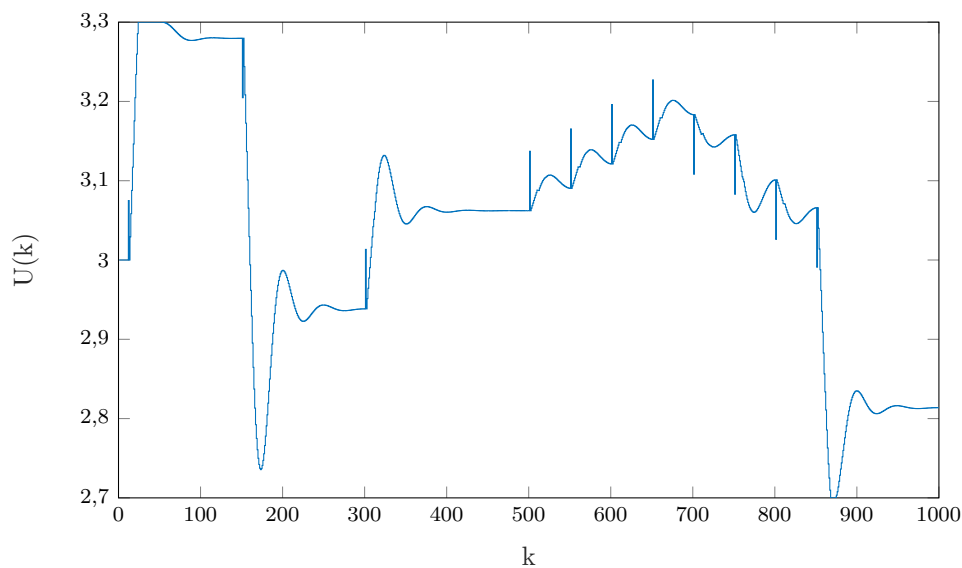
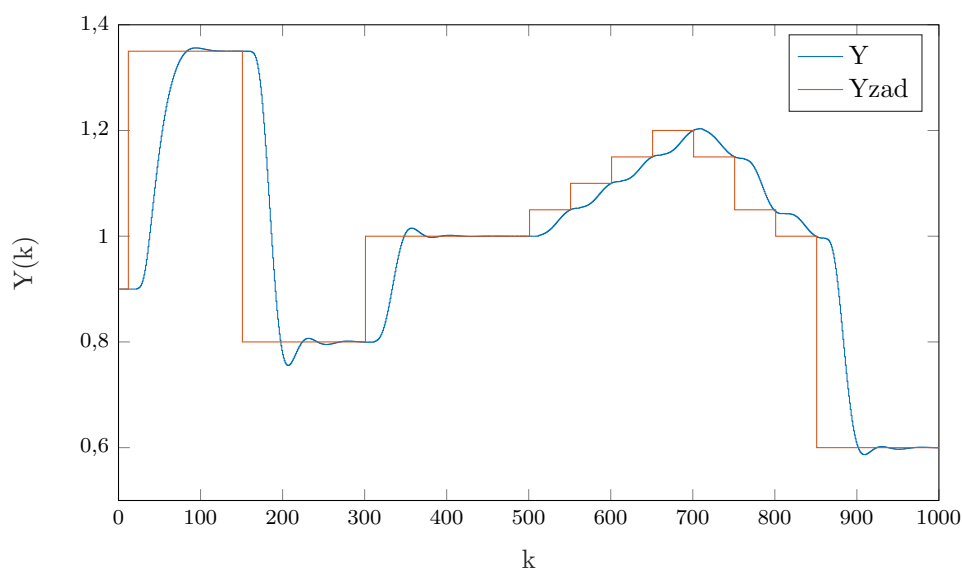
Rys. 5.4. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $K = 1,212$, $T_i = 15$, $T_d = 4$

Wskaźnik jakości regulacji:

$$E = 25,6710 \quad (5.2)$$

Wartości parametrów dla których wartość wyjścia najlepiej śledzi wartość zadaną (na oko) to:

$$K = 1,3; T_i = 10; T_d = 3; \quad (5.3)$$

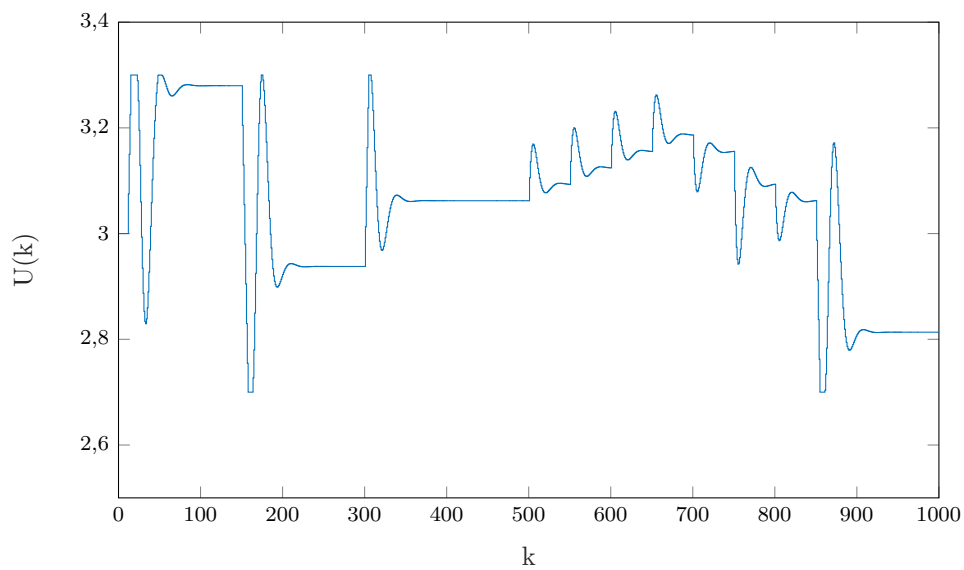
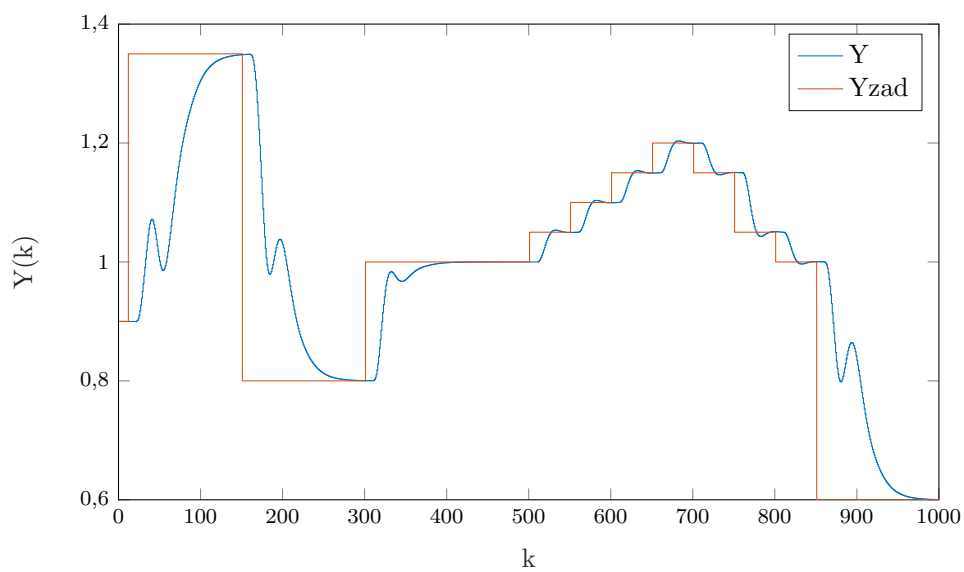
Rys. 5.5. Sterowanie PID dla parametrów $K = 1,3$, $T_i = 10$, $T_d = 3$ Rys. 5.6. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $K = 1,3$, $T_i = 10$, $T_d = 3$

Wskaźnik jakości regulacji:

