

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

Sprawozdanie z projektu nr 4 oraz laboratorium nr 4

Sobolewski Konrad, Różański Antoni, Giełdowski Daniel

Warszawa, 2017

Spis treści

1. Laboratorium: Zadanie 5: Strojenie regulatora PID i DMC	2
1.1. Regulator PID	2
1.1.1. Początkowe nastawy	2
1.1.2. Korygowanie nastaw	4
1.2. Laboratorium: Regulator DMC	5
1.2.1. Początkowe nastawy	5
1.3. Korekta nastaw	7
1.4. Podsumowanie	9
2. Laboratorium: Zadanie 6: Rozmyty regulator PID	10
2.1. Teoria	10
2.1.1. Regulatory lokalne	10
2.1.2. Funkcja przynależności	10
2.1.3. Prawo regulacji	10
2.2. Dobór regulatorów lokalnych	11
2.2.1. Początkowe nastawy	11
2.2.2. Korekta nastaw	12
3. Laboratorium: Zadanie 7: Rozmyty regulator DMC	15
3.1. Teoria	15
3.1.1. Odpowiedzi skokowe	15
3.2. Dobór początkowych parametrów	15
4. Laboratorium: Zadanie 8: Dobór λ dla rozmytego regulatora DMC	18
4.1. Korekta nastaw	18
4.2. Wnioski	20

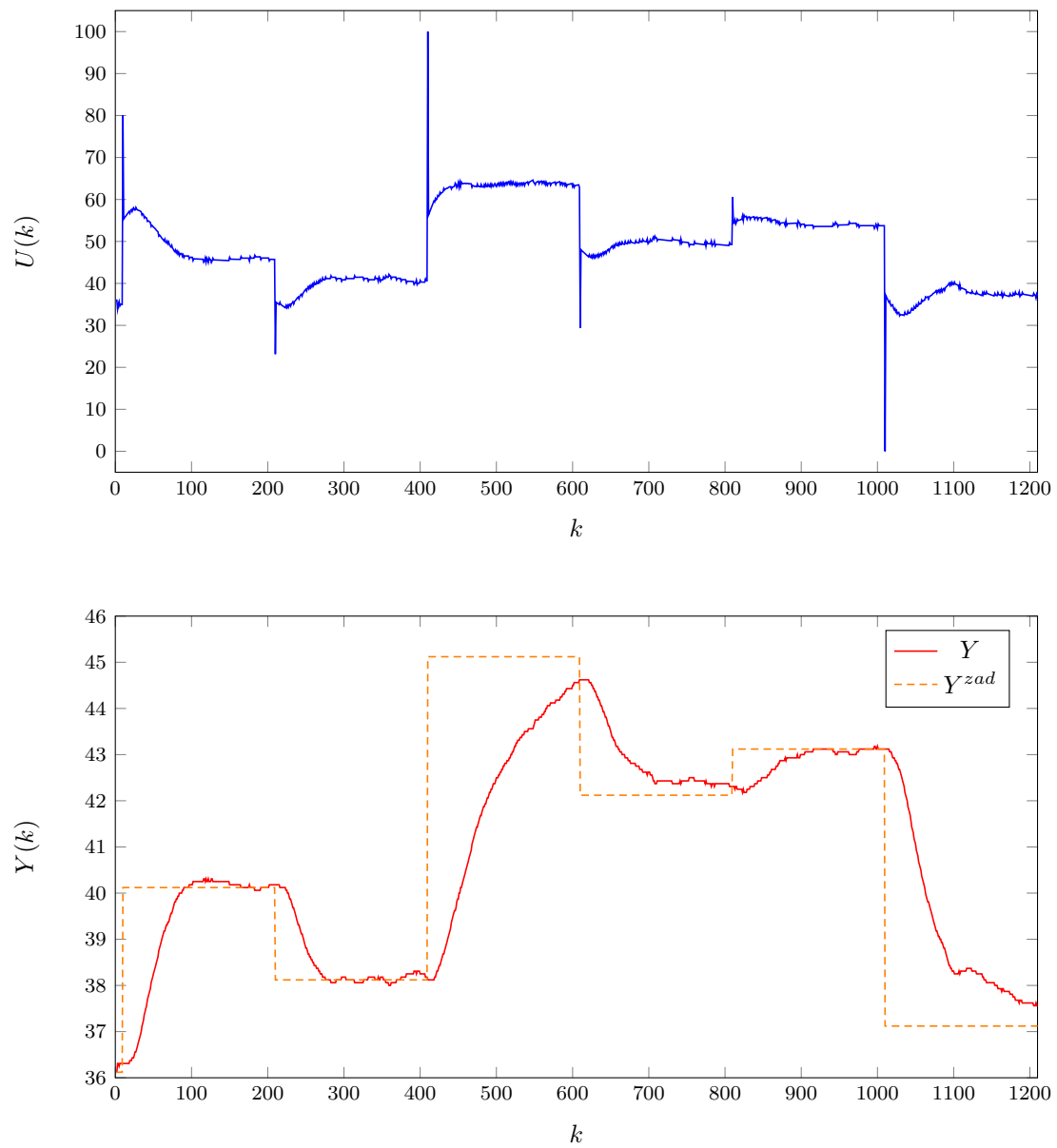
1. Laboratorium: Zadanie 5: Strojenie regulatora PID i DMC

Strojenie regulatora odbyło się na podstawie oceny regulacji dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnałów zadanych składającej się z sześciu skoków. Wartości zadane zostały tak dobrane, aby za każdym razem była inna wartość skoku. Pod uwagę brany był błąd regulacji jak i kształt sterowania i wyjścia.

