

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)**

**Sprawozdanie z laboratorium 4**

**Kamil Gabryjelski, Paweł Rybak, Paweł Walczak**

**Warszawa, 2017**

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	2
<b>2. Zadanie 1</b>	3
<b>3. Zadanie 2</b>	4
<b>4. Zadanie 3</b>	6
<b>5. Zadanie 5</b>	8
5.1. PID	8
5.2. DMC	10
<b>6. Zadanie 6</b>	12
6.1. Rozmyty PID	12
6.2. Rozmyty DMC	15

# 1. Wstęp

Tematem laboratorium była implementacja, weryfikacja działania i dobór parametrów algorytmów regulacji jednowymiarowego procesu laboratoryjnego o nieliniowych właściwościach. Podczas pracy w laboratorium korzystaliśmy z pakietu MATLAB. Badania podczas laboratorium dotyczyły procesu o jednym wejściu i jednym wyjściu, W tym celu wykorzystane zostało stanowisko z następującymi elementami:

- sterowanie — grzałka G1,
- pomiar — czujnik temperatury T1,
- stałe zakłócenie — wentylator W1.

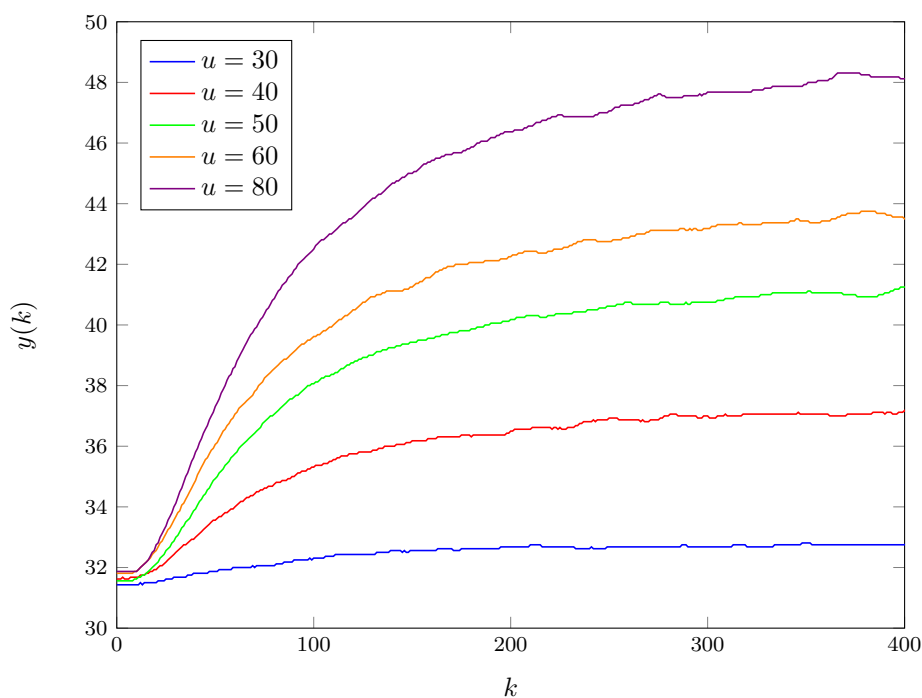
Sygnał sterujący mógł zmieniać się w zakresie 0 - 100%. Sygnał wyjściowy to pomiar wykonany przez czujnik temperatury T1 (w stopniach celsjusza), natomiast wentylator W1 należy traktować jako cechę otoczenia- jego użycie pozwala przyspieszyć opadanie temperatury zmierzonej na czujniku T1. Sterowanie wentylatora W1 miało stałą wartość 50%. Czas próbkowania wynosi 1s. Ze względu na występujące w pobliżu stanowiska zakłócenia, w postaci otwartych drzwi (powodującej mocne cyrkulacje powietrza), przechodzące w pomieszczeniu osoby itp., przeprowadzone przez nas pomiary nie oddawały idealnie zachowania obiektu.