$$E = 20,5988 \quad (5.4)$$

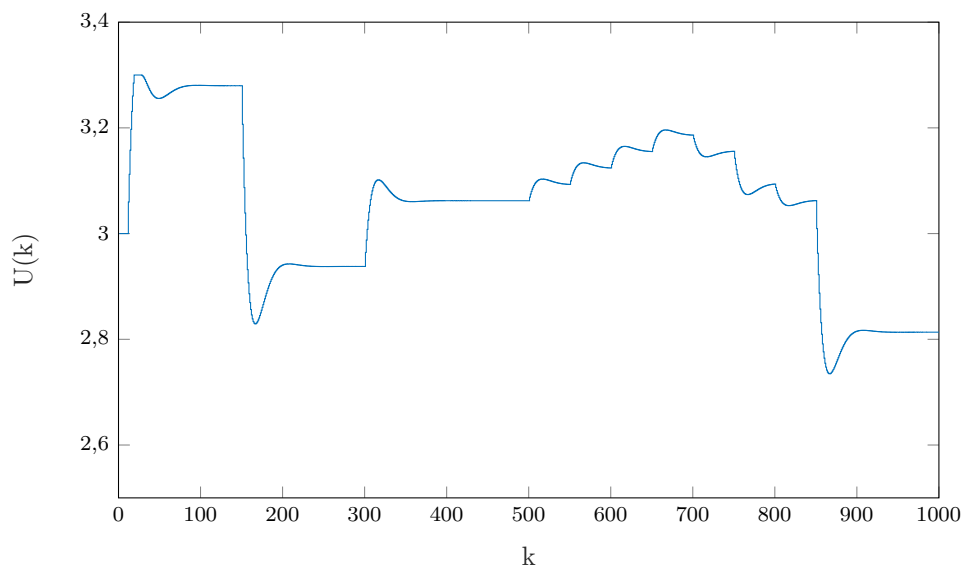
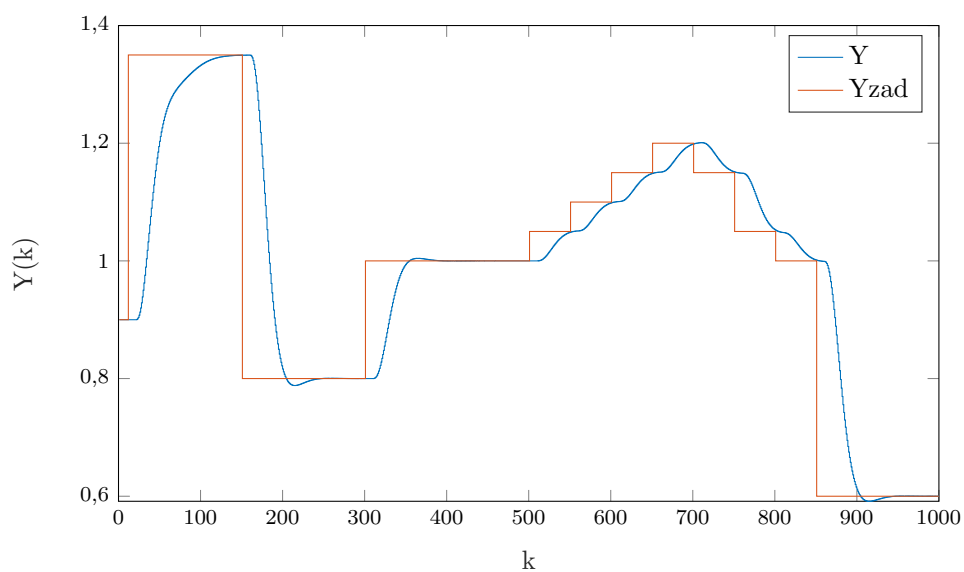
5.2. Strojenie regulatora DMC

Dostrojenie regulatora zaczynamy od losowy wybranych parametrów: $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$.

Rys. 5.7. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$ Rys. 5.8. Wyjście DMC dla parametrów $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 1$

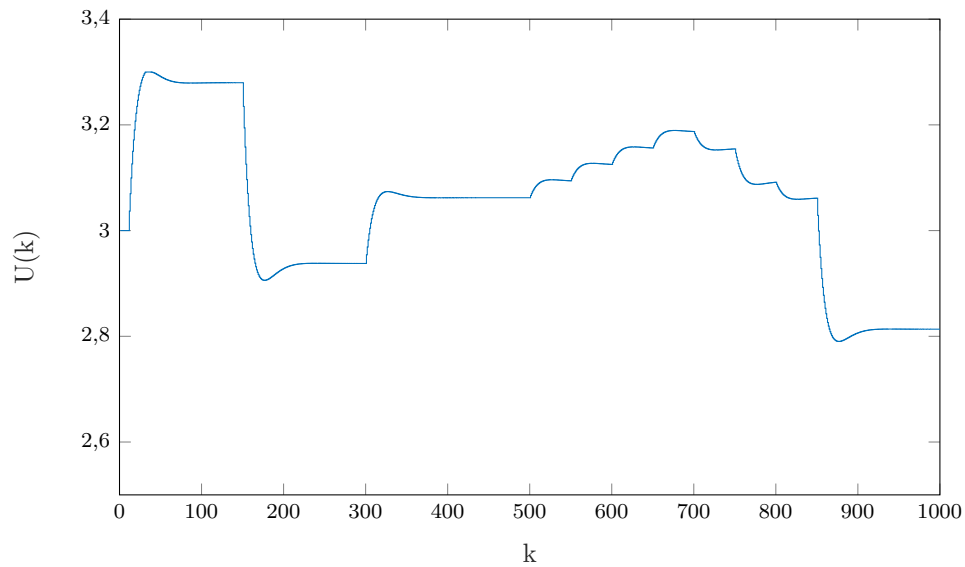
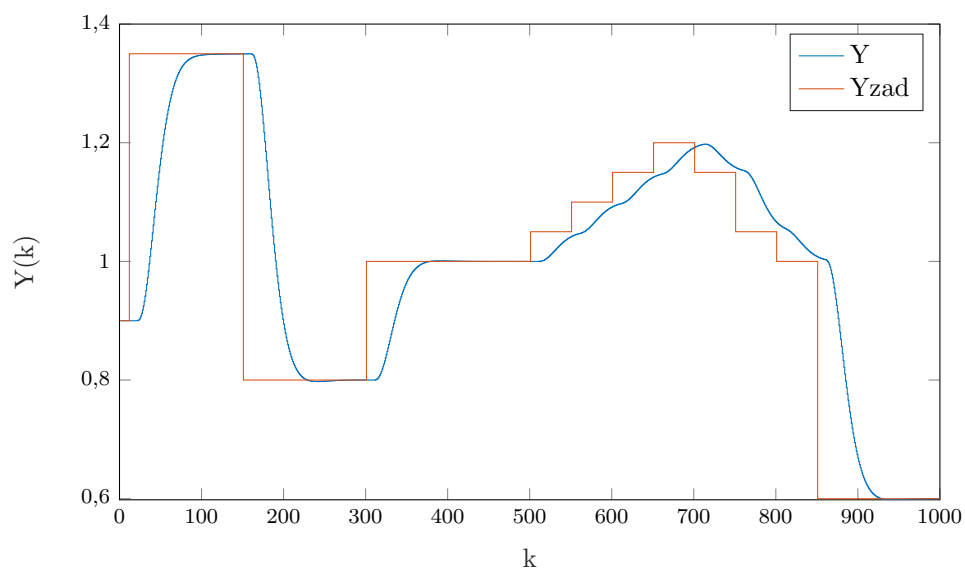
$$E = 22,3271 \quad (5.5)$$

Zwiększając λ do 50 otrzymujemy dużo lepsze śledzenie na wyjściu.

Rys. 5.9. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 50$ Rys. 5.10. Wyjście DMC dla parametrów $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 50$

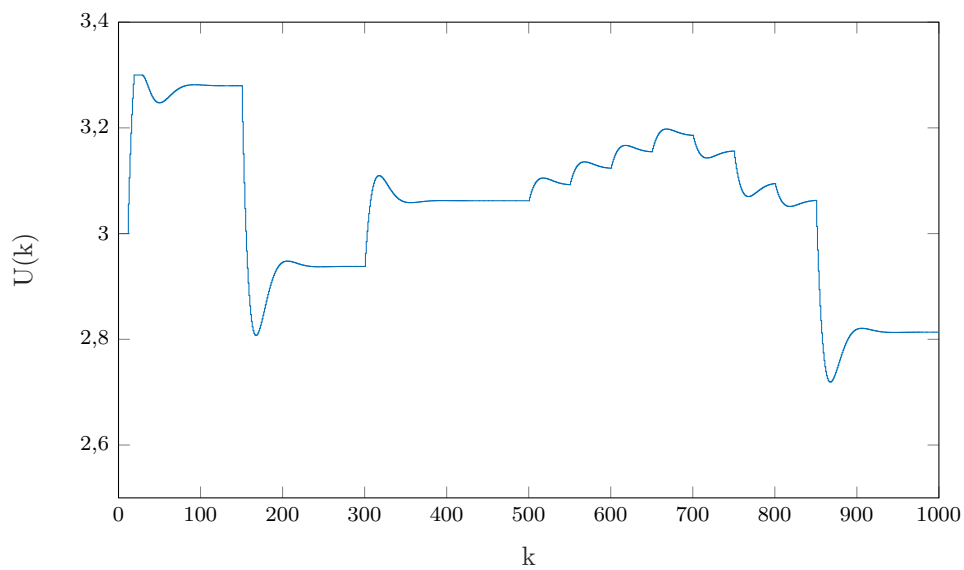
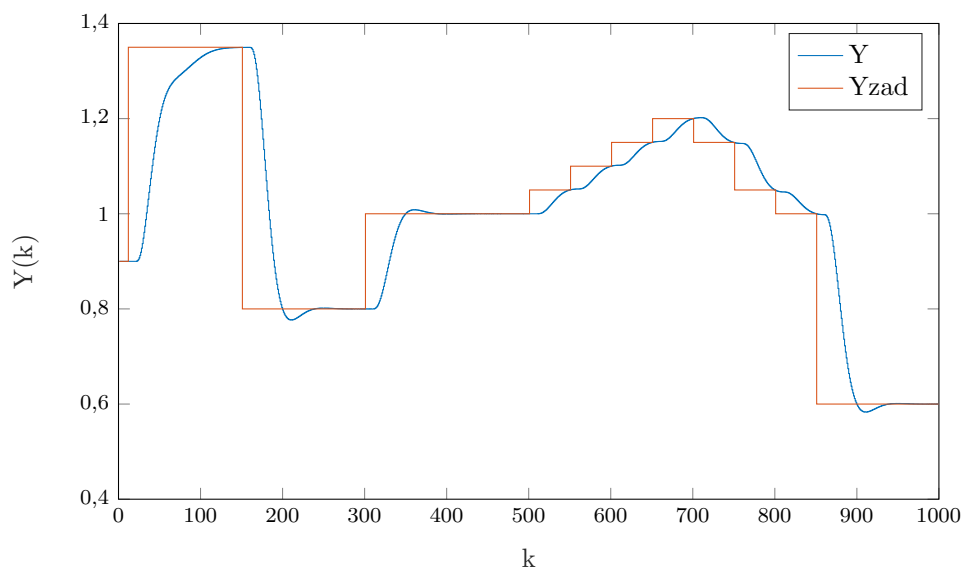
$$E = 18,4148 \quad (5.6)$$

Zwiększając jeszcze bardziej λ widzimy że regulacja przy dużym skoku jest szybsza, natomiast przy częstych małych zmianach wartości zadanej regulacja działa gorzej.