1.1. Regulator PID

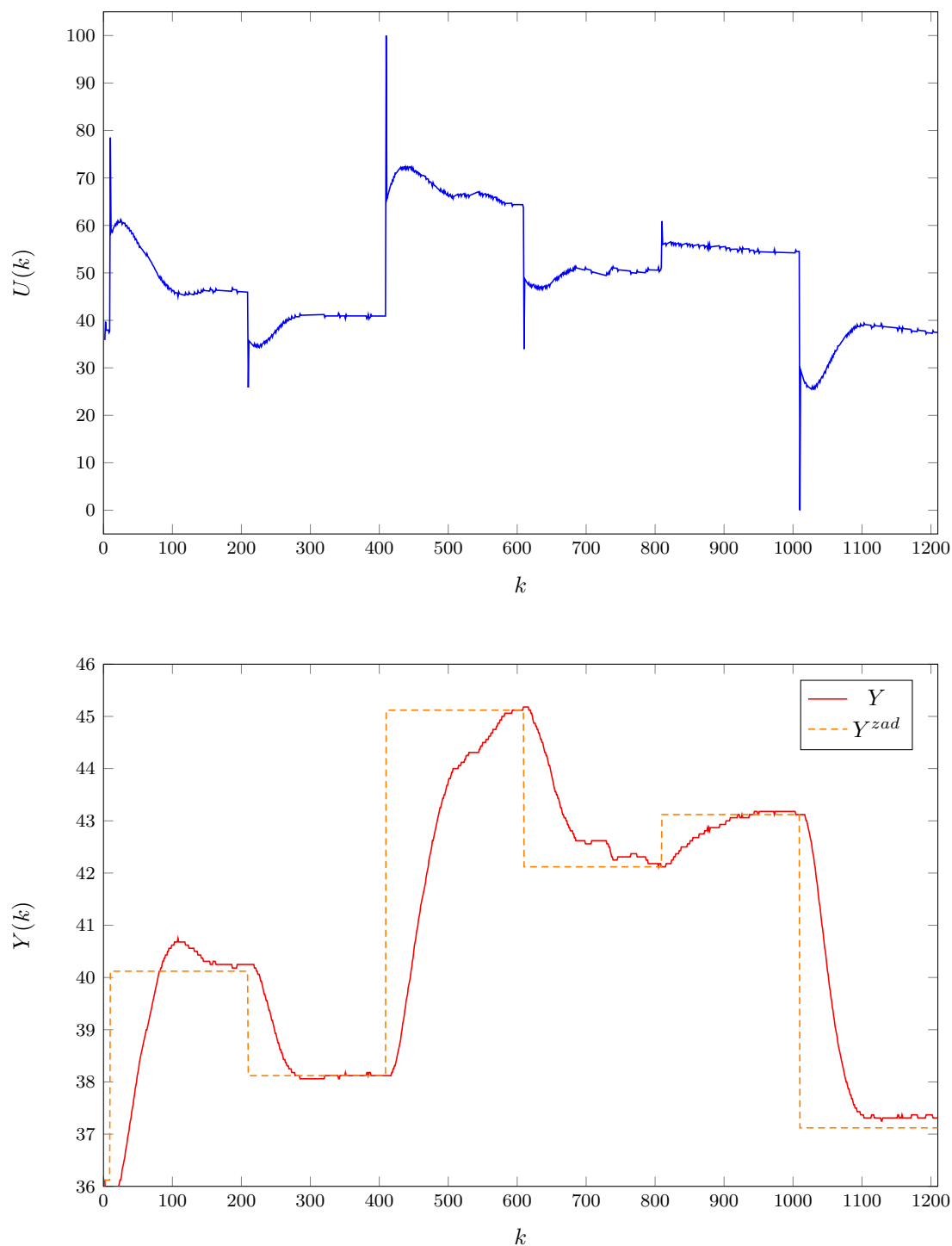
1.1.1. Początkowe nastawy

Nastawy regulatora PID zostały dobrane eksperymentalnie. Sugerując się nastawami otrzymanymi na poprzednich laboratoriach, jako wartości początkowe przyjęliśmy nastawy: $K_p = 5$, $T_i = 75$, $T_d = 1,25$. Na rys. 1.1 można obserwować pracę regulatora z takimi nastawami. Jak widać, nie są to nastawy optymalne; regulator jest nieskuteczny. Dla dolnego przedziału działa lepiej, w górnym jest zdecydowanie zbyt słaby. Błąd wyjścia Y wyniósł: $E = 5042,6750$.

Rys. 1.1. Działanie algorytmu PID przy początkowych nastawach $K_p = 5, T_i = 75, T_d = 1.25$

1.1.2. Korygowanie nastaw

Aby poprawić osiągi regulatora w przedziale wyższych wartości temperatury, a także poprawić zbyt wolną regulację temperatury widoczną w pobliżu $k = 1100$, postanowiliśmy zwiększyć wpływ członu całkującego, obniżając T_i do wartości $T_i = 65$ oraz zmniejszyć wpływ członu różniczkującego - nowe $T_d = 1$. Wzmocnienie nie było zmieniane, gdyż obawialiśmy się pogorszenia regulacji w dolnym przedziale temperatur. Tak więc nowe nastawy to: $K_p = 5, T_i = 65, T_d = 1$. Dla takich nastaw osiągnęliśmy przebiegi jak na 1.2.



Rys. 1.2. Działanie algorytmu PID przy zmodyfikowanych nastawach $K_p = 5, T_i = 65, T_d = 1$