## 2. Zadanie 1

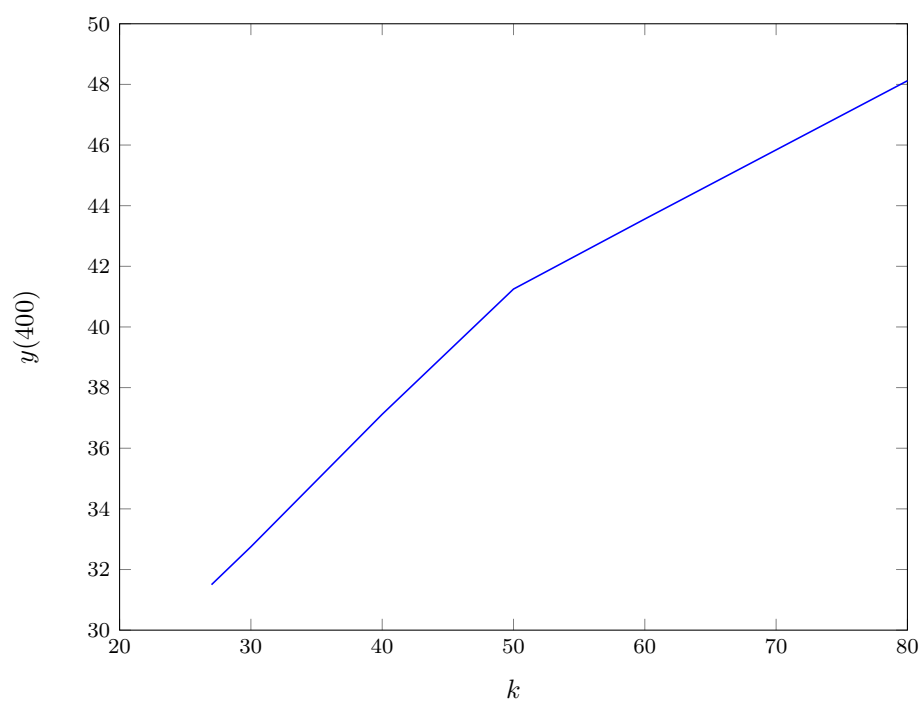
Pierwsze zadanie polegało na sprawdzeniu możliwości komunikacji ze stanowiskiem, oraz sprawdzenia punktu pracy, przy sterowaniu grzałki G1 równym 27, oraz stałym sterowaniu wentylatora równym 50. Nie wystąpiły problemy z komunikacją ze stanowiskiem laboratoryjnym. Po wystrojeniu grzałki na wartości  $U_{pp} = 27$  i odczekaniu do ustabilizowania się obiektu, wyjście wynosiło  $31,5^{\circ}C$ . Chcielibyśmy w tym miejscu nadmienić, że podczas przeprowadzania późniejszych eksperymentów, nastąpiły rozbieżności w porównaniu do przeprowadzonego eksperymentu, co będzie można zauważyć w kolejnych zadaniach.

### 3. Zadanie 2

Celem zadania drugiego było wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru wejście-wyście dla pięciu różnych zmian sygnału sterującego  $G1$  rozpoczynając z punktu pracy oraz określenie czy obiekt ma właściwości liniowe. Skoki sterowania przeprowadziliśmy do kilku różnych wartości  $U$ : 30, 40, 50, 60, 70, oraz 80. Wykres dla wymienionych odpowiedzi skokowych znajduje się na rysunku 3.1. Ustaliliśmy, iż po 400 sekundach wyście obiektu jest stabilne. Na tej podstawie stworzyliśmy charakterystykę statyczną obiektu przedstawiającą wyście w 400. chwili, w zależności od wartości sterowania. Wspomniany wykres jest przedstawiony na rysunku 3.2. Zauważamy, że charakterystykę statyczną może podzielić na dwa przebiegi (dwie linie proste o różnych nachyleniach). Stąd, wskazane będzie użycie tak zwanej regulacji rozmytej. Użyjemy do tego dwóch regulatorów. Pierwszy będzie odpowiadał za sterowanie dolnego przedziału, kolejny zaś będzie sterował drugim przedziałem. Drugi regulator musi charakteryzować się większą "agresywnością" ze względu na to, że w tym przedziale obiekt słabiej reaguje na zmiany sterowania.



Rys. 3.1. Odpowiedzi skokowe obiektu.



Rys. 3.2. Charakterystyka statyczna obiektu.