Rys. 5.11. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 200$ Rys. 5.12. Wyjście DMC dla parametrów $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda = 200$

$$E = 20,9602 \quad (5.7)$$

Najlepszy wynik eksperymentu dały parametry: $N = 80$, $N_u = 20$, $\lambda = 60$.

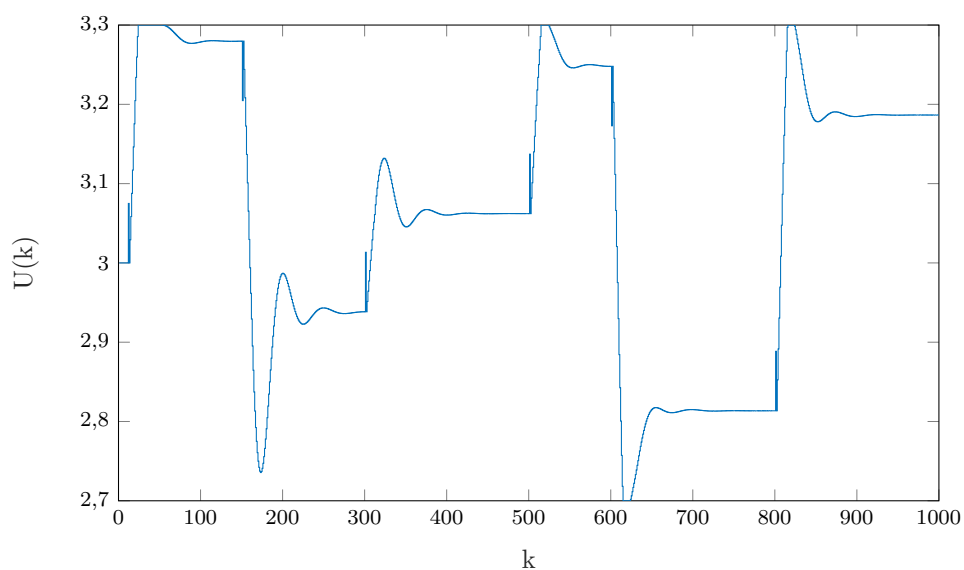
Rys. 5.13. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 80$, $N_u = 20$, $\lambda = 60$ Rys. 5.14. Wyjście DMC dla parametrów $N = 80$, $N_u = 20$, $\lambda = 60$

$$E = 18,3800 \quad (5.8)$$

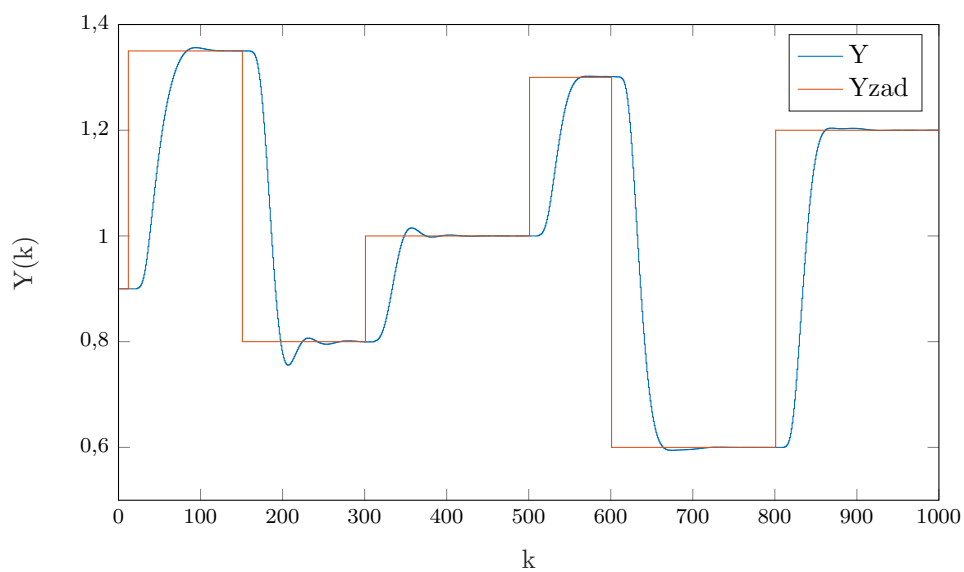
6. Optymalizacja wskaźników jakości

6.1. Regulator PID

Dla tego zadania zastosowaliśmy inną trajektorię zadaną. Wynik działania regulacji PID o wcześniej dobranych parametrach dla nowej trajektorii:



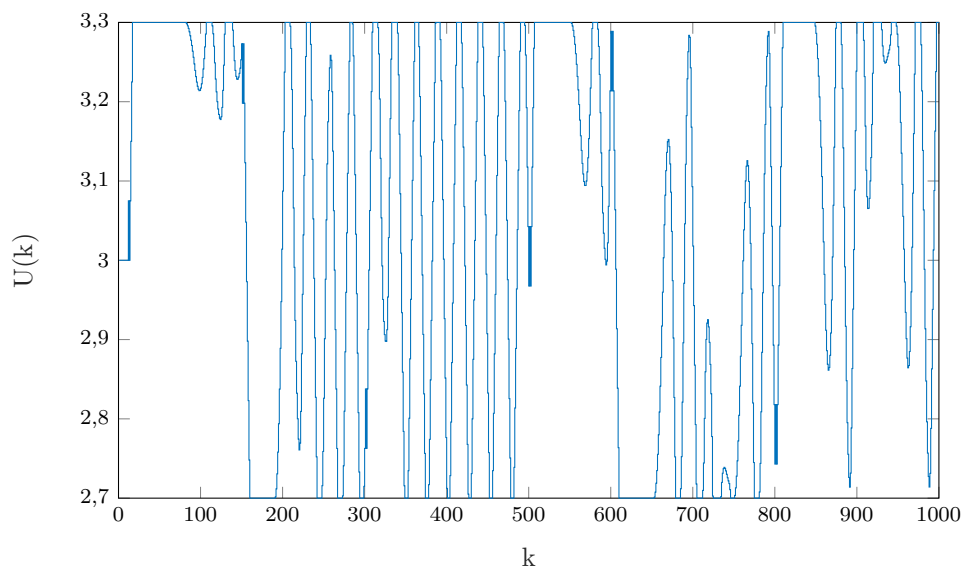
Rys. 6.1. Sterowanie PID dla parametrów $K = 1, 3$, $T_i = 10$, $T_d = 3$



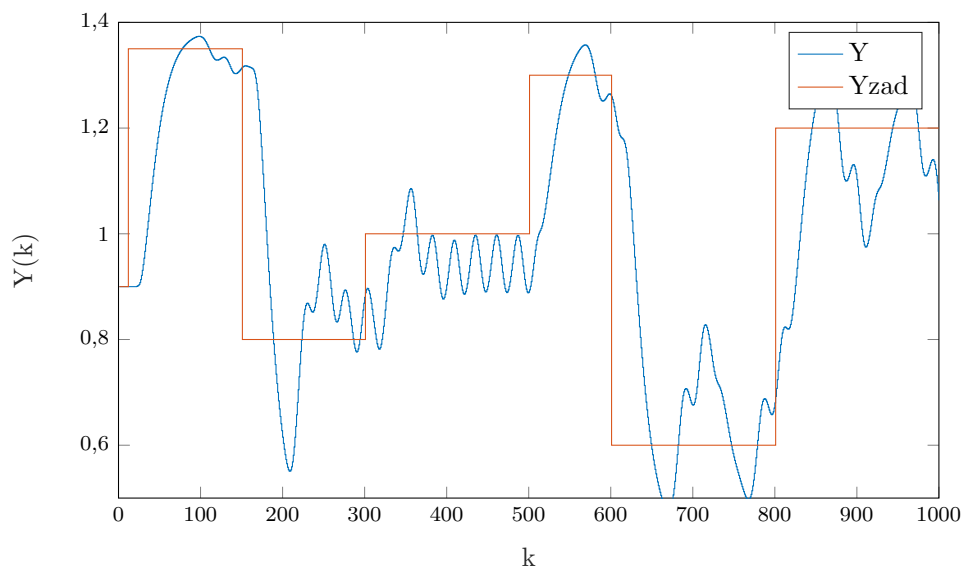
Rys. 6.2. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $K = 1, 3$, $T_i = 10$, $T_d = 3$

$$E = 42,3494 \quad (6.1)$$

W wyniku działania programu, który szukał lepszych parametrów regulatorów, patrząc na wskaźnik jakości E , dostaliśmy wartości, przy których regulacja jest bardzo oscylacyjna, przy czym wskaźnik jakości był tym mniejszy, im większe było wzmocnienie. Na przykład dla wartości $K = 1,4$, $T_i = 1,35$, $T_d = 19,55$ regulacja wyglądała następująco:



Rys. 6.3. Sterowanie PID dla parametrów $K = 1,4$, $T_i = 1,35$, $T_d = 19,55$



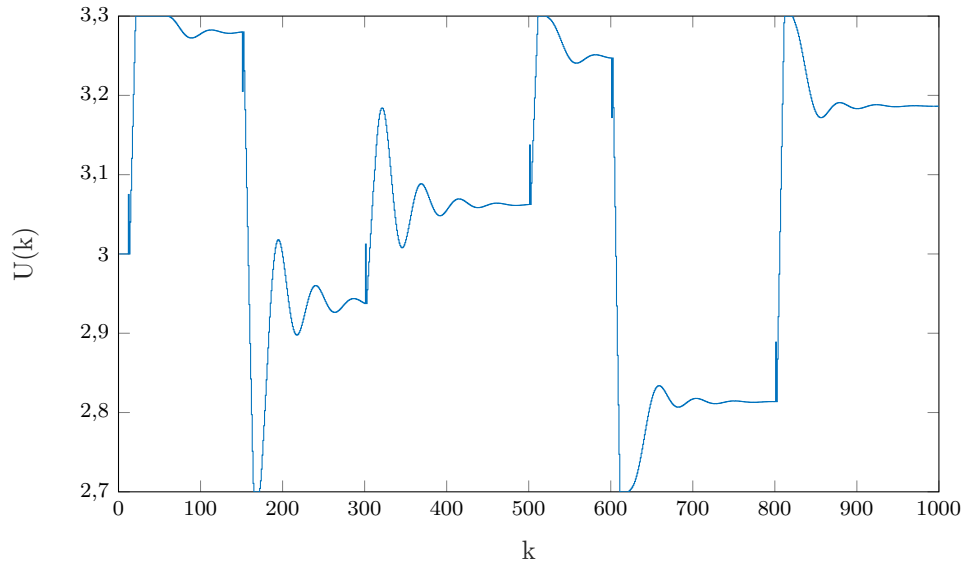
Rys. 6.4. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $K = 1,4$, $T_i = 1,35$, $T_d = 19,55$

$$E = 34,7839 \quad (6.2)$$

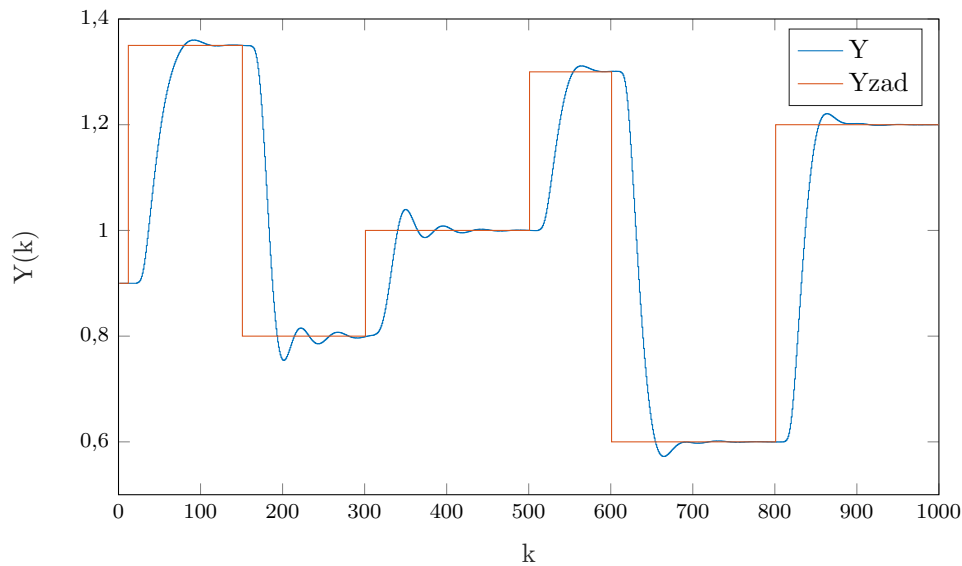
Spróbowałismy inny wskaźnik jakości - średniomodułowy zamiast średniokwadratowego:

$$E_{abs} = \sum_{k=1}^{k_{konc}} |y^{zad}(k) - y(k)| \quad (6.3)$$

Taki wskaźnik dawał bardziej sensowne wyniki. Dla parametrów z poprzedniego zadania $K = 1,3$, $T_i = 10$, $T_d = 3$ wskaźnik jest równy $E_{abs} = 97,4954$, a dla wartości otrzymanych w wyniku optymalizacji wskaźnika średniokwadratowego (wykres powyżej) wskaźnik nowy pokazuje $E_{abs} = 125,6801$. Dla rozpatrzonych wartości wzmocnienia od $K = 1,0$ do $K = 1,6$ oraz wartościami T_i i T_d od 1 do 20, najlepsze okazały się $K = 1,6$, $T_i = 8,95$, $T_d = 3,05$.



Rys. 6.5. Sterowanie PID dla parametrów $K = 1,6$, $T_i = 8,95$, $T_d = 3,05$



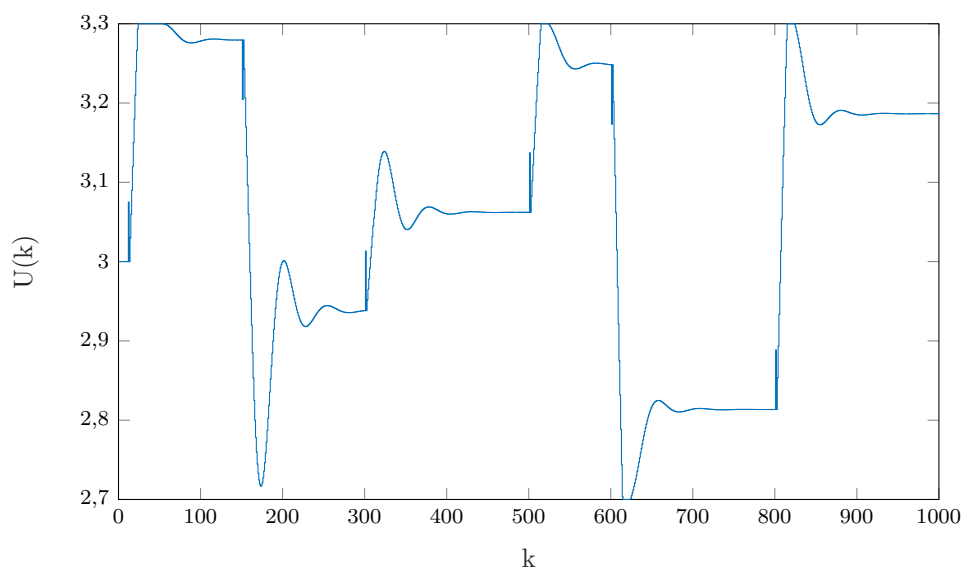
Rys. 6.6. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $K = 1,6$, $T_i = 8,95$, $T_d = 3,05$

$$E = 39,9123 \quad (6.4)$$

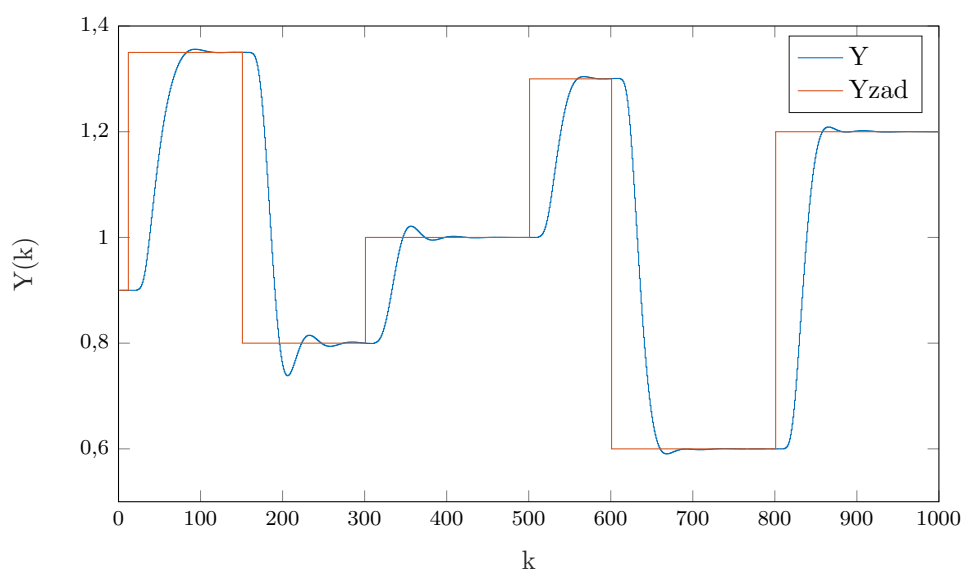
$$E_{abs} = 93,4427 \quad (6.5)$$

Regulacja wygląda lepiej, ale nadal są małe oscylacje. Parametry T_i i T_d dobrze się zoptymalizowały, natomiast wzmocnienie nadal jest zbyt duże.

Żeby tego uniknąć można nie rozpatrywać wartości K większe od 1,3. Przyjmując takie założenie, optymalne parametry to $K = 1,3$, $T_i = 9,75$, $T_d = 2,85$, czyli prawie takie same jak w poprzednim zadaniu.