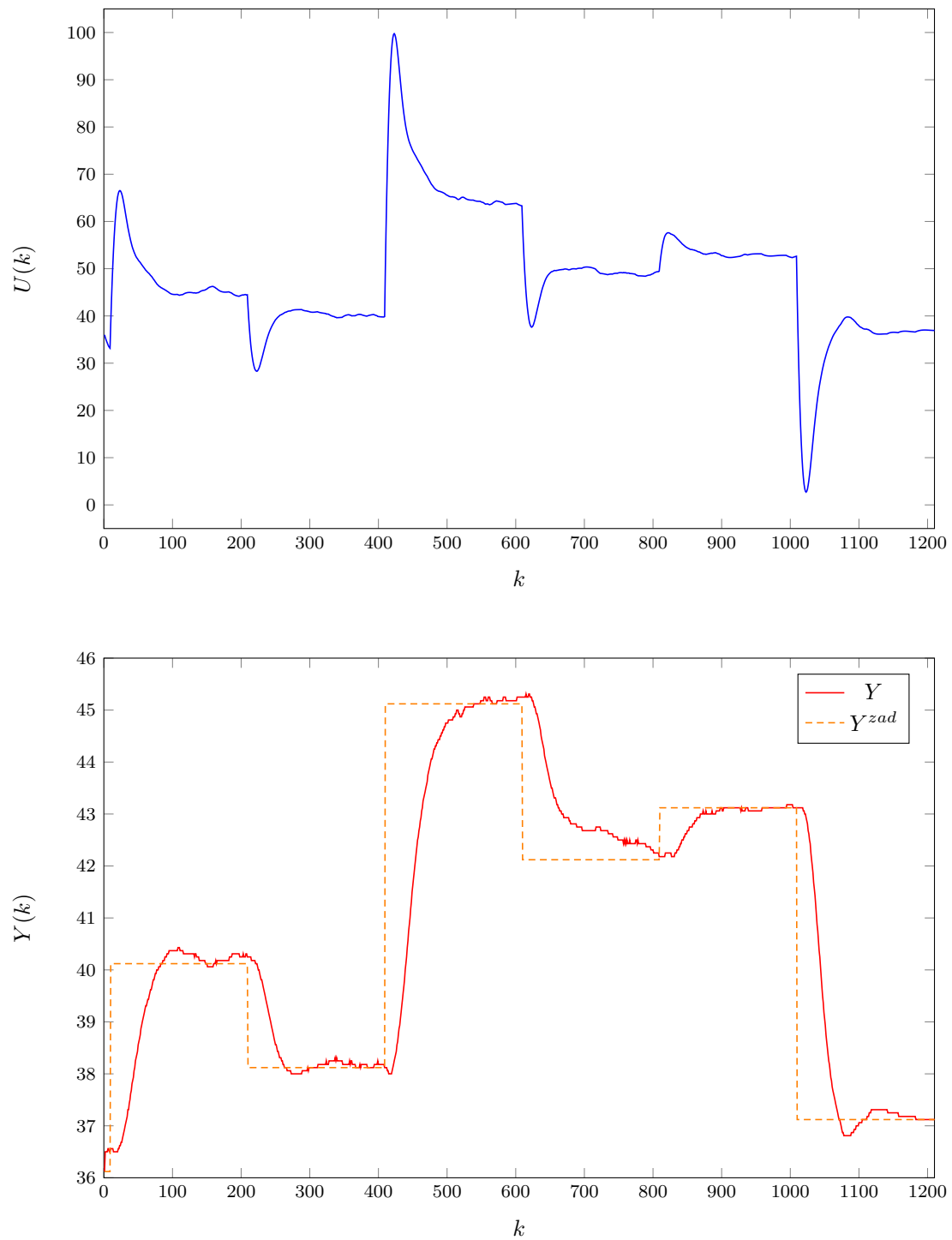
Otrzymany regulator zapewnia lepszą jakość regulacji - błąd wyjścia Y się zmniejszył i wyniósł: $E = 4243,6125$. Chociaż wyższa całka pogorszyła regulację w dolnym zakresie regulacji, to regulator osiąga teraz szybciej wartość zadaną także w wyższym zakresie. Obserwujemy jednak uchyb ustalony przy ostatnim skoku. Trudno stwierdzić, czy przy dłuższym czasie regulacji regulator pozwoliłby osiągnąć wartość zadaną.

1.2. Laboratorium: Regulator DMC

Następnie próbowaliśmy zastosować do nieliniowego obiektu, jakim było stanowisko grzewcze, regulację DMC. Do użycia w modelu wybraliśmy znormalizowaną odpowiedź skokową dla $dU = 15$. Analizując wygląd charakterystyki statycznej należy zakładać, że przy użyciu tej odpowiedzi, standardowy regulator DMC zapewni prawidłową regulację w dolnej połowie zakresu temperatur.

