

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

Sprawozdanie z laboratorium nr 1

Sobolewski Konrad, Róžański Antoni, Giełdowski Daniel

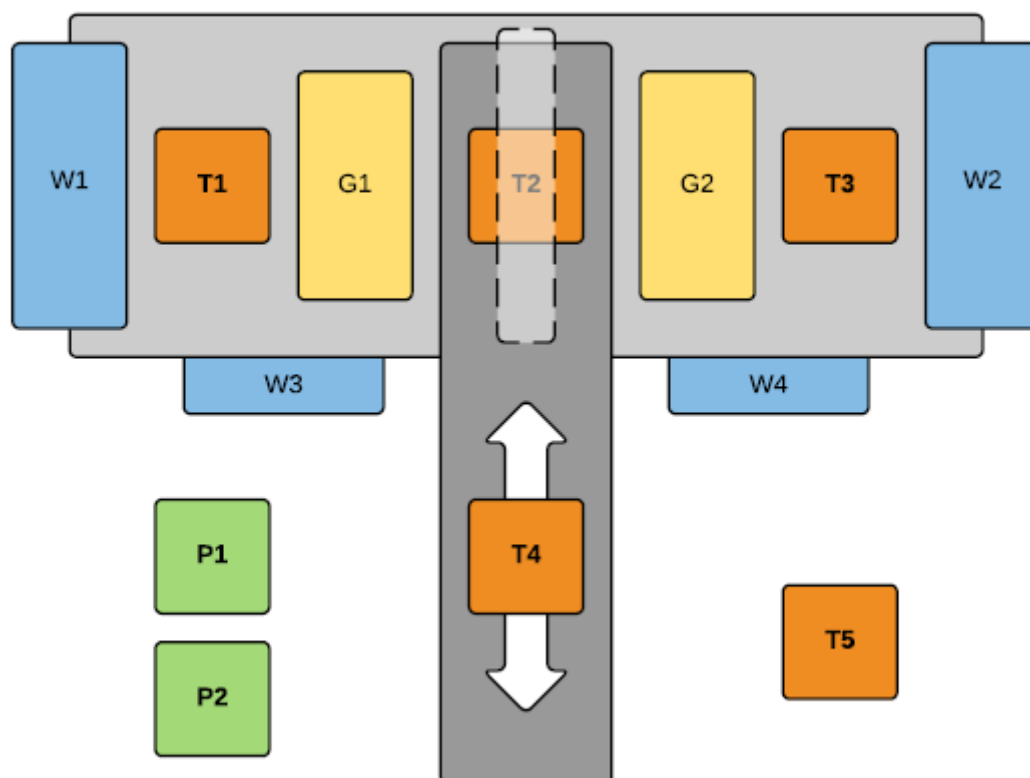
Warszawa, 2017

Spis treści

1. Opis obiektu	2
2. Zadanie 1: Punkt pracy	3
3. Zadanie 2: Odpowiedź skokowa	4
4. Zadanie 3: Znormalizowana odpowiedź skokowa	5
5. Zadanie 4: Algorytmy PID i DMC	7
5.1. PID	7
5.2. DMC	7
6. Zadanie 5: Strojenie regulatorów	8
6.1. PID	8
6.2. DMC	13

1. Opis obiektu

Obiektem używanym na laboratorium było stanowisko grzejąco-chłodzące przedstawione schematycznie na poniższym rysunku 1.1. Stanowisko składa się z 4 wentylatorów (W), 2 grzałek (G), 5 czujników temperatury (T), pomiaru prądu (P1) oraz napięcia (P2). Nie korzystaliśmy jednak ze wszystkiego naraz. Wyłączyliśmy wszystkie wentylatory oprócz W1, który ustawiliśmy na stałe na 50%, co pozwoli na szybszy spadek temperatury obiektu. Sterowaniem naszego obiektu była grzałka G1 (grzałka G2 na stałe wyłączona). Jako wyjście przyjęliśmy czujnik temperatury T1. Nie odczytywaliśmy wartości z pozostałych czujników, nie były one ważne dla naszego eksperymentu. Ze względu na to, że mierzonym medium była temperatura, obiekt był narażony na różnego rodzaju szумы i zakłócenia. Jego położenie także nie sprzyjało dokładnym pomiarom (otwarte drzwi oraz wentylacja w pobliżu). Z tych powodów pomiary z niego otrzymane mogły zawierać (a dokładniej mówiąc na pewno zawierały) odchylenia od wartości właściwej, co zostało uwzględnione w trakcie analizy wyników.



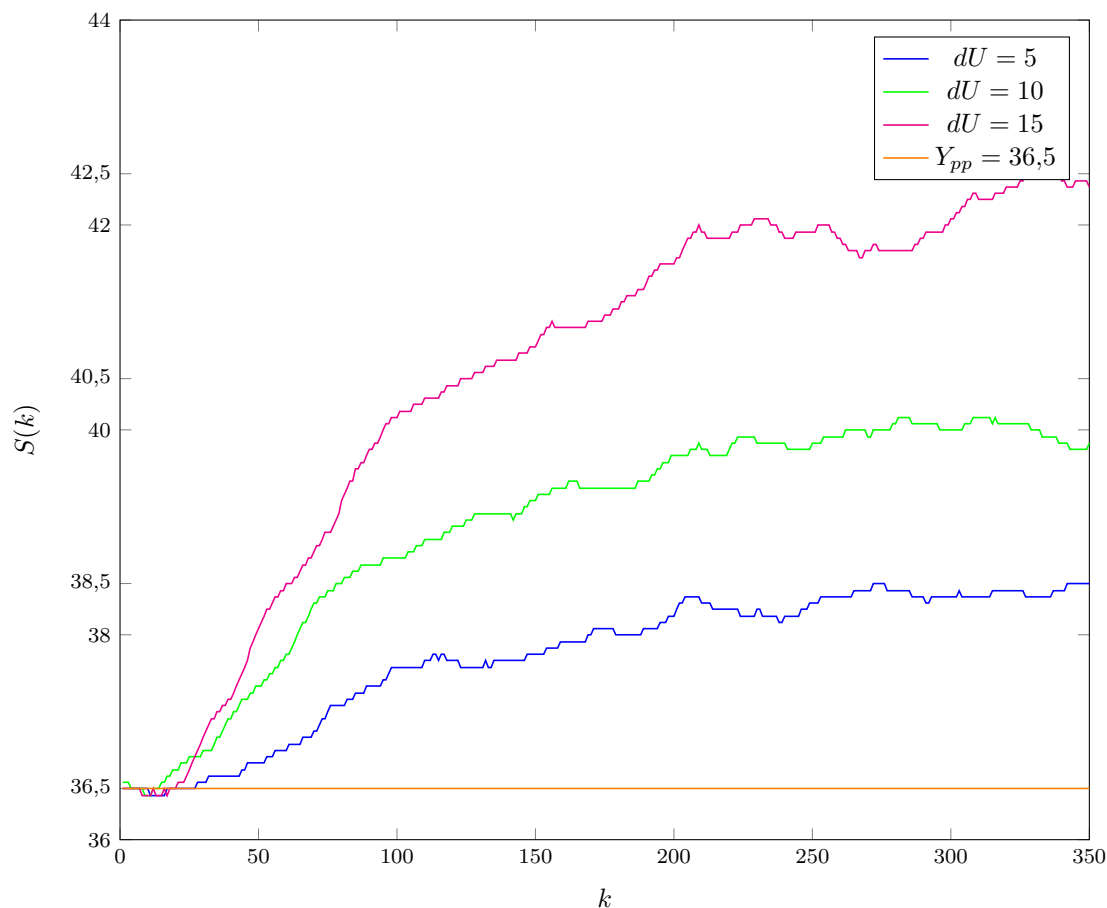
Rys. 1.1. Schemat stanowiska grzejąco-chłodzącego

2. Zadanie 1: Punkt pracy

Pierwszym poleceniem było określenie wartości wyjścia obiektu Y_{pp} (pomiaru $T1$) w punkcie pracy $U_{pp} = 36$. Osiągnęliśmy ją ustawiając wartość sterowania (moc grzania grzałki G1) na U_{pp} i odczekując znaczną ilość czasu (powyżej 5 minut). Wyjście ustabilizowało się w pobliżu wartości 36,5 (czasami występowały niewielkie skoki do 36,43 oraz 36,56, spowodowane prawdopodobnie zakłóceniami z otoczenia). Ostatecznie zdecydowaliśmy się przyjąć $Y_{pp} = 36,5$.