Rys. 6.7. Sterowanie PID dla parametrów $K = 1,3$, $T_i = 9,75$, $T_d = 2,85$



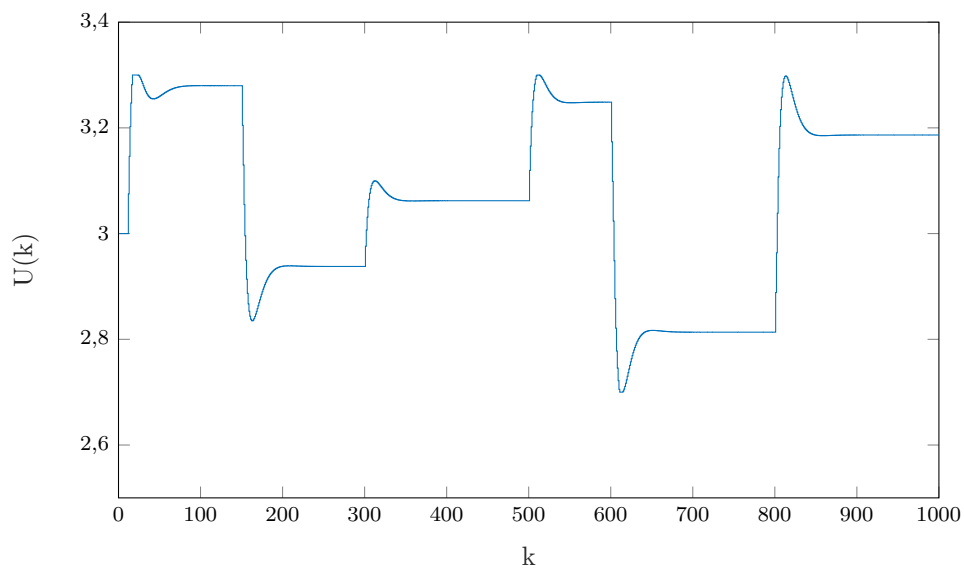
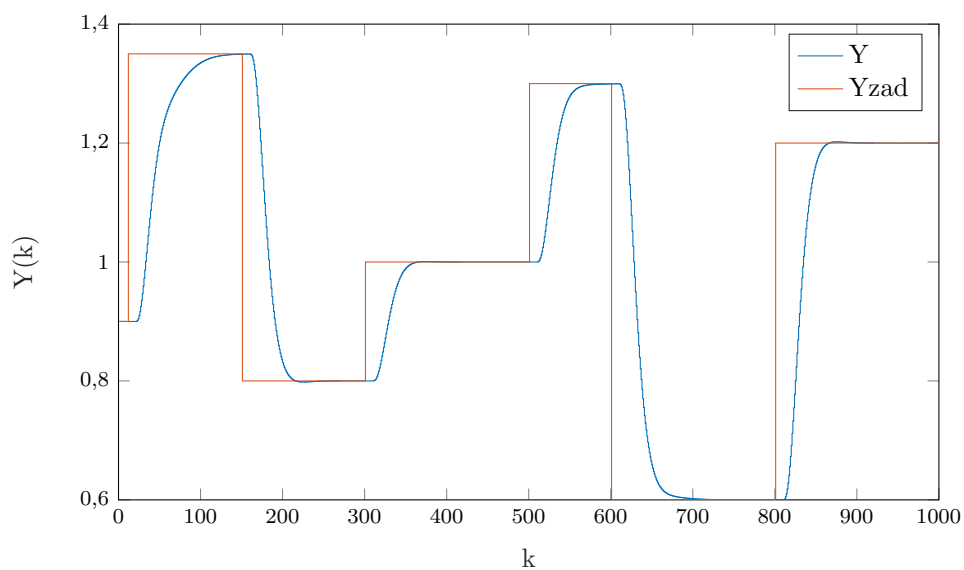
Rys. 6.8. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $K = 1,3$, $T_i = 9,75$, $T_d = 2,85$

$$E = 42,1248 \quad (6.6)$$

$$E_{abs} = 97,2766 \quad (6.7)$$

6.2. Regulator DMC

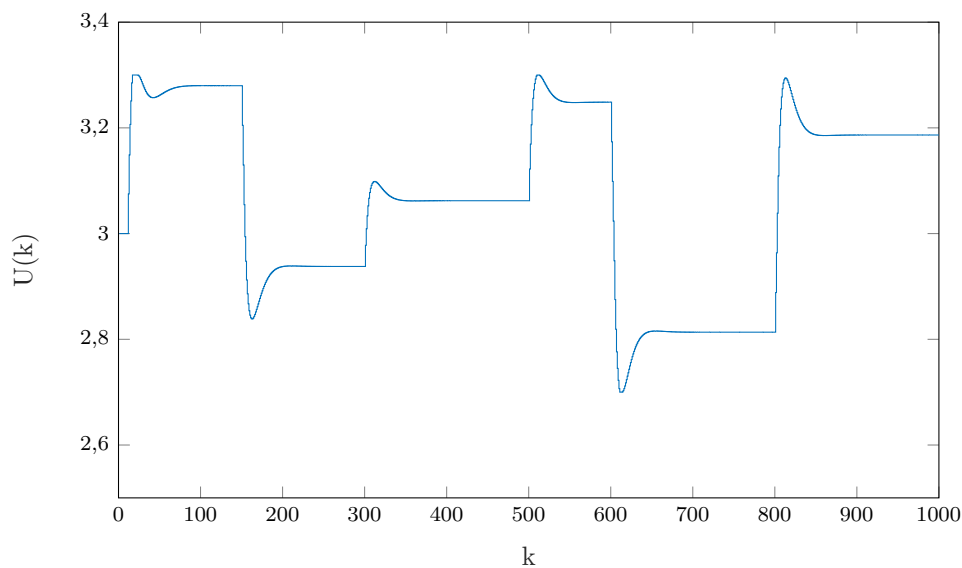
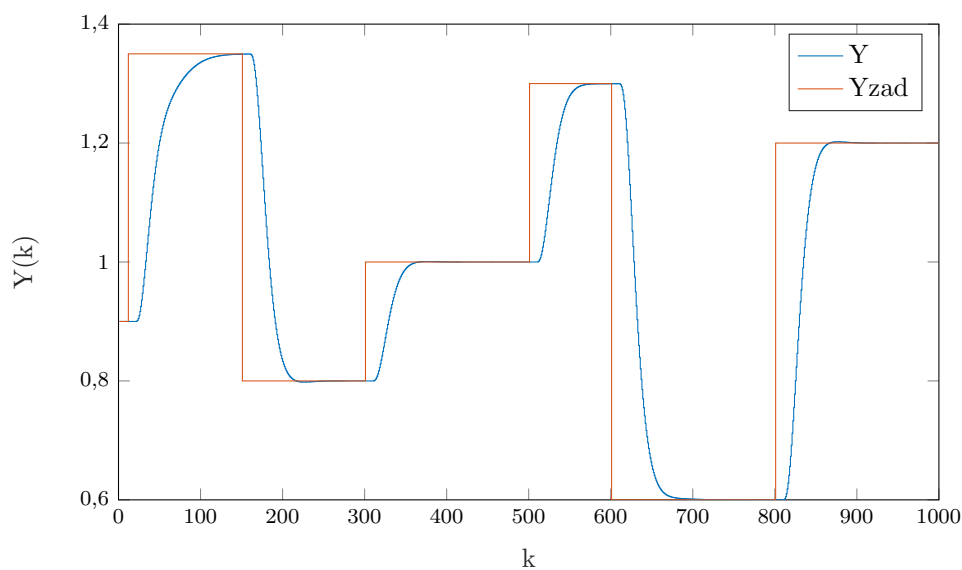
Optymalizując w ten sam sposób wskaźnik E_{abs} regulatora DMC można zauważyć że optymalny wskaźnik zawsze będzie w okolicach 88,7. Na przykład dla horyzontu predykcji $N = 60$ horyzont sterowania i lambda będą odpowiednio $N_u = 5$ i $\lambda = 35$:

Rys. 6.9. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 35$ Rys. 6.10. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 35$

$$E = 36,7364 \quad (6.8)$$

$$E_{abs} = 88,7732 \quad (6.9)$$

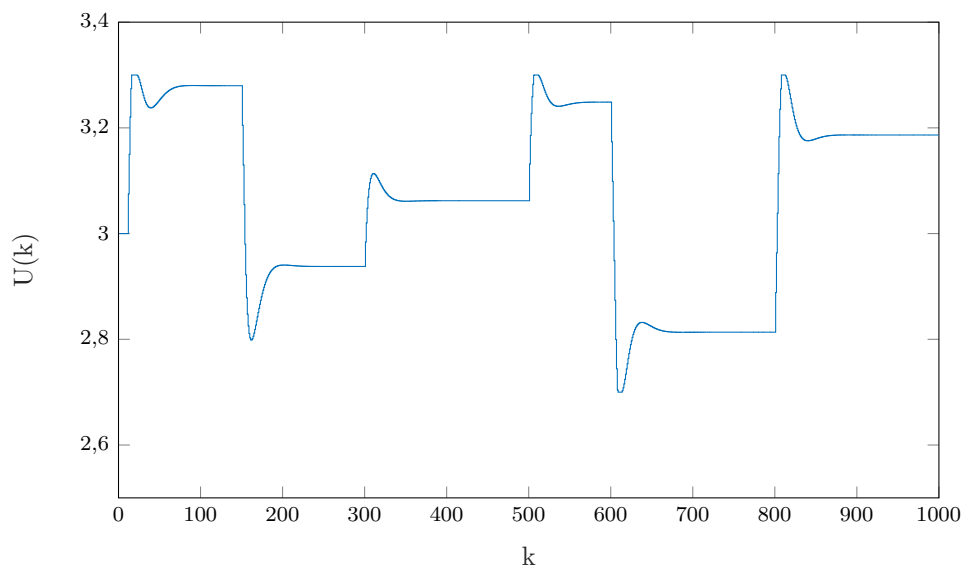
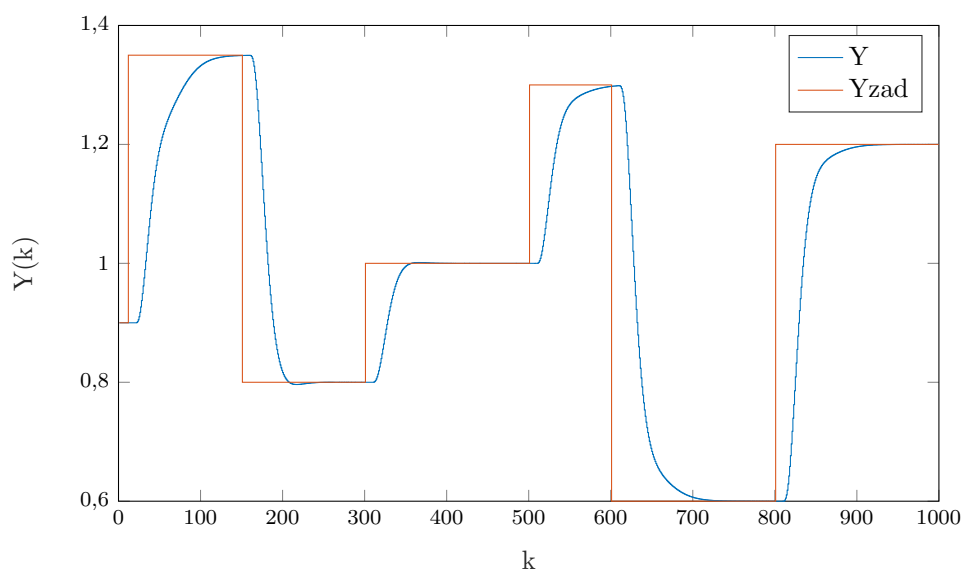
Dla horyzontu predykcji $N = 200$ horyzont sterowania i lambda będą odpowiednio $N_u = 5$ i $\lambda = 22$:

Rys. 6.11. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 200$, $N_u = 5$, $\lambda = 22$ Rys. 6.12. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $N = 200$, $N_u = 5$, $\lambda = 22$

$$E = 36,7296 \quad (6.10)$$

$$E_{abs} = 88,6051 \quad (6.11)$$

Dla porównania, optymalizacja względem błędu średniokwadratowego daje następujące wyniki: dla $N = 200$ pozostałe parametry przyjmują wartości $N_u = 5$, $\lambda = 15$.

Rys. 6.13. Sterowanie DMC dla parametrów $N = 200$, $N_u = 5$, $\lambda = 15$ Rys. 6.14. Śledzenie wartości zadanej dla parametrów $N = 200$, $N_u = 5$, $\lambda = 15$

$$E = 36,4930 \quad (6.12)$$

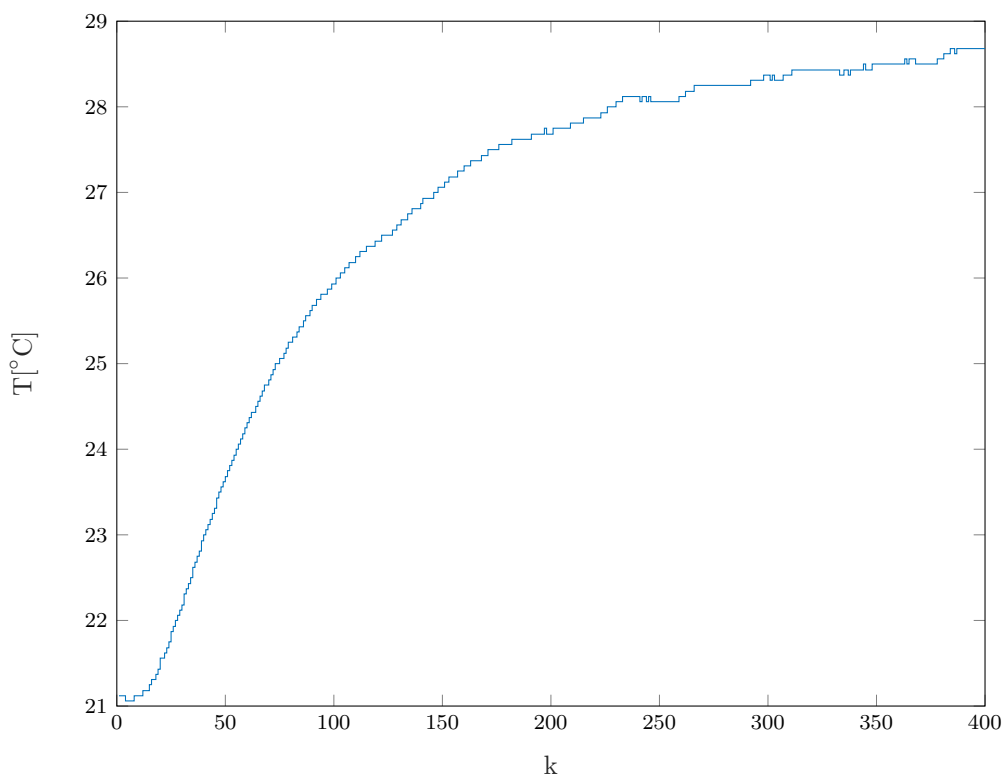
$$E_{abs} = 90,6210 \quad (6.13)$$

Widzimy że regulacja jest troszkę gorsza.

7. Laboratorium

7.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy

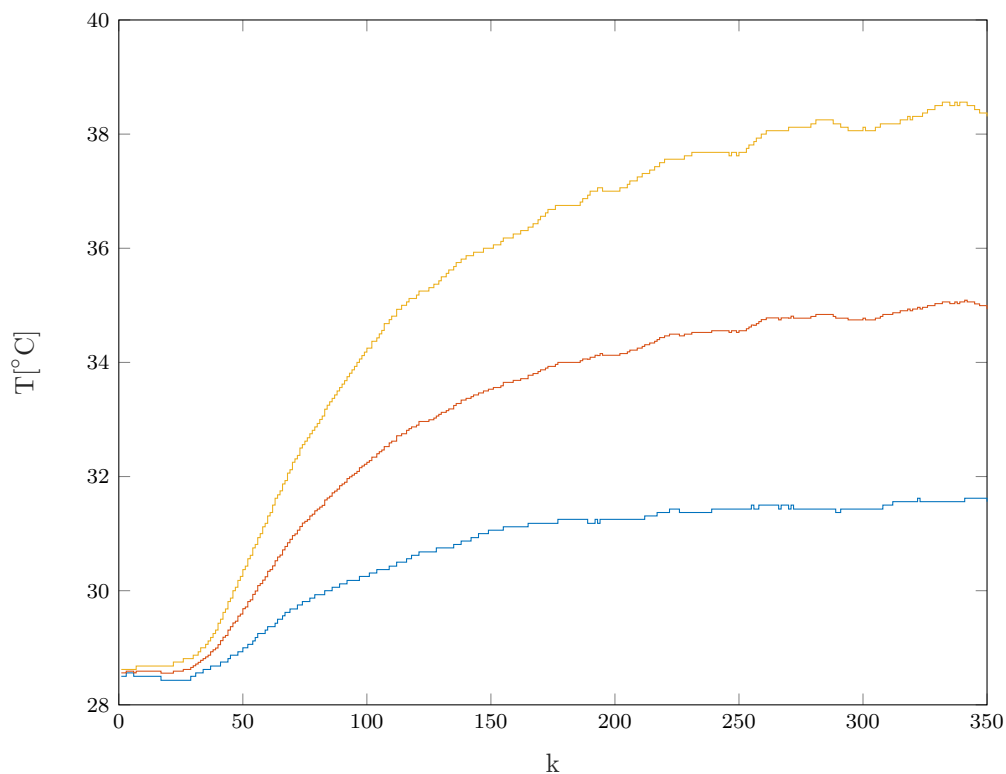
W celu określenia wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy ustawiono moc wentylatora $W1 = 50\%$, a moc grzałki $G1 = 25\%$. Po czasie około 5 minut temperatura odczytywana przez czujnik temperatury zaczęła się stabilizować na poziomie $T1 = 28,4^{\circ}\text{C}$. Niestety z powodu ciągłego ruchu 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. 7.1. Pomiar temperatury w punkcie pracy