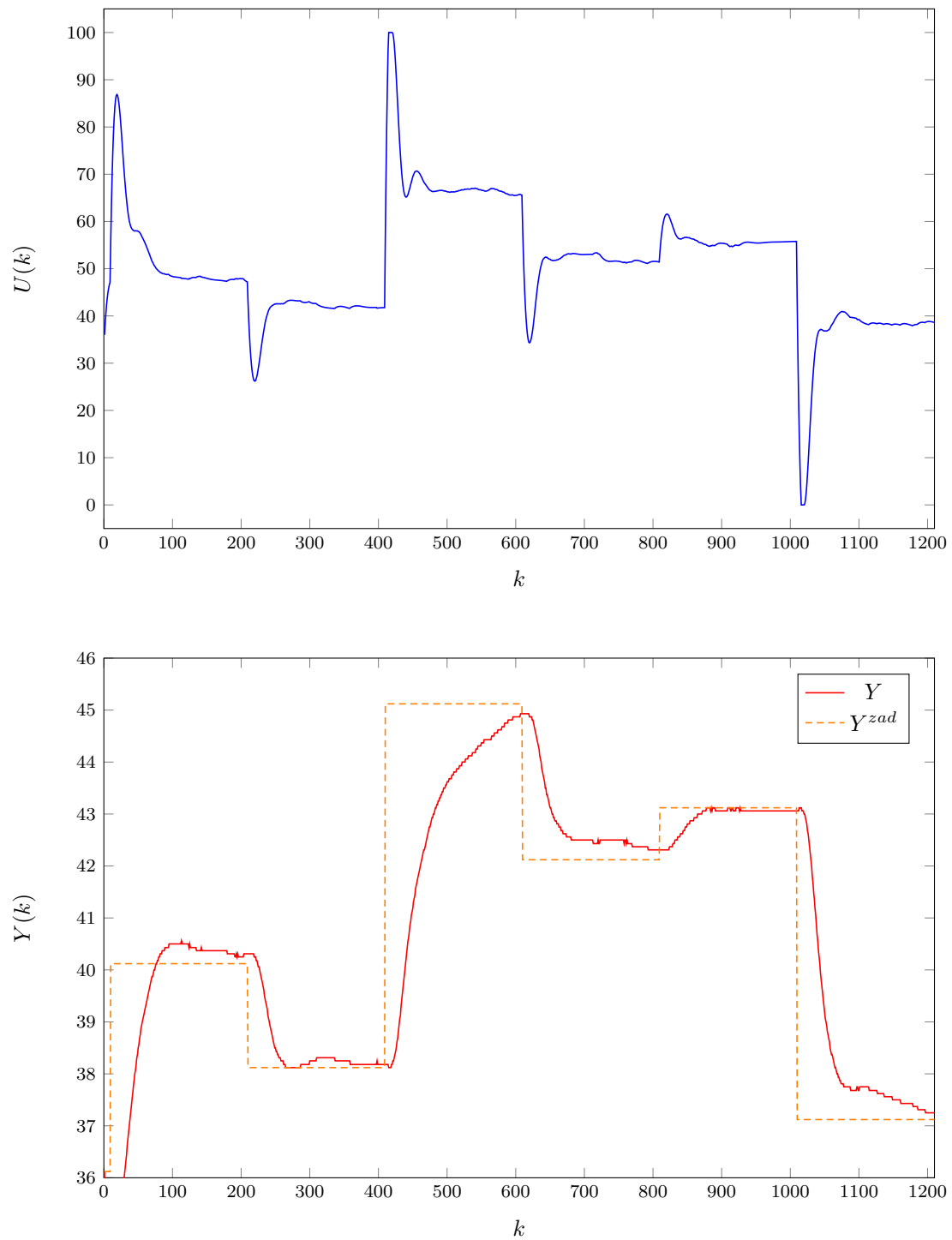
1.2.1. Początkowe nastawy

Nastawy regulatora DMC zostały dobrane eksperymentalnie. Jako wartości początkowe przyjęliśmy nastawy $N = 300$, $Nu = 300$, $\lambda = 0.5$. Wartość 300 wynika z obserwacji obiektu - bezpiecznie założyliśmy, że tyle wynosi jego horyzont dynamiki. Obiekt ten nie jest wrażliwy na nagłe zmiany sterowań a także na poprzednich laboratoriach λ przyjmowała małe wartości - dlatego zdecydowaliśmy na początek przyjąć $\lambda = 0.5$. Na rys. 1.3 można obserwować pracę regulatora z takimi nastawami. Regulator działa poprawnie, z pewnością lepiej niż regulator PID; zarówno przebiegi wyjścia są bliższe wartości zadanej jak i sterowania są łagodniejsze. Nie są to jednak nastawy optymalne; regulator powinien działać szybciej w wyższym zakresie temperatur. Błąd wyjścia, znacząco mniejszy niż dla regulatora PID, wyniósł $E = 3513,38$.

Rys. 1.3. Działanie algorytmu DMC przy początkowych nastawach $N = 300$, $Nu = 300$, $\lambda = 0.5$

1.3. Korekta nastaw

Następnie przystąpiliśmy do zmian nastaw: parametr N pozostawiliśmy bez zmian, jako że zarówno teoria jak i nasza praktyka wskazywały, że jego zmniejszanie, jeśli w ogóle, prowadziło do minimalnych zysków w jakości sterowania. Gdyby był to obiekt szybszy lub działający w wymagającym środowisku, można by rozważyć skrócenie tej wartości w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej, jednak dla okresu próbkowania $T_p = 1$ nie jest to konieczne. Parametr Nu zmniejszyliśmy dwukrotnie, kierując się doświadczeniem nabytym na poprzednich laboratoriach, które wskazywało, że taki zabieg zapewnia nieznaczą poprawę jakości regulacji. Aby regulator szybciej osiągał wartość zadaną, także w wyższych partiach zakresu sterowalnych temperatur, postanowiliśmy zmniejszyć parametr λ p 0.3, do wartości $\lambda = 0.5$, aby zapewnić bardziej gwałtowne sterowanie. Efekt takiego zabiegu widać na wykresie 1.4.

Rys. 1.4. Działanie algorytmu DMC przy początkowych nastawach $N = 300$, $Nu = 300$, $\lambda = 0.5$

Błąd wyniósł $E = 3922,9696$, a więc powiększył się w stosunku do poprzedniego przebiegu. Wizualnie oceniając przebieg $Y(k)$, również można zauważyć pogorszenie. Przyczyny takiego stanu rzeczy można doszukiwać się na wykresie sterowania 1.4. Zgodnie z naszymi intencjami, dzięki mniejszemu parametrowi λ , zmiany sterowania w stosunku do analogicznych zmian zebranych podczas poprzedniego eksperymentu DMC ($N = 300$, $Nu = 300$, $\lambda = 0.5$), są gwałtowniejsze. Wartości sterowania osiągają maksimum podczas skoku wartości zadanej do najwyższej wartości (45 stopni). Jednak także w poprzednim eksperymencie dla tego skoku sterowanie osiągnęło maksimum. Szybkość osiągania temperatury 45 stopni nie mogła więc ulec poprawie. Jednakże, z powodu mniejszej lambdy, sterowanie szybciej opadło w stosunku do poprzedniego przebiegu, pogarszając jedynie sterowanie (temperatura, będąc poniżej zadanej, jeszcze wolniej do niej dążyła), stąd gorszy rezultat wskaźnika jakości regulacji. Analogiczna sytuacja ma miejsce podczas ostatniego skoku wartości zadanej.

Lepiej się więc sprawdził regulator DMC z początkowymi nastawami.

1.4. Podsumowanie

Tak jak należało się spodziewać, regulator DMC w stosunku do regulatora PID zapewnia lepszą regulację. Zarówno wskaźnik jakości regulacji (dla DMC: $E = 3513,38$, dla PID: $E = 4243,6125$) jak i wizualna ocena przebiegów wyjść i sterowania jednoznacznie wskazują algorytm DMC jako lepszy liniowy regulator nieliniowego obiektu grzewczego.

2. Laboratorium: Zadanie 6: Rozmyty regulator PID

2.1. Teoria

Rozmyty regulator PID do obliczenia sterowania w każdej iteracji korzysta ze sterowań obliczonych w regulatorach lokalnych oraz wartości funkcji przynależności, które decydują o wpływie poszczególnych regulatorów lokalnych na obliczone sterowanie.

2.1.1. Regulatory lokalne

Ilość regulatorów lokalnych zależy od kształtu charakterystyki statycznej. W przypadku naszego obiektu wyraźnie widać, że są dwa liniowe odcinki. Tak więc będą dwa lokalne regulatory PID. W każdej iteracji rozmytego algorytmu, obliczane są, używając standardowych wzorów na regulator PID, wyjścia każdego z regulatorów lokalnych $u^1(k), u^2(k), \dots, u^n(k)$.