3. Zadanie 2: Odpowiedź skokowa

Kolejnym zadaniem było zmierzenie kilku odpowiedzi skokowych obiektu dla skoków rozpoczynających się z punktu pracy. Wyniki tego eksperymentu, razem z linią pokazującą położenie punktu pracy, znajdują się na rysunku 3.1. Dla przedstawionych odpowiedzi skok sterowania następował w chwili $k=10$, co oznacza, że dopiero od $k=11$ wykresy przedstawiają właściwe odpowiedzi skokowe. Trudności sprawiło nam określenie czy właściwości statyczne posiadanego obiektu są liniowe. Biorąc dosłownie końcowe wartości wyjścia dla różnych odpowiedzi skokowych należałoby stwierdzić, że nie są. Pamiętając jednak, że w okolicy obiektu występowały nieuchronne zakłócenia, można zauważyć pewne prawidłowości. Przy skoku sterowania o 5% temperatura podniosła się o około 2 stopnie, a przy skoku o 15% o około 6 stopni. Jak można zauważyć, wyjście wzrosło o 3 razy większą wartość przy 3 razy większym skoku, więc zachowało się liniowo. Gdyby założyć, że przy skoku o 10% nastąpiły większe zakłócenia niż przy innych i zamiast w 40 wyjście osiągnęłoby wartość około 40,5, to można by stwierdzić, że charakterystyka statyczna obiektu jest w przybliżeniu liniowa, a jej wzmocnienie statyczne wynosi około $2/5 = 0,4$.



Rys. 3.1. Wykres $S(k)$ dla różnych skoków sterowania z $U_{pp}=36$ o dU

4. Zadanie 3: Znormalizowana odpowiedź skokowa

Kolejnym poleceniem było wyznaczyć znormalizowaną odpowiedź skokową (taką jaką wymagana jest do algorytmu DMC) i zaproksymować ją, używając w tym celu członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem. Człon posiada 4 parametry: T_1 , T_2 , K (dalej oznaczane jako K_p) i T_d (w dalszej części sprawozdania oznaczane jako TD). Nazwy zostały zmienione, by nie mylić ich z parametrami algorytmu PID. Człon jest opisany wzorami powstałymi po przekształceniu jego transmitancji:

$$\alpha_1 = e^{-\frac{1}{T_1}} \quad (4.1)$$

$$\alpha_2 = e^{-\frac{1}{T_2}} \quad (4.2)$$

$$a_1 = -\alpha_1 - \alpha_2 \quad (4.3)$$

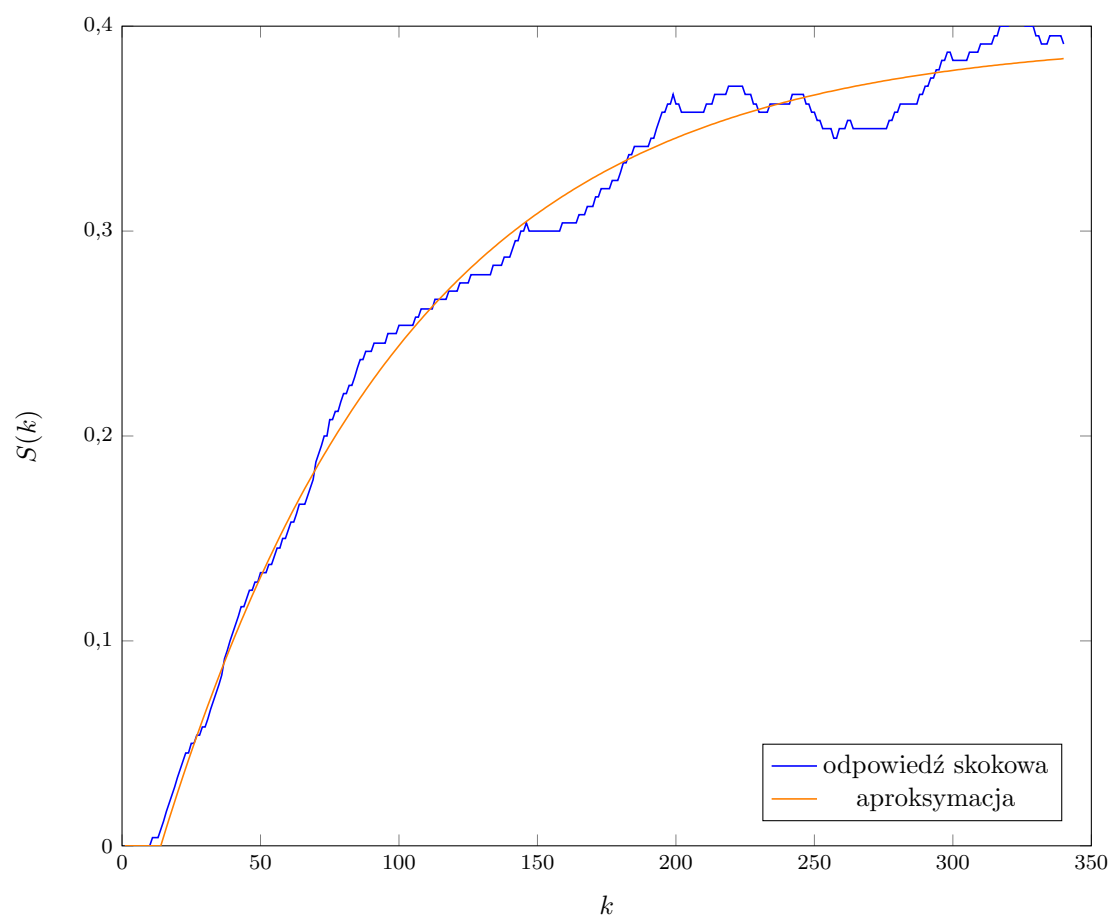
$$a_1 = \alpha_1 \alpha_2 \quad (4.4)$$

$$b_1 = \frac{K_p}{T_1 - T_2} [T_1(1 - \alpha_1) - T_2(1 - \alpha_2)] \quad (4.5)$$

$$b_1 = \frac{K_p}{T_1 - T_2} [\alpha_1 T_2(1 - \alpha_2) - \alpha_2 T_1(1 - \alpha_1)] \quad (4.6)$$

$$y(k) = b_1 u(k - TD - 1) + b_2 u(k - TD - 2) - a_1 y(k - 1) - a_2 y(k - 2) \quad (4.7)$$

W celu doboru parametrów członu wykorzystano funkcję `fmincon`. Jako początkowe wartości dobieranych parametrów wybraliśmy $[11, 10, 1, 10]$, 11 i 10 dla T_1 i T_2 żeby nie były takie same, 1 dla K_p , bo przy dotychczas zebranych przebiegach nie spodziewaliśmy się dużego wzmocnienia dla tego obiektu i 10 dla TD , bo przez tyle czasu przy skoku o 15 wartości odpowiedzi skokowej nie wzrastają powyżej 0. Od dołu ograniczyliśmy wszystkie parametry zerami. Od góry ograniczyliśmy je wartościami $[1000, 1000, 10, 30]$, tak by każdy parametr miał przedział dostosowany do swoich potrzeb (duże zmiany dla T_1 i T_2 , małe zmiany dla K_p , TD sądząc po wykresach nie powinno przekroczyć 30). Jako odpowiedź do znormalizowania wybraliśmy tą dla skoku o 15. W wyniku normalizacji przekształciliśmy ją do odpowiedzi jaką mielibyśmy po skoku jednostkowym. Następnie po wykonaniu aproksymacji otrzymaliśmy parametry członu równe $T_1=89,0864$, $T_2=0,00031814$, $K_p=0,39431$ i $Td=14$ przy błędzie optymalizacji $e=0,040621$. Znormalizowaną odpowiedź i jej aproksymację przedstawiliśmy wykresie 4.1.