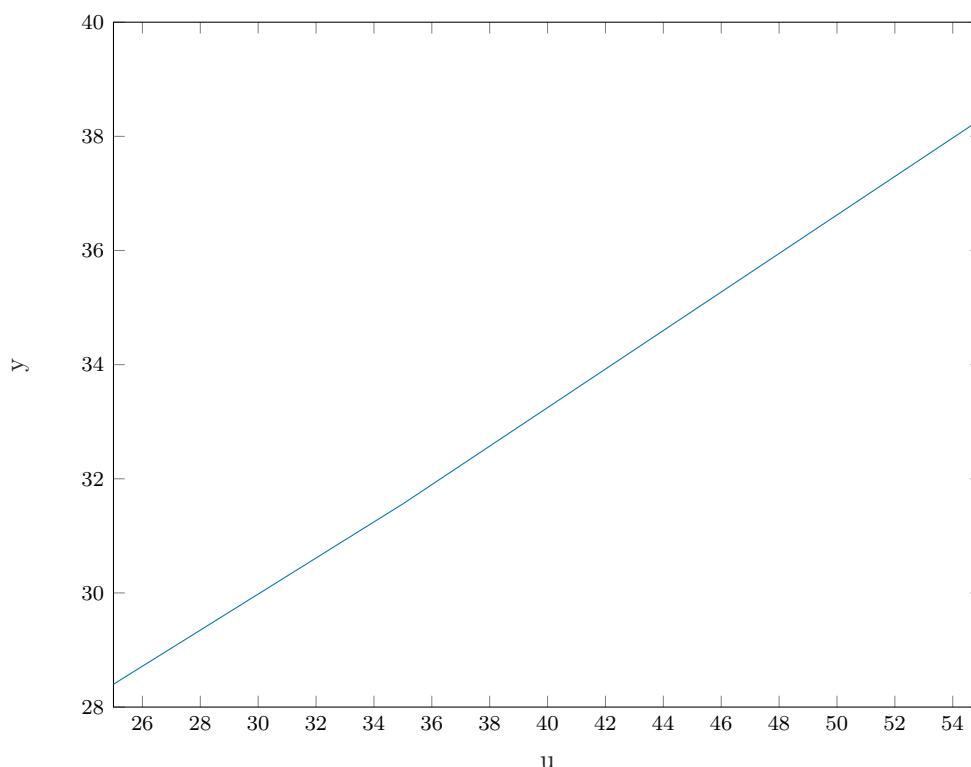
7.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych

Rozpoczynając z punktu pracy wyznaczono odpowiedzi skokowe dla trzech różnych wartości sygnału sterującego $G1 = 35\%$, $G1 = 45\%$ i $G1 = 55\%$.



Rys. 7.2. Odpowiedzi skokowe dla trzech różnych wartości sygnału sterującego

Analizując otrzymane wykresy można wywnioskować, że właściwości statyczne procesu są w przybliżeniu liniowe, zmiany wartości odpowiedzi skokowej dla tych samych chwil są w przybliżeniu proporcjonalne jak również sam kształt wykresów jest w przybliżeniu podobny. W celu sprawdzenia założeń narysowano charakterystykę statyczną procesu.



Rys. 7.3. Charakterystyka statyczna procesu

Która potwierdziła przypuszczenia, na jej podstawie można stwierdzić, że właściwości statyczne procesu są w dobrym przybliżeniu liniowe i w konsekwencji postanowiono wyznaczyć wzmocnienie statyczne procesu.

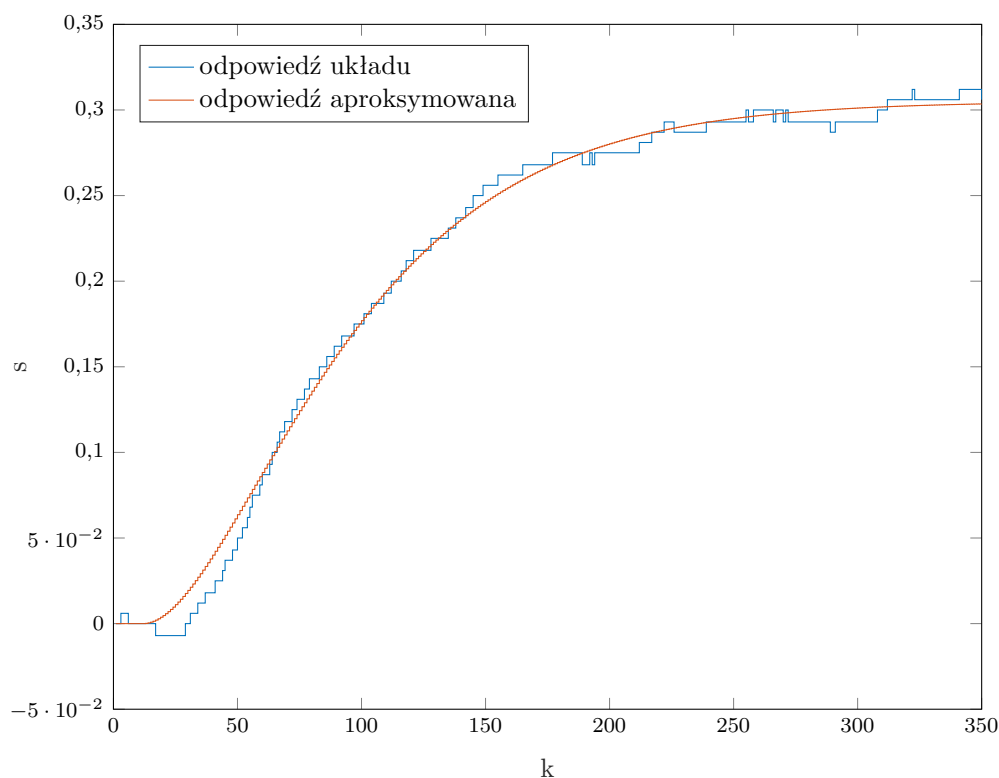
$$K_{stat} = 0.3303 \quad (7.1)$$

7.3. Przekształcenie i aproksymacja odpowiedzi skokowej

W celu przekształcenia odpowiedzi skokowej w taki sposób aby można ją było wykorzystać w algorytmie DMC skorzystano z poniższego wzoru:

$$S_i = \frac{Y(i) - Y_{pp}}{\Delta U}, \text{ dla } i = 1, 2 \dots D \quad (7.2)$$

Dla odpowiedzi skokowej otrzymanej w wyniku zmiany sygnału sterującego z $G1 = 25\%$ na $G1 = 35\%$ a następnie dokonano jej aproksymacji używając członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem.