2.1.2. Funkcja przynależności

W celu przeprowadzenia regulacji rozmytej musimy określić funkcje przynależności. Określają one obszary aktywacji poszczególnych regulatorów lokalnych (a zarazem sposób ich wzajemnego oddziaływania). Zdecydowaliśmy się na funkcję sigmoidalną, wyrażoną wzorami w postaci:

— dla dolnego zakresu temperatur:

$$\mu_{y_1}(y(k)) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-d(y(k) - c))} \quad (2.1)$$

— dla górnego zakresu temperatur:

$$\mu_{y_2}(y(k)) = \frac{1}{1 + \exp(-d(y(k) - c))} \quad (2.2)$$

gdzie:

- d to współczynnik określający nachylenie funkcji przynależności;
- c to wartość dla której funkcja przynależności osiąga wartość 0,5.

Dla regulacji algorytmem PID dla obu funkcji przynależności przyjęliśmy $d = 10$. Dodatkowo oba regulatory lokalne osiągają wartość funkcji przynależności 0,5 w tym samym punkcie, będącym punktem przegięcia charakterystyki statycznej - $c = 50$.

2.1.3. Prawo regulacji

Sterowanie w regulacji rozmytej oblicza się natomiast za pomocą średniej ważonej wykorzystującej wartości przynależności i sterowań dla poszczególnych przedziałów:

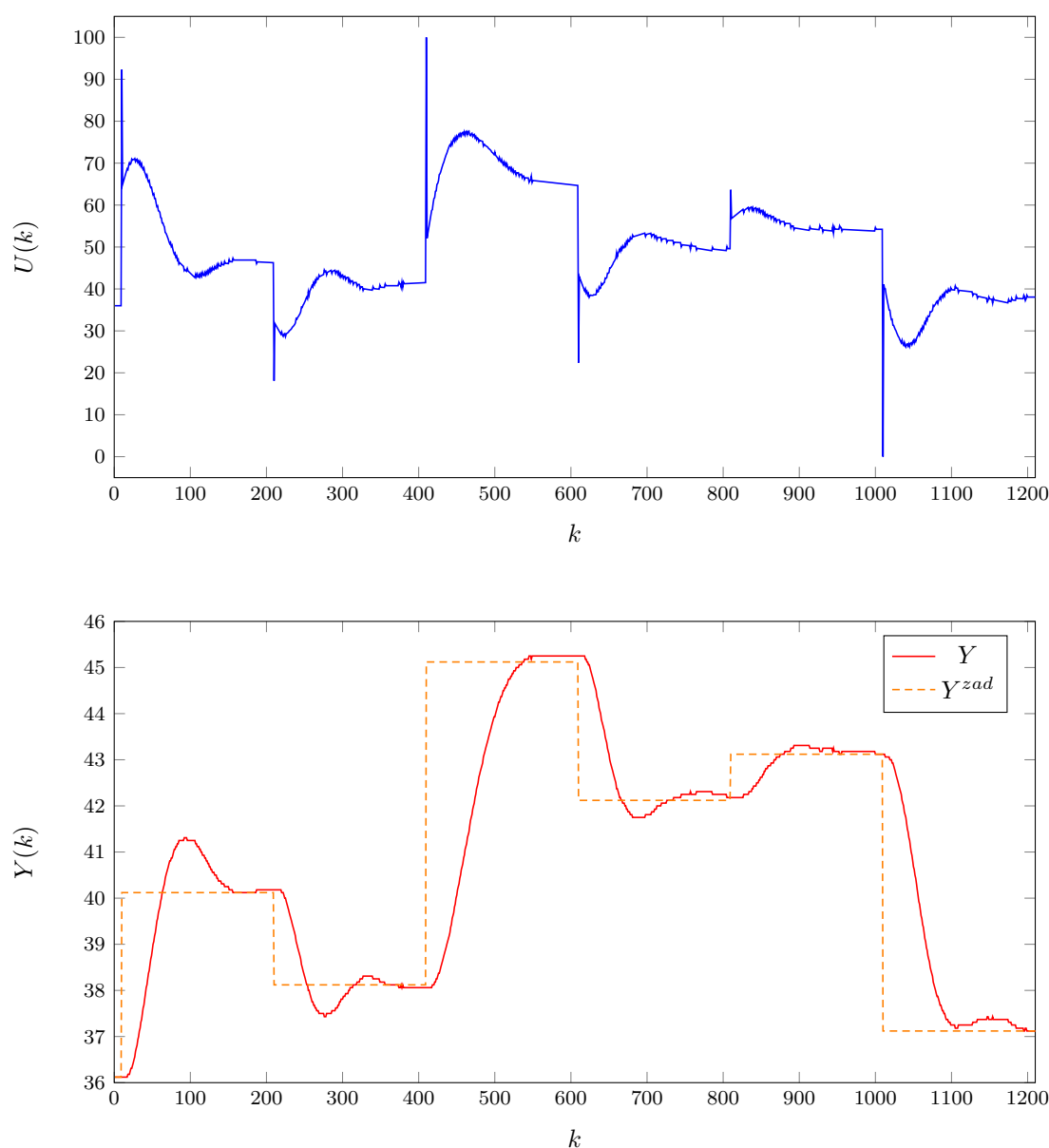
$$u(k) = \frac{\mu_{y_1}(y(k)) * u^1(k) + \mu_{y_2}(y(k)) * u^2(k)}{\mu_{y_1}(y(k)) + \mu_{y_2}(y(k))} \quad (2.3)$$

2.2. Dobór regulatorów lokalnych

2.2.1. Początkowe nastawy

Jako początkowe nastawy przyjęliśmy: dla dolnego regulatora: $K_p^1 = 5, T_i^1 = 65, T_d^1 = 1$ oraz dla górnego regulatora: $K_p^2 = 7, T_i^2 = 45, T_d^2 = 1$

Nastawy regulatora dolnego są nastawami otrzymanymi w piątym zadaniu - regulator tamten sprawdzał się w dolnym zakresie temperatur, jednakże w górnej części potrzebna była agresywniejsza regulacja, stąd silniejsze wzmocnienie i całka dla górnego regulatora. Wynik regulacji takiego regulatora rozmytego prezentowany jest na wykresie 2.1.