Rys. 4.1. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji

5. Zadanie 4: Algorytmy PID i DMC

5.1. PID

Kod programu zawierający model obiektu stanowiska oraz ograniczenia

$$0 \leq U \leq 100$$

został zawarty w folderze sprawozdania. Do wymodelowania obiektu posłużyliśmy się funkcją *fmincon*, która zwróciła nam parametry obiektu

$$T1 = 91,607279510963700$$

$$T2 = 6,971579071504170$$

$$K_p = 0,997200696364098$$

$$TD = 2$$

oraz aproksymującym równaniem różnicowym

$$Y(k) = b_1 U(k - TD - 1) + b_2 U(k - TD - 2) - a_1 Y(k - 1) - a_2 Y(k - 2)$$

Powyższe parametry wyznaczone dla znormalizowanego skoku jednostkowego udokumentowane w poprzednim punkcie, powodowały gorszy przebieg wyjścia oraz sterowania obiektu, dlatego nowe parametry zostały wyznaczone dla skoku jednostkowego z punktu pracy, aby zachować ich zbliżone do rzeczywistości trajektorie.

5.2. DMC

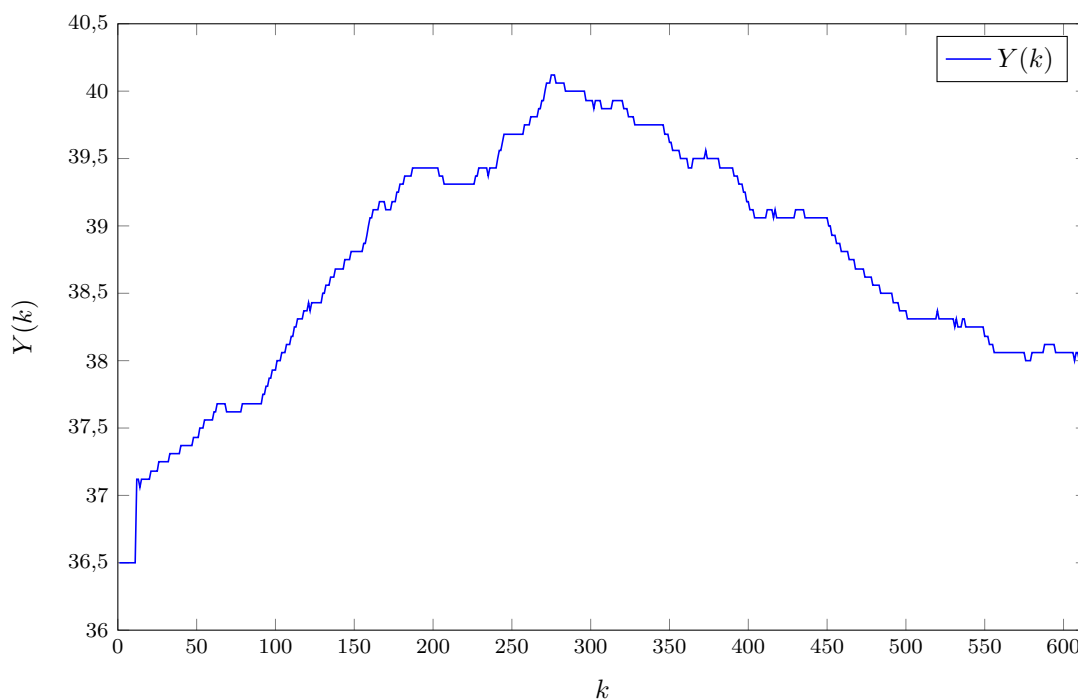
6. Zadanie 5: Strojenie regulatorów

6.1. PID

W tej części projektu laboratoryjnego dobieraliśmy parametry regulatora PID metodą eksperymentalną. Poniżej został zamieszczony wykres wyjścia obiektu dla dwóch skoków wartości zadanej z 36,5 do 40 oraz z 40 do 38.

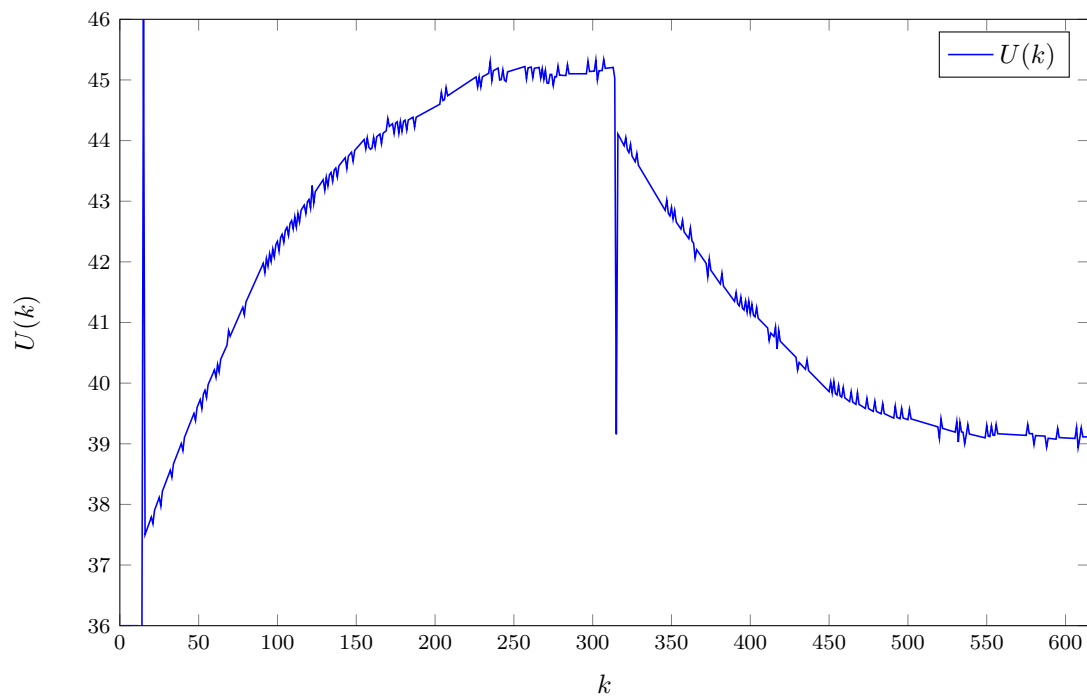
Pierwsze wykresy 6.1 , 6.2 oraz 6.3 zostały wykonane w trakcie trwania laboratorium. Dla 6.1 , 6.2 widzimy, że nastawy regulatora były nieodpowiednie. Regulator nie był w stanieysterować obiektu co odzwierciedla się powolnym dążeniem do wartości zadanej oraz licznymi zawirowaniami przebiegów sterowania i wyjścia. Wykres 6.3 jest ostatnim pomiarem jaki udało się nam zebrać w trakcie trwania laboratorium. Z powodu braku czasu podczas laboratorium jest on w formacie *.eps*. Widzimy , że dla nowych nastaw układ regulacji działał znacznie lepiej, charakteryzował się małym przeregulowaniem oraz większą szybkością zmian. Próbkki około 370 są ostatnimi jakie udało się nam zebrać. Na podstawie poprzednich próbek prognozujemy wyregulowanie obiektu w kolejnych nieudokumentowanych już krokach.