## 4. Zadanie 3

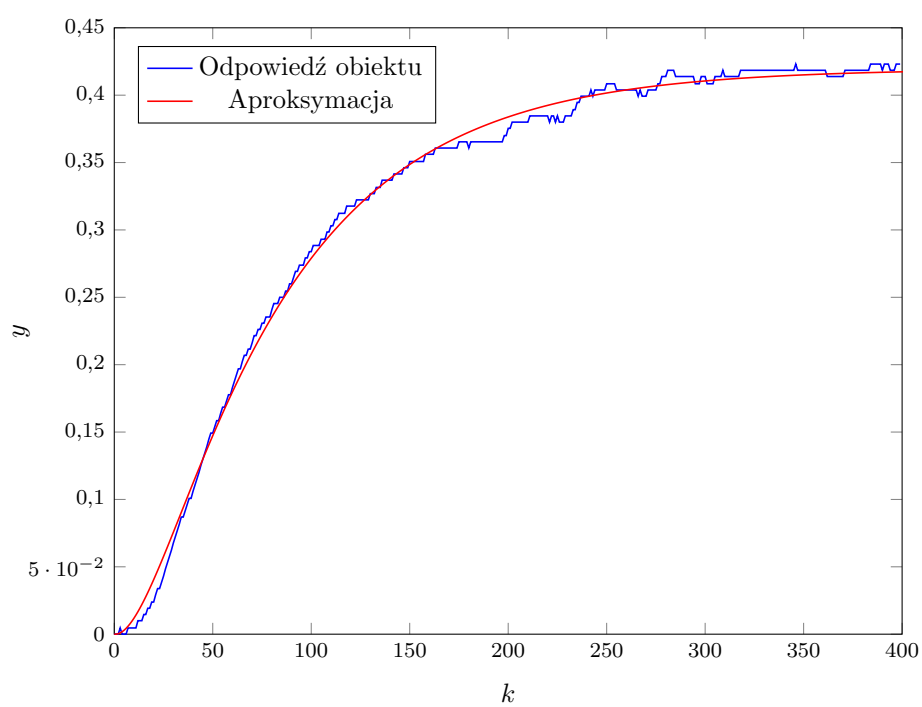
Celem zadania trzeciego było przekształcenie jednej z otrzymanych odpowiedzi skokowych używając w tym celu członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem. Wzór ogólny takiego obiektu przedstawia równanie 4.1.

$$y(k) = b_1 u(k - T_D - 1) + b_2 u(k - T_D - 2) - a_1 y(k - 1) - a_2 y(k - 2), \quad (4.1)$$

gdzie

$$\begin{aligned} a_1 &= -e^{-\frac{1}{T_1}} - e^{-\frac{1}{T_2}} \\ a_2 &= e^{-\frac{1}{T_1}} e^{-\frac{1}{T_2}} \\ b_1 &= \frac{K}{T_1 - T_2} [T_1(1 - e^{-\frac{1}{T_1}}) - T_2(1 - e^{-\frac{1}{T_2}})] \\ b_2 &= \frac{K}{T_1 - T_2} [e^{-\frac{1}{T_1}} T_2(1 - e^{-\frac{1}{T_2}}) - e^{-\frac{1}{T_2}} T_1(1 - e^{-\frac{1}{T_1}})] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Przybliżenie polega na takim dobraniu parametrów  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $K$ , oraz  $T_D$  tak, aby różnica między faktycznym wyjściem obiektu i przybliżeniem była jak najmniejsza. Do doboru parametrów użyliśmy funkcji **GA**. Do znormalizowania wykorzystaliśmy odpowiedź skokową, gdzie skok sterowania wynosił  $\Delta U = 13$  (do wartości sterowania  $U = 40$ ). Nasz wybór motywujemy, tym że otrzymana odpowiedź była najmniej zaszumiona. Procesu normalizacji odpowiedzi skokowej, przed poddaniem jej aproksymacji, nie będziemy tutaj opisywać, ze względu na dokładny opis owego procesu w poprzednich sprawozdaniach. Do przybliżenia użyliśmy algorytm ewolucyjny, który nie używa punktu początkowego, a losowej populacji początkowej. Dlatego jedyne parametry algorytmu to ogarniczenia. Kierując się logiką ograniczyliśmy od dołu parametry zerami, zaś od góry wartościami 1000, 1000, 10, 50, dla zmiennych odpowiednio  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $K$ , oraz  $T_D$ . Aproksymacja odpowiedzi skokowej została pokazana na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Aproksymacja odpowiedzi skokowej obiektu.