Rys. 2.1. Działanie rozmytego regulatora z dwoma lokalnymi regulatorami PID o nastawach $K_p^1 = 5, T_i^1 = 75, T_d^1 = 1.25, K_p^2 = 7, T_i^2 = 45, T_d^2 = 1$

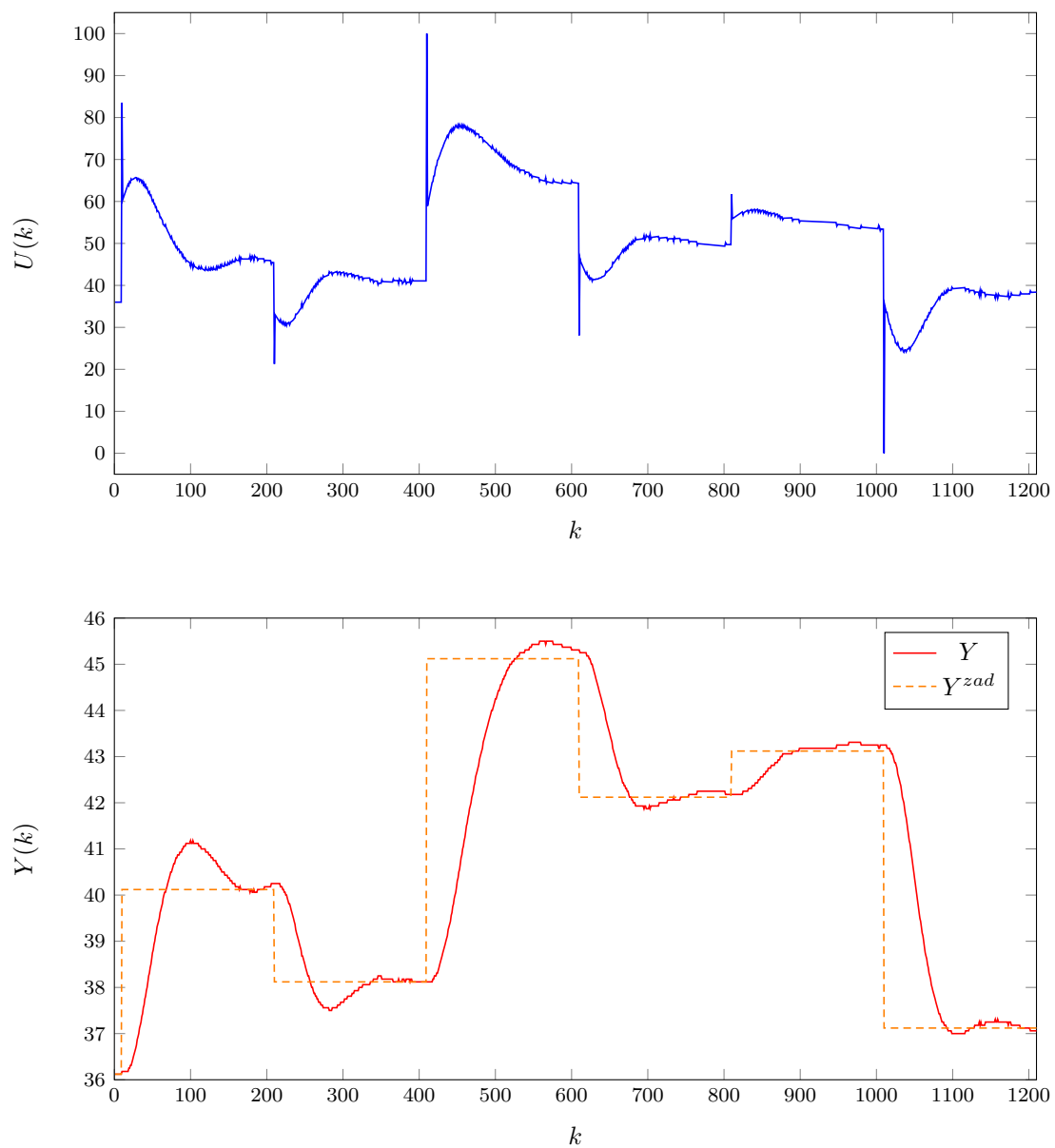
Błąd dla takiego regulatora wyniósł $E = 4344,8492$ i jest nieznacznie gorszy od tego uzyskanego przy użyciu zwykłej regulacji PID. ($E = 4243,6125$).

2.2.2. Korekta nastaw

Następnie skorygowaliśmy nastawy zgodnie z poniższą logiką: W niższych partiach widać mocne przeregulowanie - doszliśmy do wniosku, że zjawisko to spowodowane jest faktem, że silniejszy regulator wyższego zakresu temperatur również wpływa w znaczący sposób na sterowania w dolnym zakresie. Można to było rozwiązać na dwa sposoby - zmniejszyć paramter d , aby zniwelować zmniejszyć obszar, w którym strefy obu regulatorów nachodzą na siebie lub też zmniejszyć wzmocnienia obu regulatorów. Ponieważ w górnym zakresie również występuje lekkie przeregulowanie, zdecydowaliśmy się na tę drugą opcję i obniżyliśmy obydwóm regulatorom wzmocnienia - na kolejno $K_p^1 = 3$ oraz $K_p^2 = 6$. Oprócz tego zmniejszyliśmy wpływ członu całkującego w regulatorze PID dolnego zakresu - zmiana współczynnika T_i^1 z 65 na 75. Nastawy:

dla dolnego regulatora: $K_p^1 = 3, T_i^1 = 75, T_d^1 = 1$ oraz dla górnego regulatora: $K_p^2 = 6, T_i^2 = 45, T_d^2 = 1$

Efekt działania na wykresie 2.2.