Dalsza część projektu została wykonana na modelu obiektu w środowisku domowym. Pierwszą czynnością jest zasymulowanie stanowiska dla ostatnich nastaw z laboratorium, aby sprawdzić czy z grubsza pokrywają się przebiegi 6.4. Porównując wykres 6.3 wraz ze wspomnianym , zauważamy podobny ząb przy skoku wartości zadanej oraz podobne wartości przeregulowania. Sugerując się tymi aspektami można stwierdzić, że model obiektu jest podobny do obiektu

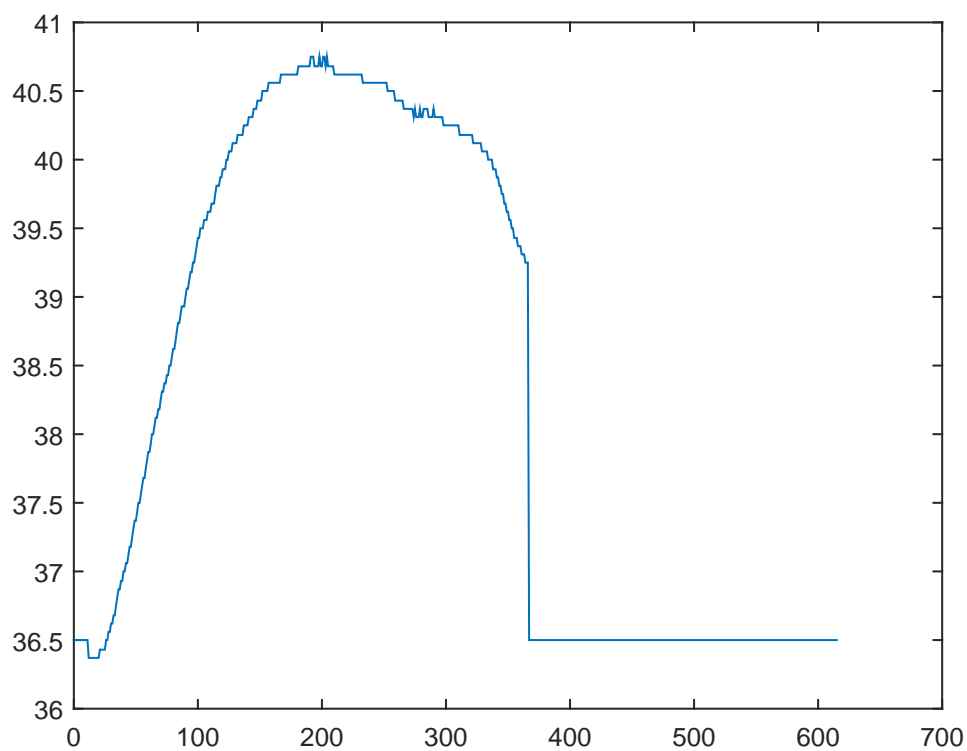


Rys. 6.1. Wyjście obiektu dla $K = 0,5, T_i = 20, T_d = 5$

rzeczywistego, co świadczy o poprawności naszych przekształceń.



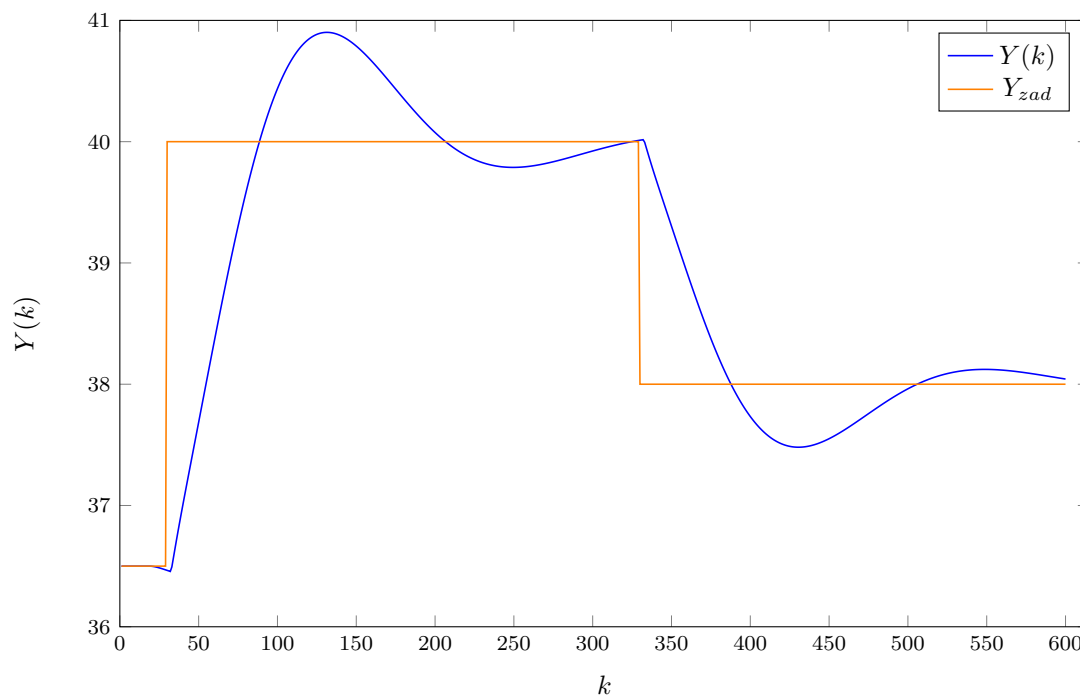
Rys. 6.2. Sterowanie obiektu dla $K = 0,5, T_i = 20, T_d = 5$



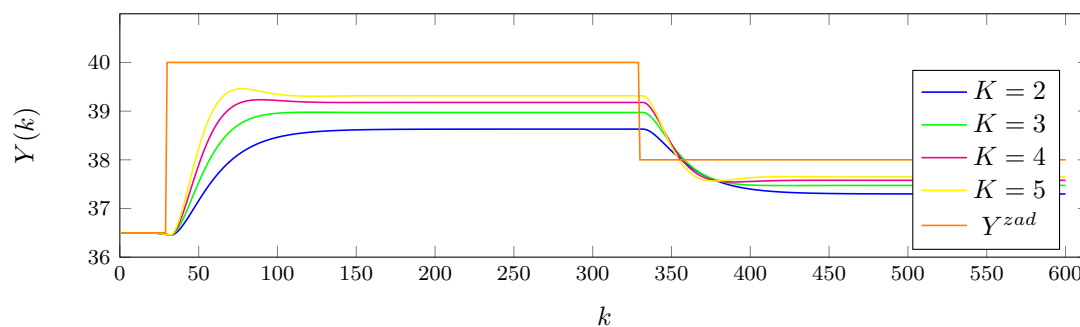
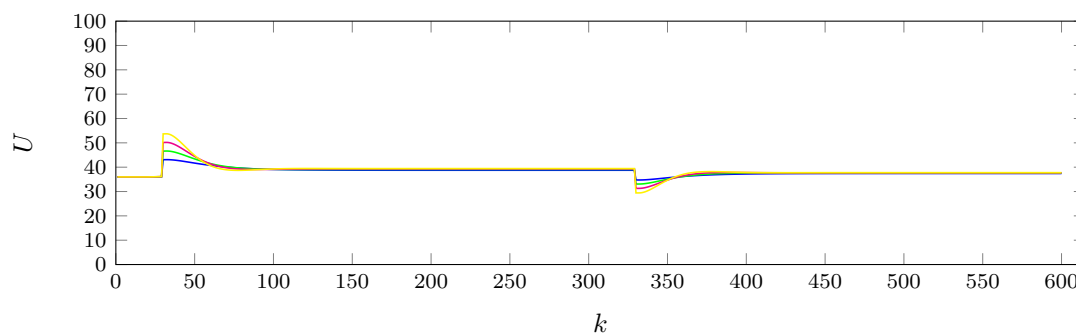
Rys. 6.3. Sterowanie obiektu dla $K = 2, T_i = 25, T_d = 7$

Na następnych wykresach przedstawiliśmy wyniki symulacji dla różnych nastaw regulatora. Korzystamy z metody eksperymentalnej. Dobór lepszych nastaw rozpoczynamy od dobrania parametru K .