## 5. Zadanie 5

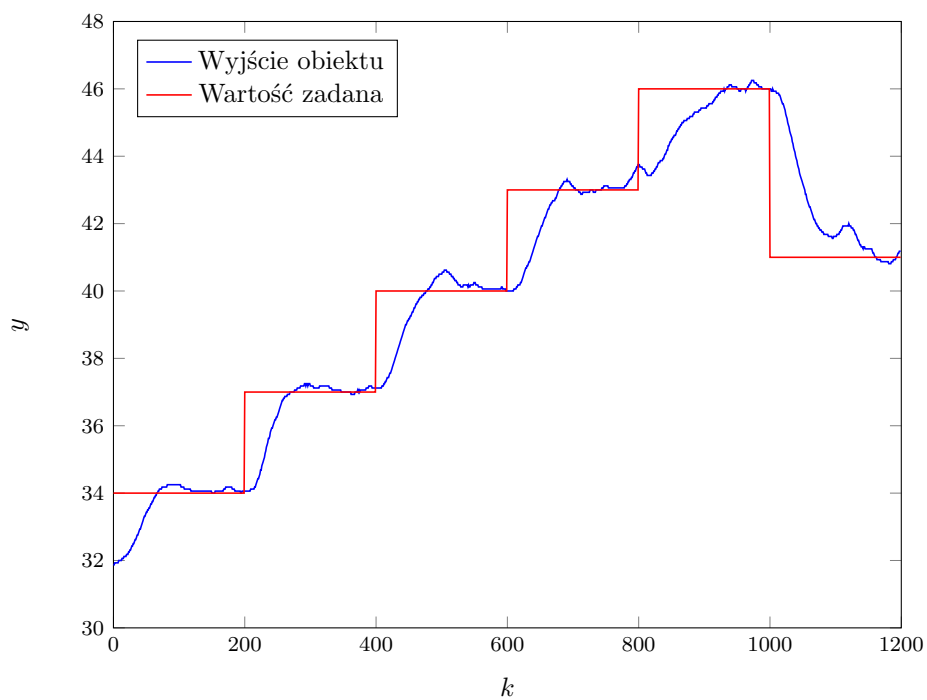
Celem zadania piątego było dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnałów zadanych (6 skoków o różnej amplitudzie) dobranie nastaw dla regulatora PID i parametrów dla algorytmu DMC metodą eksperymentalną. Jakość regulacji ocenialiśmy wizualnie (na podstawie przebiegów wartości wyjścia obiektu), oraz ilościowo za pomocą wskaźnika  $E$ , liczonego jako suma kwadratów uchybów regulacji. Dla obu regulatorów ustaliliśmy taką samą trajektorię wartości zadanej, aby umożliwić jak najrzetelniejsze porównanie regulatorów. Trajektoria polegała na ustawieniu stałej wartości zadanej, kolejno: 34, 37, 40, 43, 46, 41, na 200 sekund. Pomiary rozpoczynaliśmy z punktu pracy wyznaczonego w zadaniu pierwszym.

### 5.1. PID

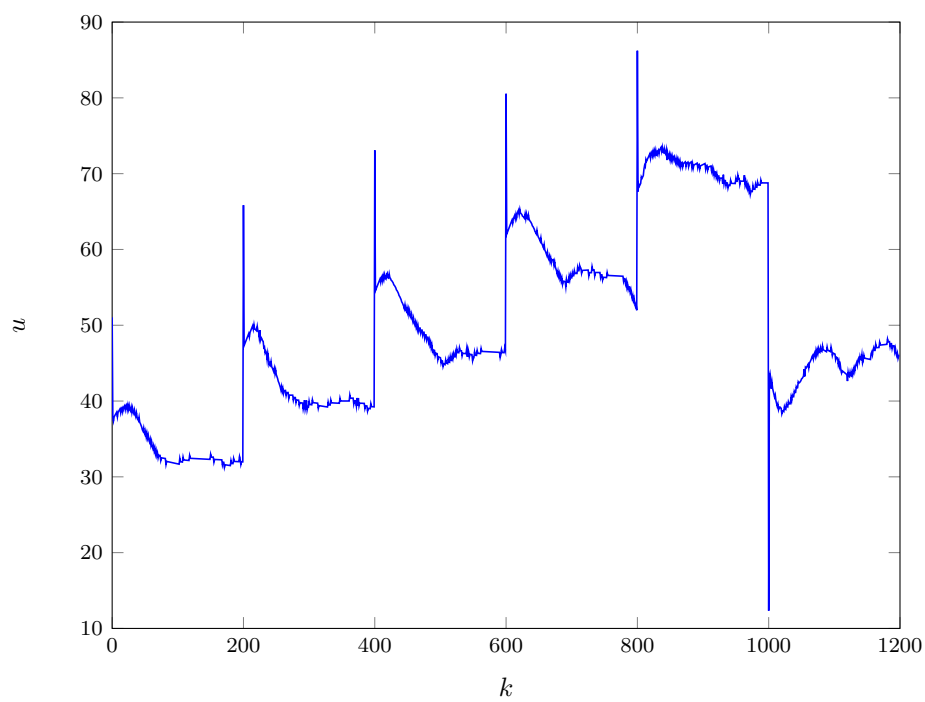
Jako parametry regulatora PID dobraliśmy wstępnie parametry, które okazały się dobre na poprzednim laboratorium. Byliśmy świadomi tego, iż obiekt jest lekko zmodyfikowany, więc użyliśmy ich jako wstępnego zestawu parametrów, który potem poprawiliśmy. Regulator był tak zestawiany, aby działał jak najlepiej w pobliżu punktu pracy, czyli w dolnej części charakterystyki obiektu. Finalnie parametry regulatora PID wynosiły