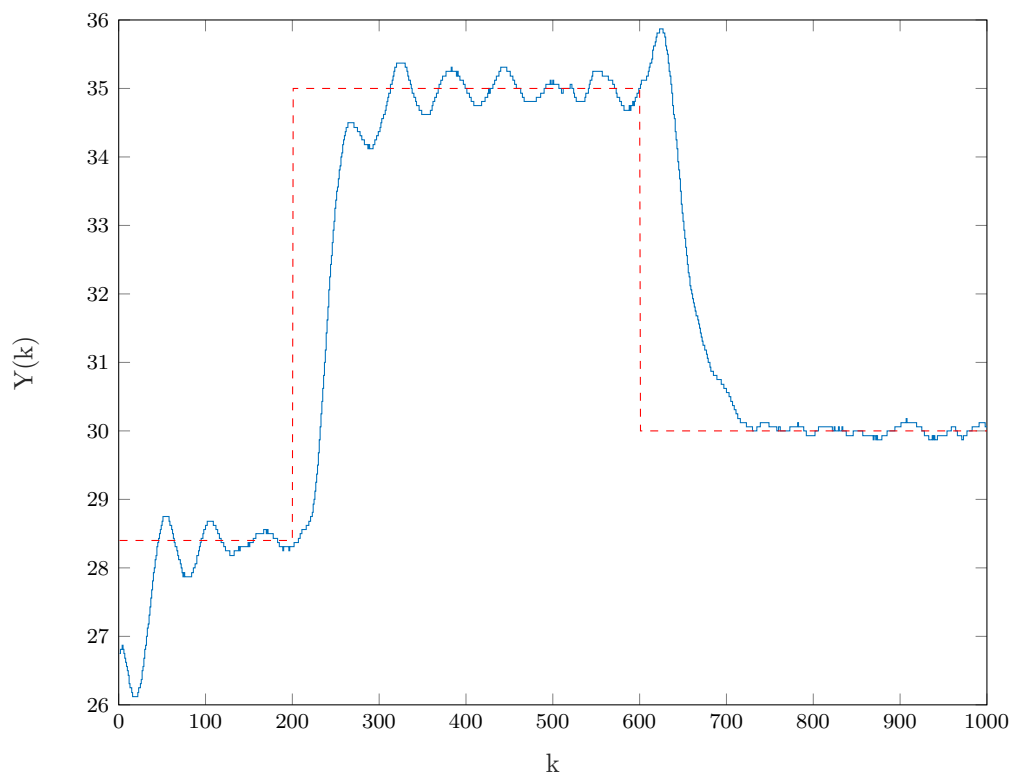


Rys. 7.4. Aproksymacja odpowiedzi skokowej

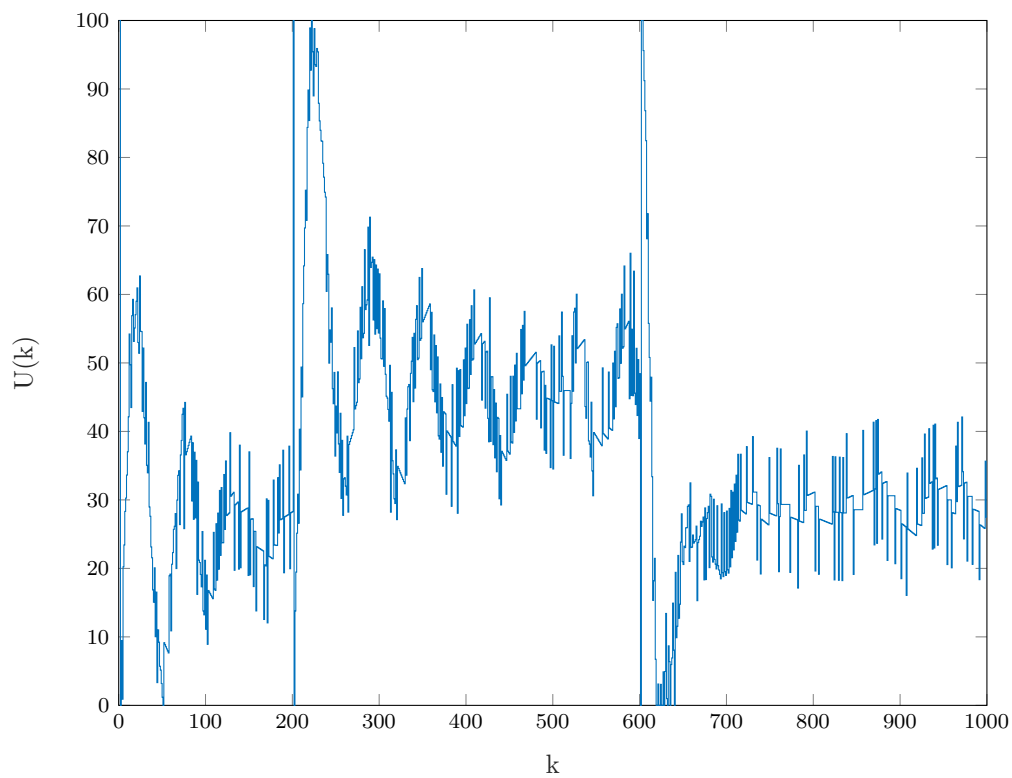
Do wyznaczenia optymalnych parametrów aproksymacji posłużono się algorytmem genetycznym o losowej populacji początkowej tak aby zminimalizować błąd dopasowania.

7.4. Dobranie nastaw regulatora PID i parametrów algorytmu DMC

Dla zmian sygnału zadanego w dwóch skokach z wartości $T1 = 28,4^{\circ}C$ do wartości $T1 = 35^{\circ}C$ i następnie $T1 = 30^{\circ}C$ metodą eksperymentalną starano się dobrać nastawy regulatora PID i parametry algorytmu DMC tak aby zminimalizować błędy dopasowania.



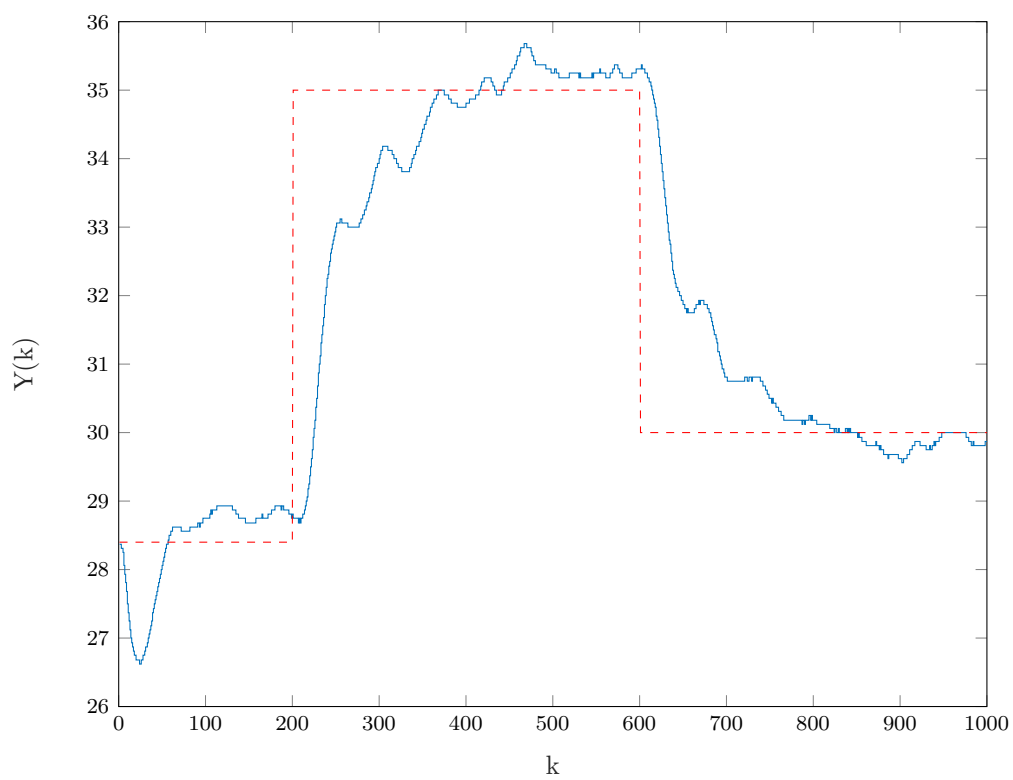
Rys. 7.5. Wyjście procesu z regulatorem PID dla parametrów $K = 30$, $T_i = 35$, $T_d = 4.5$



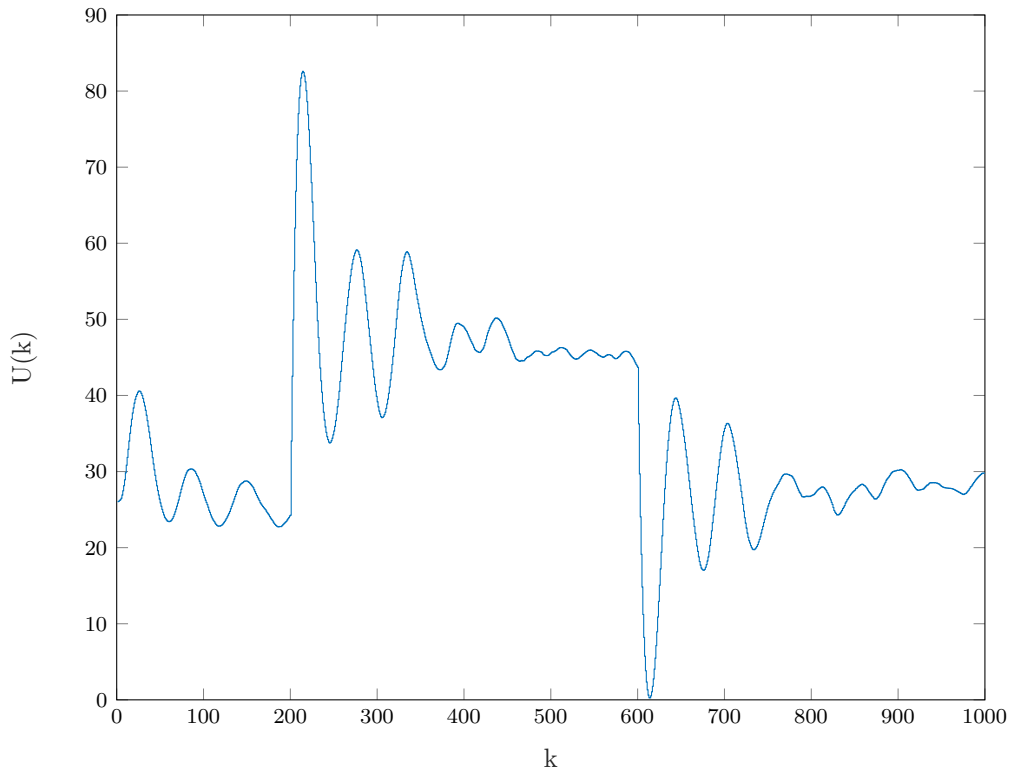
Rys. 7.6. Sterowanie procesu z regulatorem PID dla parametrów $K = 30$, $T_i = 35$, $T_d = 4.5$

Wskaźnik jakości regulacji dla PID:

$$E = 3,043e + 3 \quad (7.3)$$



Rys. 7.7. Wyjście procesu z zastosowanym algorytmem DMC dla parametrów $D = 300$, $N = 90$, $N_u = 10$, $\lambda = 0.4$



Rys. 7.8. Sterowanie procesu z zastosowanym algorytmem DMC dla parametrów $D = 300$, $N = 90$, $N_u = 10$, $\lambda = 0.4$

Wskaźnik jakości regulacji dla DMC:

$$E = 2.4302e + 3 \quad (7.4)$$

Porównując wskaźnik jakości regulacji dla obu pomiarów można stwierdzić że algorytm DMC lepiej poradził sobie z regulacją, jednakże w ocenie jakościowej porównując przebiegi sygnałów wyjściowych regulator PID dokonał lepszej regulacji. Natomiast porównując sygnały wejściowe można stwierdzić że algorytm DMC radzi sobie lepiej z wyznaczaniem sygnału sterującego U ponieważ nie ulega on tak nagłym i dużym zmianom jak w przypadku regulatora PID. W celu poprawy jakości regulacji obu regulatorów należałoby dobrać ich parametry w taki sposób aby wyeliminować oscylację wokół wartości zadanych a wzmocnienia były większe.