Zgodnie z rysunkiem 6.5 można zauważyć, że dla $K > 3$ zaczyna występować przeregulowanie



Rys. 6.4. Sterowanie obiektu dla $K = 2, T_i = 25, T_d = 7$



Rys. 6.5. Dobór parametru K

oraz szybkość regulacji jest coraz mniejsza. W dalszych rozważaniach potraktowaliśmy jako wartość prawidłową $K = 4$, gdyż zmiany są nikłe, a większy człon proporcjonalny pozwoli nam zwiększyć "agresywność" regulatora.

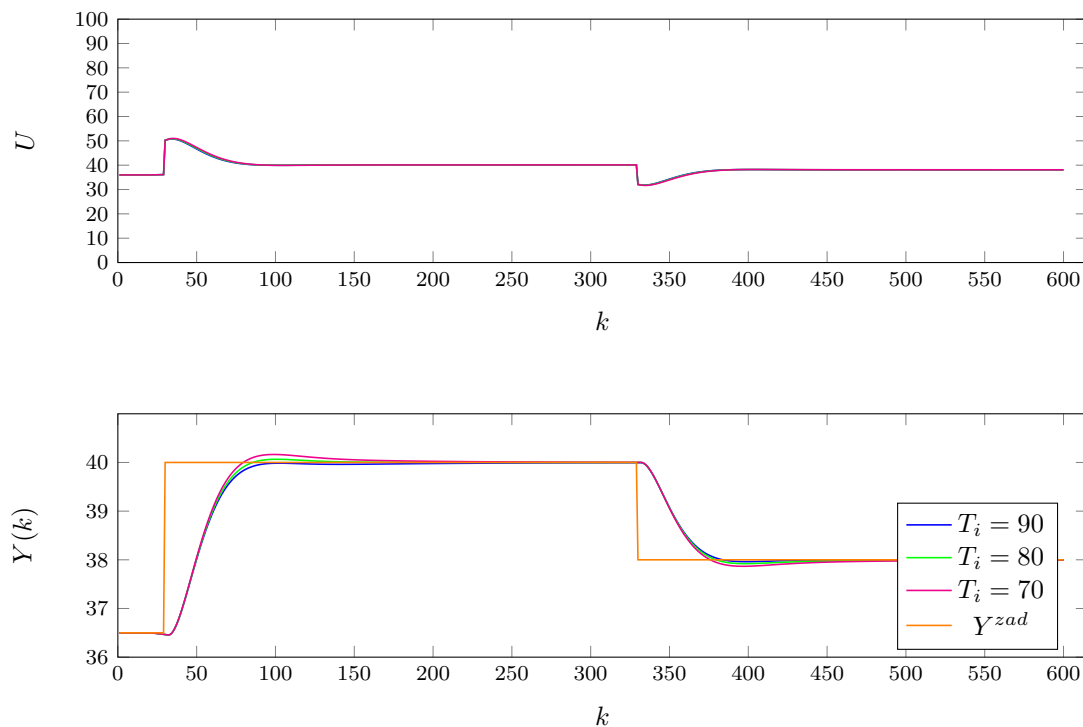
Następnym dobranym parametrem jest T_i 6.6. Na podstawie utworzonych wykresów jednoznacznie można stwierdzić, że najlepszy przebieg jest osiągany dla wartości $T_i = 80$. Dla wartości $T_i = 90$ układ mimo iż znajduje się blisko wartości zadanej osiąga ją bardzo wolno, a dla $T_i = 70$ występuje znaczne przeregulowanie.

Ostatnim dobranym parametrem jest T_d 6.7. Po zmianie z zera na większe wartości okazuje się, że mimo mniejszego przeregulowania obiekt potrzebuje więcej czasu na osiągnięcie dokładnej wartości zadanej, jednakże po przeanalizowaniu wskaźnika regulacji E :

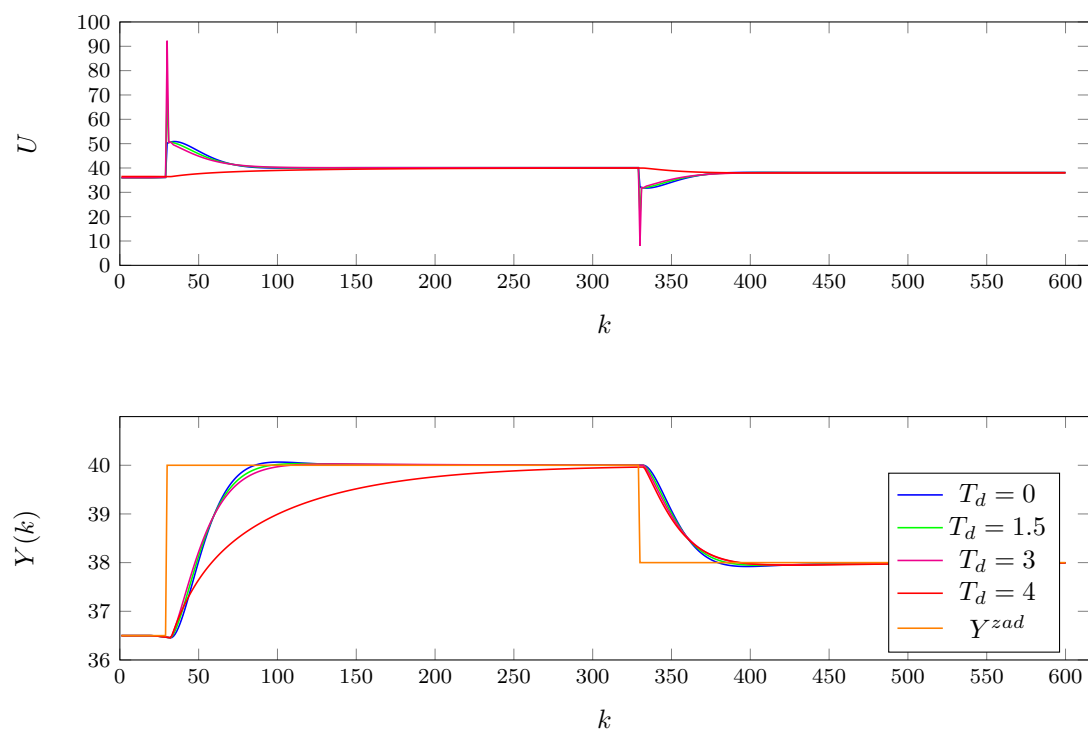
- $T_d = 0$ - $E = 282.5235$
- $T_d = 0$ - $E = 267.5491$
- $T_d = 0$ - $E = 254.5283$
- $T_d = 0$ - $E = 402.4649$

łatwo zauważyć, że $T_d = 3$ jest najlepszą wartością.

Najlepsze przebiegi dla naszego obiektu uzyskaliśmy stosując następujące nastawy $K_p = 4, T_i = 80, T_d = 3$, gdzie wskaźnik jakości $E = 254.5283$.