$$K = 5, \quad T_i = 65, \quad T_d = 1, 25. \quad (5.1)$$

Działanie tego regulatora przedstawia rysunek 5.1, natomiast sterowanie generowane przez niego rysunek 5.2. Widać na nich, iż regulator działa wyraźnie lepiej dla temperatur zdecydowanie poniżej punktu, w którym charakterystyka statyczna się "przełamuje", czyli przy pierwszych dwóch skokach. Przy pracy na wyższych temperaturach regulator radzi sobie dużo gorzej. Wpływ na to miał również fakt działania z dala od punktu pracy. Na podstawie tylko tych wykresów nie jesteśmy w stanie stwierdzić co miało większy wpływ na takie a nie inne zachowanie obiektu. Błąd regulacji wynosił  $E = 2,212 \cdot 10^3$ .



Rys. 5.1. Regulacja regulatorem PID.



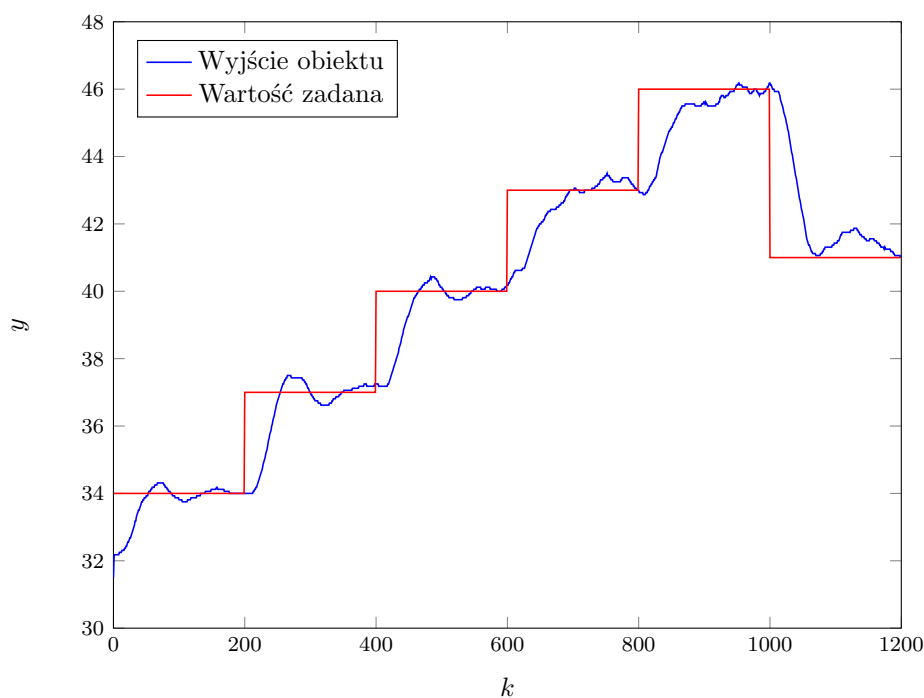
Rys. 5.2. Sterowanie regulatora PID.