Rys. 2.2. Działanie algorytmu PID przy początkowych nastawach $K_p^1 = 3, T_i^1 = 75, T_d^1 = 1$ oraz $K_p^2 = 6, T_i^2 = 45, T_d^2 = 1$

Dzięki naszym zmianom jakość regulacji poprawiła się znacząco i w konsekwencji błąd dla takiego regulatora wyniósł $E = 4163,4297$, czyli mniej, niż dla regulatora klasycznego. Z powodu presji czasu na laboratorium nie byliśmy w stanie przeprowadzić dodatkowych eksperymentów, ale osiągnięty wynik z pewnością można jeszcze poprawić. Zapewne dalsze zmniejszenie K_p^x oraz zwiększenie T_i^1 przyniosłoby pozytywne rezultaty (jeszcze większe zmniejszenia przeregulowania), jednak w takiej postaci regulator zapewnia już lepsze rezultaty od regulatora klasycznego.

3. Laboratorium: Zadanie 7: Rozmyty regulator DMC

3.1. Teoria

Sposób wyznaczania sterowania nie różni się znacząco od tego opisanego w poprzednim podpunkcie; wciąż w każdej iteracji rozmytego regulatora obliczane jest sterowanie dla każdego regulatora z przyjętych przedziałów i obliczane jest końcowe sterowanie biorąc pod uwagę stopień przynależności aktualnego $Y(k)$ do funkcji opisujących każdy z tych przedziałów. Jediną różnicą jest uśrednianie zmian sterowania, a nie samego sterowania.

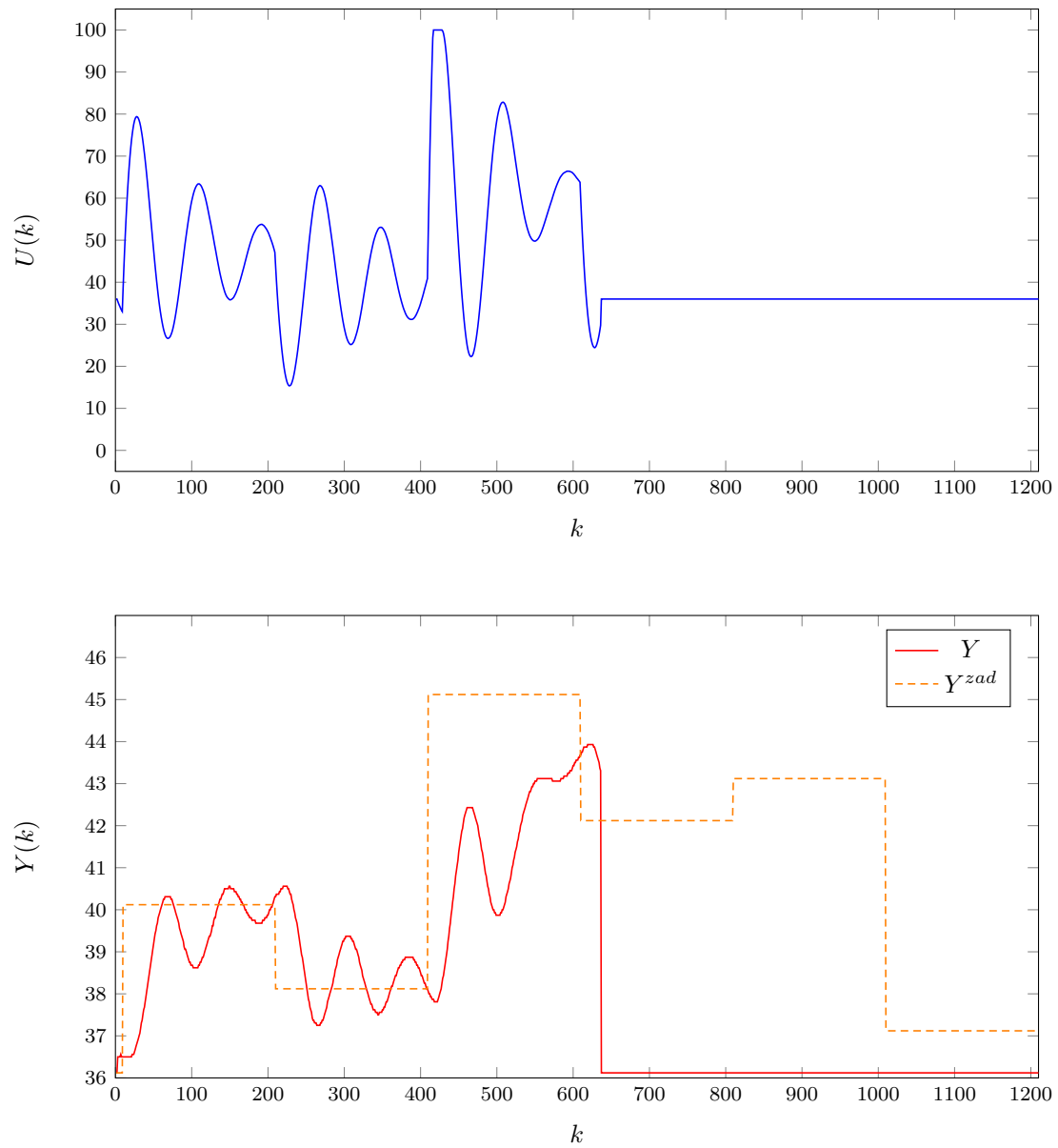
Wciąż jest to ten sam obiekt, którego charakterystyka składa się z dwóch liniowych regulatorów, nie ma więc potrzeby implementowania większej ilości regulatorów lokalnych ani zmiany postaci funkcji przynależności.

3.1.1. Odpowiedzi skokowe

Obydwa regulatory lokalne powinny korzystać z odpowiadających im odpowiedzi skokowych. Aby odpowiedzi te poprawnie reprezentowały charakter przedziału, w którym pracuje dany regulator lokalny, ich punkty początkowe i końcowe muszą się zawierać w tych przedziałach. Do algorytmu regulatora dolnego została wykorzystana znormalizowana odpowiedź skokowa z $U = 36$ o $dU = 5$, natomiast dla górnego przedziału znormalizowana odpowiedź dla takiego samego skoku z punktu początkowego $U = 55$.