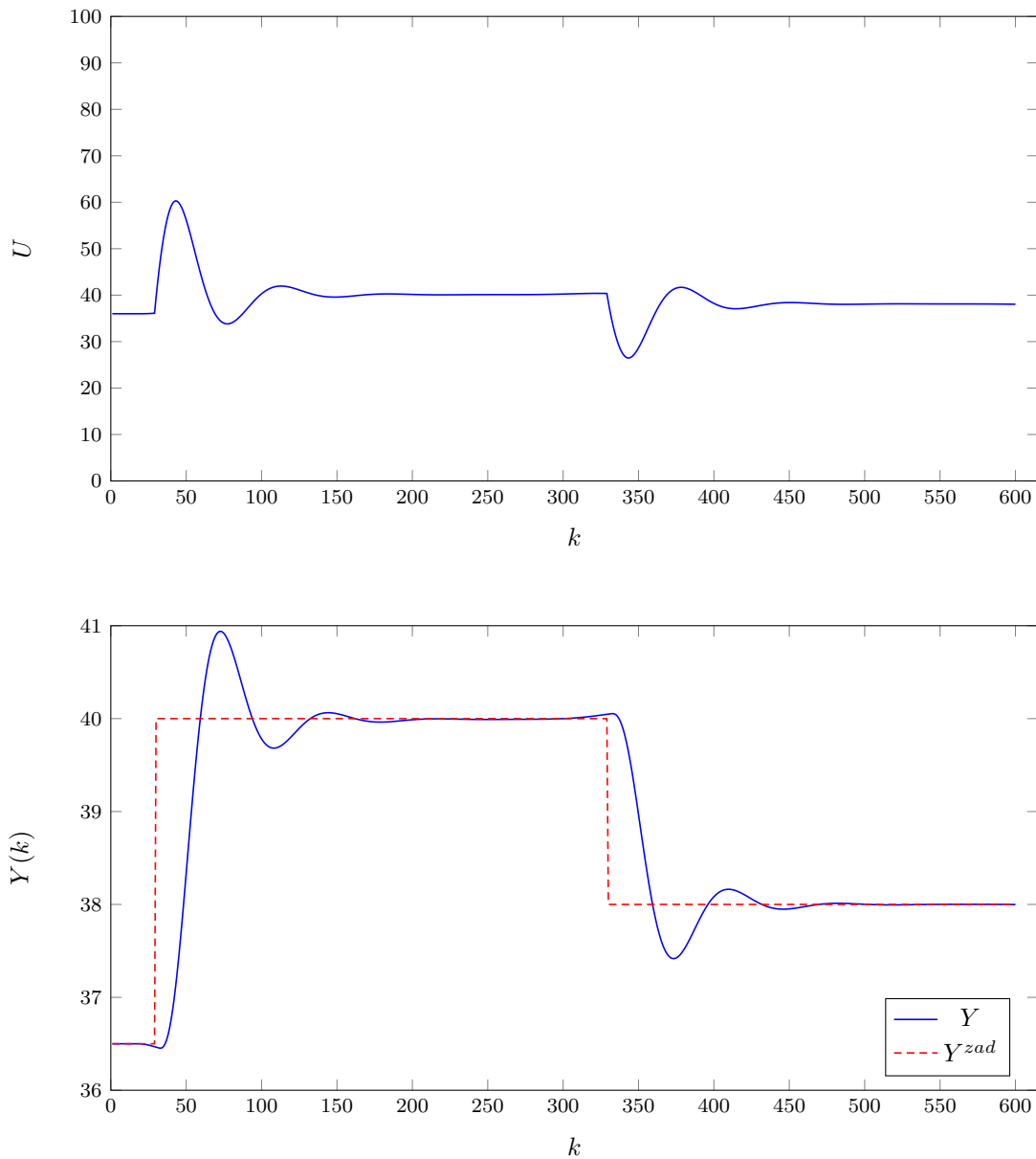
Rys. 6.6. Dobór parametru T_i

Rys. 6.7. Dobór parametru T_d

6.2. DMC

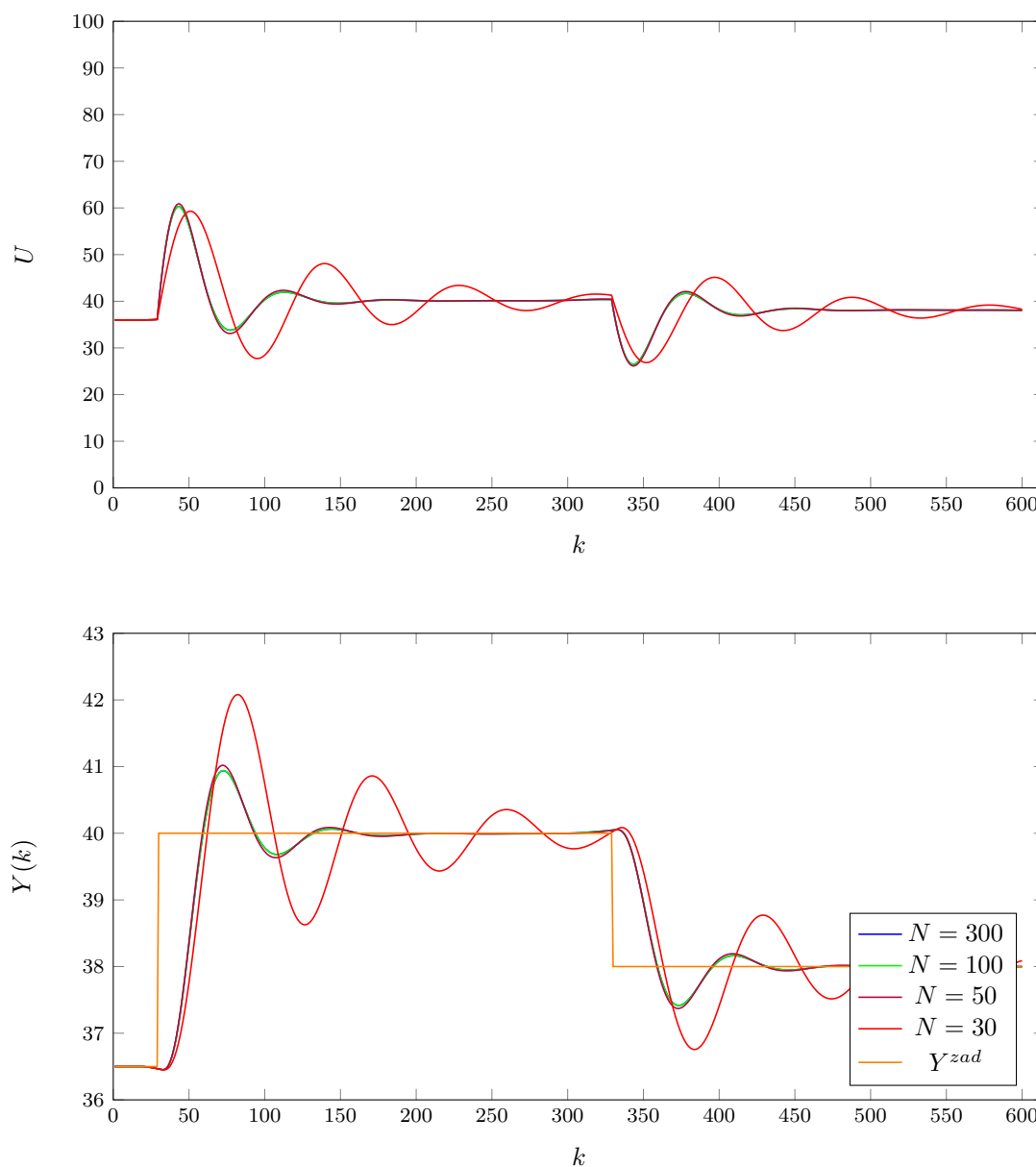
Nastawy regulatora *DMC* zostały dobrane eksperymentalnie, używając nie rzeczywistego obiektu, lecz jego modelu otrzymanego podczas laboratorium (w postaci odpowiedzi skokowej) - rozwiązanie to zostało na nas wymuszone przez brak czasu podczas ćwiczenia. Ponieważ jednak otrzymana funkcja aproksymująca odpowiedź skokową jest bliska jej rzeczywistemu przebiegowi, można przypuszczać, że zamodelowany obiekt nie odbiega w znaczącym stopniu od stanowiska grzewczego. Regulator *DMC* korzysta z odpowiedzi skokowej s uzyskanej w punkcie 3, oraz modelu obiektu identycznym jak ten w powyższym podpunkcie dotyczącym regulatora *PID*.

Obserwując obiekt bezpiecznie założyliśmy, że jego horyzont dynamiki jest równy $D = 300$. Taką również przyjęliśmy wartość początkową N oraz N_u , natomiast pierwotną wartością λ było 1, tj: $N = 300, N_u = 300, \lambda = 1$.



Rys. 6.8. Działanie algorytmu DMC przy początkowych nastawach

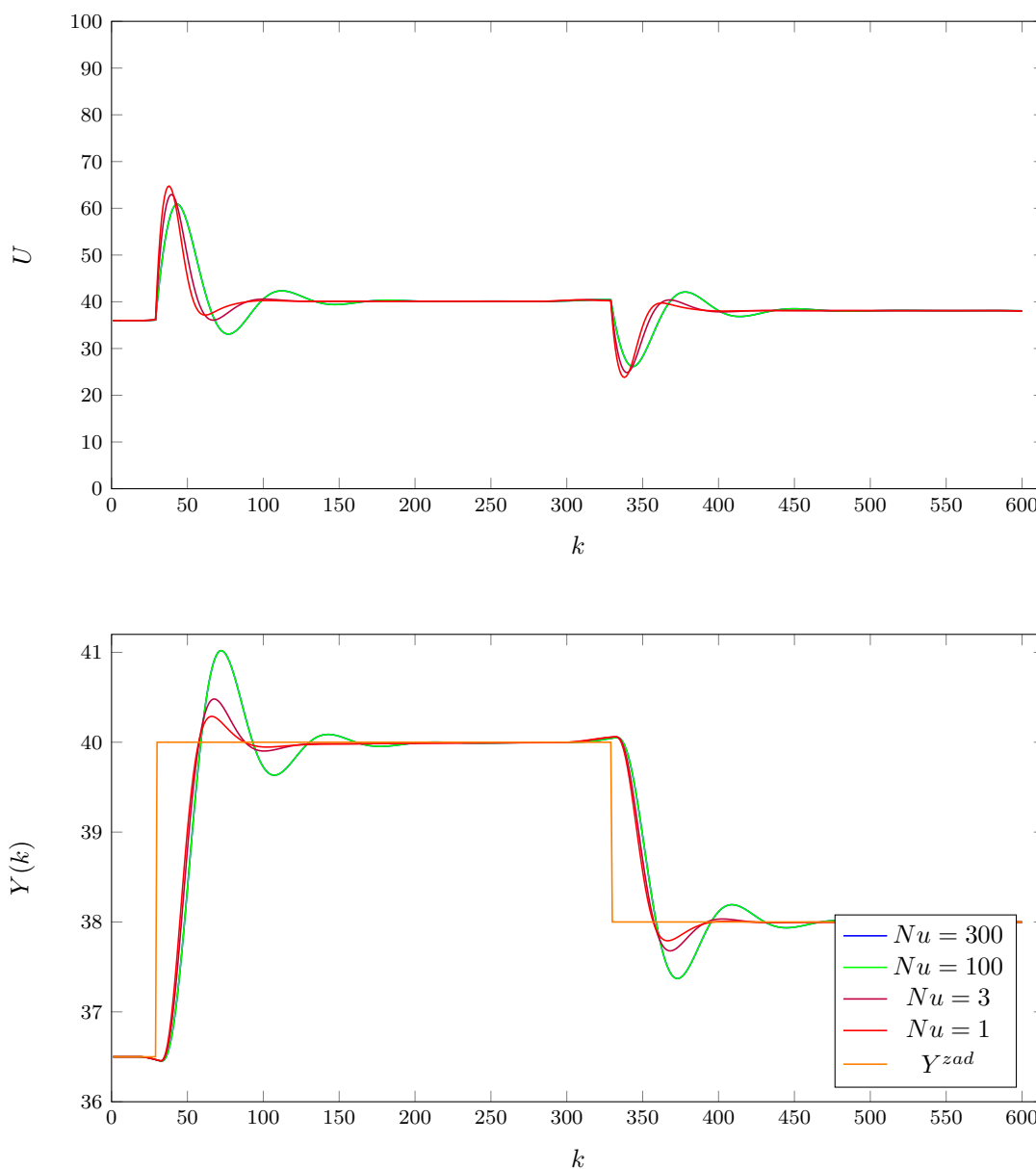
Błąd E wyniósł $= 292.3572$. Następnie próbowaliśmy zmniejszyć parametr N : jednak, jak się okazało, jego wpływ dla wartości powyżej 50 jest znikomy: dla kolejnych wielkości tego parametru, wynoszących 200, 100, 50, tylko dla tej ostatniej odnotowaliśmy nieznaczną zmianę. Natomiast dla $N = 30$, spadek jakości sterowania był już znaczący. Widać to na poniższym rysunku:

Rys. 6.9. Dobór parametru N

Wskaźnik regulacji E dla tych nastaw :

- $N = 300$: $E = 292.3572$
- $N = 100$: $E = 292.5283$
- $N = 50$: $E = 294.9268$
- $N = 30$: $E = 542.1646$

Zdecydowaliśmy więc ustawić N na 50 - błąd jest tylko odrobinę gorszy od wyższych wartości, a złożoność obliczeniowa znacznie mniejsza. Następnym parametrem, na którego minimalizacji nam zależy jest N_u :