3.2. Dobór początkowych parametrów

Działanie regulatora rozmytego, działające w oparciu o dwa regulatory lokalne DMC, które jako modeli używają odpowiedzi skokowych opisanych w poprzednim podpunkcie widać na wykresie 3.1. Korzystając z nastaw z podpunktu 4., przyjęliśmy parametry obu regulatorów jako: $D = 300$, $Nu = 150$, $\lambda = 0.5$.



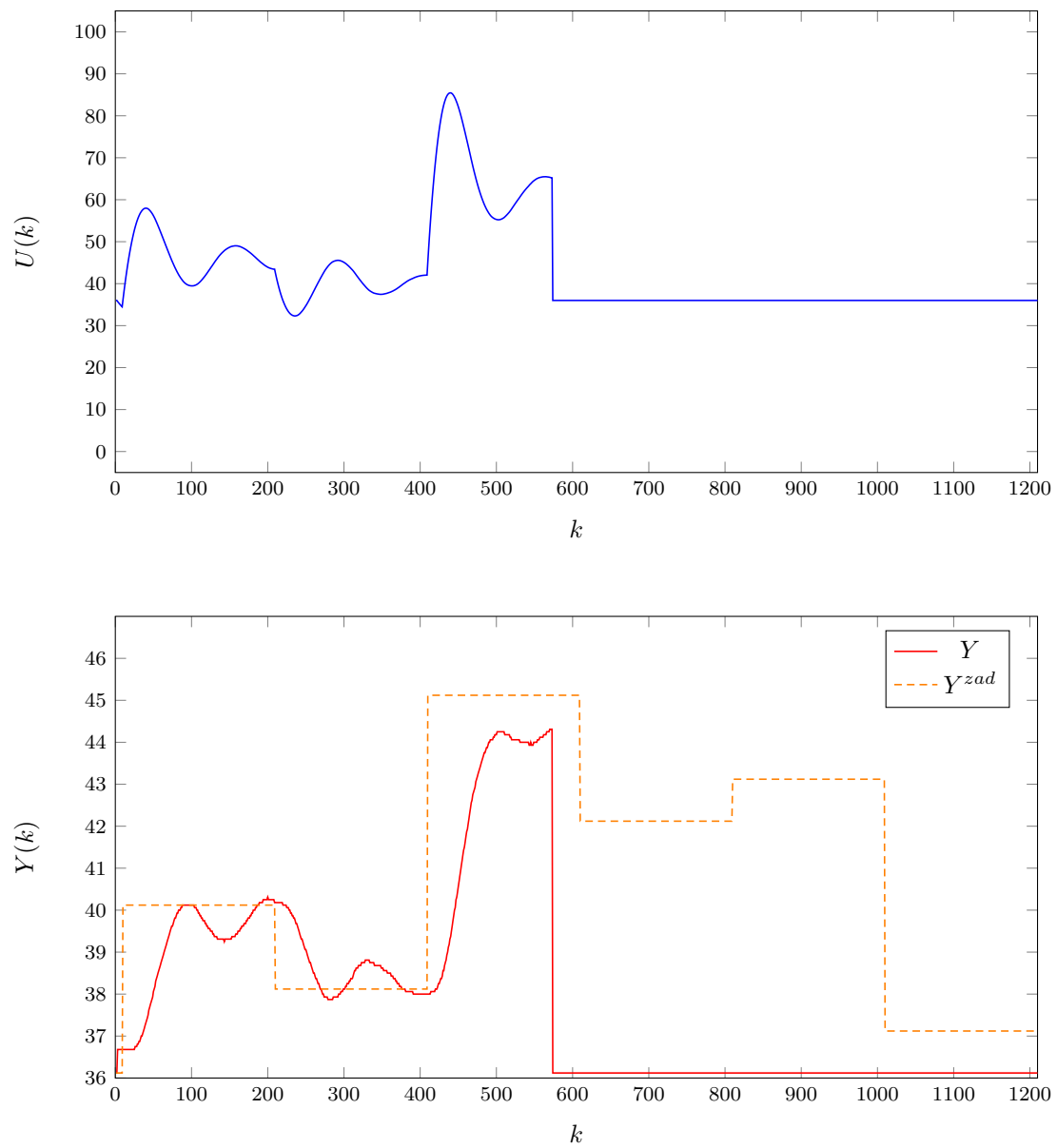
Rys. 3.1. Działanie rozmytego regulatora DMC z dwoma lokalnymi regulatorami PID o nastawach obu $D = 300, Nu = 150, \lambda = 0.5$

Jak widać, regulator rozmyty nie pracuje prawidłowo. Ma olbrzymie oscylacje zarówno sterowania jak i wyjścia. W obliczu małej ilości czasu podczas laboratorium zdecydowaliśmy się przerwać eksperyment w połowie, po wykonaniu trzech skoków, aby przystąpić do poszukiwania lepszych nastaw tego regulatora. W chwili $k = 600$ błąd tego regulatora wyniósł $E = 3926, 2250$.

4. Laboratorium: Zadanie 8: Dobór lambda dla rozmytego regulatora DMC

4.1. Korekta nastaw

Wykres 3.1, przedstawiający działanie regulatora rozmytego ze współczynnikiem $\lambda = 0.5$ nie pozostawia złudzeń - sterowanie jest zbyt gwałtowne i skutkuje oscylacyjnym charakterem wartości sterowanej. Aby wyeliminować to zjawisko postanowiliśmy zwiększyć lambda. Przyjęliśmy wartości $\lambda = 5$ dla pierwszego regulatora, działającego w dolnym zakresie temperatur oraz $\lambda = 2$ dla regulatora z górnego przedziału. Efekt widać na poniższym wykresie 4.1:



Rys. 4.1. Działanie rozmytego regulatora DMC z dwoma lokalnymi regulatorami PID o nastawach: $D^1 = 300, Nu^1 = 150, \lambda^1 = 0.5$ oraz $D^2 = 300, Nu^2 = 150, \lambda^2 = 0.5$

4.2. Wnioski

Jak widać, jakość regulacji poprawiła się. Wciąż jednak jest daleka od optymalnej, jeśli pozwoliby nam na to czas, przeprowadzilibyśmy kolejne eksperymenty z jeszcze większymi wskaźnikami λ .