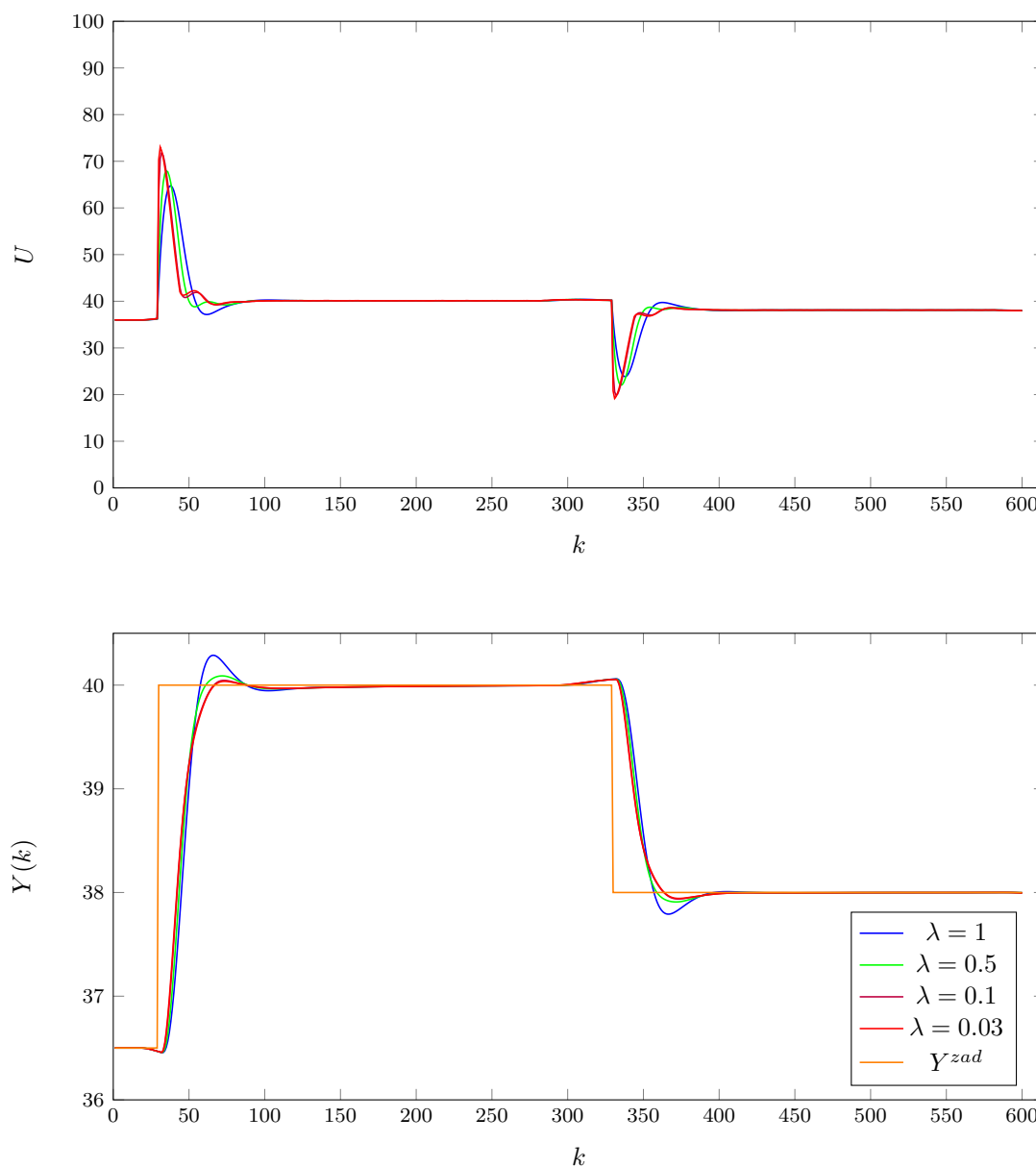


Rys. 6.10. Dobór parametru N_u

Błąd E dla kolejnych wartości horyzontu sterowania:

- $N_u = 300$: $E = 294.9268$
- $N_u = 50$: $E = 294.9268$
- $N_u = 3$: $E = 243.9022$
- $N_u = 1$: $E = 225.8319$

Jak widać, dla $N_u = 1$ wyjście najszybciej zbiega do wartości zadanej, a sterowanie jest tylko odrobinę ostrzejsze. Jak się można było spodziewać, zarówno N jak i N_u miały dużo słabszy wpływ na jakość regulacji niż λ :



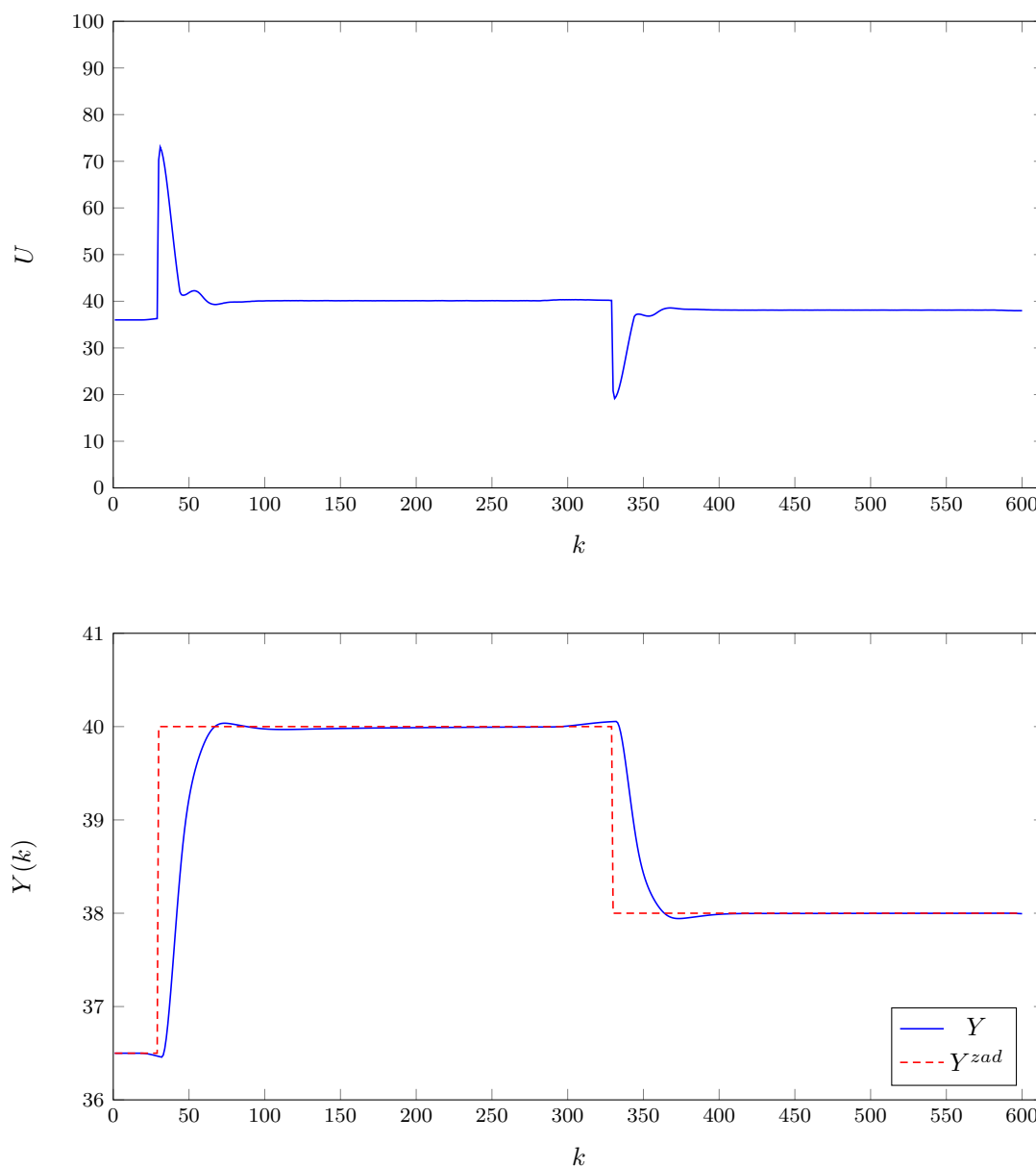
Rys. 6.11. Dobór parametru λ

wskaźnika regulacji E :

- $\lambda = 1$: $E = 225.8319$
- $\lambda = 0.5$: $E = 203.3607$
- $\lambda = 0.1$: $E = 185.6464$
- $\lambda = 0.03$: $E = 182.5979$

Zmniejszając λ , uzyskujemy drastyczną poprawę jakości regulacji, jednakże kosztem sterowania. Chociaż aproksymowany obiekt, stanowisko grzewcze, nie ma podatnych na uszkodzenia elementów wykonawczych, to bardzo ostre skoki sterowania z pewnością nie wpływają korzystnie na żywotność obiektu. Bazując na tym wniosku, jak i na spostrzeżeniu, że poniżej wartości $\lambda = 0.1$ zysk w jakości sterowania jest znikomy, postanowiliśmy zatrzymać tę wielkość λ .

Poniżej prezentowane jest działanie finalnego algorytmu *DMC*:



Rys. 6.12. Finalny regulator DMC