## 5.2. DMC

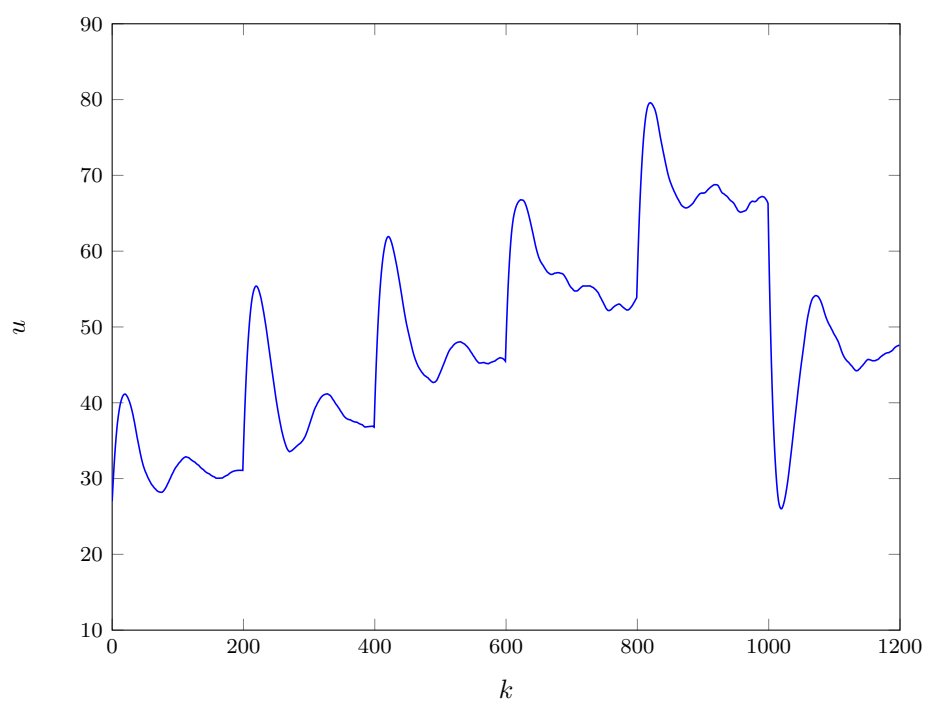
Kolejnym testowanym regulatorem był regulator DMC. Jego parametry zostały dobrane podobnie jak poprzednio. Finalnie wynosiły one

$$D = 500, \quad N = 500, \quad N_u = 500, \quad \Lambda = 1. \quad (5.2)$$

Jednak w przeciwieństwie do regulatora PID, tutaj większy wpływ na dobre działanie mają dobre odpowiedzi skokowe obiektu. Została tutaj użyta odpowiedź przy skoku sterowania do  $U = 40$ , więc, podobnie jak w przypadku regulatora PID, w dolnej części charakterystyki obiektu. Działanie regulatora przedstawia rysunek 5.3, natomiast generowane przez niego sterowanie rysunek 5.4. Na tym wykresie idealnie widać, iż regulator jest nie przystosowany do pracy przy wyższych temperaturach, gdzie charakterystyka statyczna obiektu jest inna. Widać dokładnie, iż regulator ma problemy z dojściem do wartości zadanej. Błąd regulacji wynosił  $E = 2,027 \cdot 10^3$ .



Rys. 5.3. Regulacja regulatorem DMC.



Rys. 5.4. Sterowanie regulatora DMC.

## 6. Zadanie 6

Celem zadania szóstego było dla zaproponowanej trajektorii zmian wartości zadanych, zaimplementowanie oraz dobranie parametrów rozmytego regulatora PID. Trajektoria wartości zadanej Jest taka sama jak w zadniu 5, aby jak najłatwiej porównywać regulatory. Zdecydowaliśmy się na przeprowadzenie eksperymentu jedynie dla 2 regulatorów lokalnych, ze względu na to, że charakterystyka statyczna odzwierciedla, że uzasadnione jest zastosowanie tylko dwóch regulatorów (jeden punkt przebiegu, dwie proste linie o różnych nachyleniach). Teza ta jest poparta wiedzą eksperta, w postaci prowadzącego laboratorium. Nastawy regulatorów PID dobieraliśmy metodą eksperymentalną, wraz ze zwróceniem uwagi na wyniki regulacji przeprowadzonych dla zwykłego regulatora PID z zadania 5. Stwierdziliśmy, że dla górnego przedziału wartości wyjść potrzebny będzie regulator bardziej agresywny, tak aby rekompensował słabą reaktywność obiektu na zmiany sterowania w górnym przedziale wartości wyjść. Jako funkcję przynależności wybraliśmy funkcję sigmoidalną. Ze względu na użycie dwóch regulatorów lokalnych, jako parametry tej funkcji wybraliśmy  $c = 50$  (punkt przecięć funkcji dla obu regulatorów), oraz  $d = 10$  ("stromość" funkcji), jako podaną przez prowadzącego odpowiednią wartość.

### 6.1. Rozmyty PID

Pierwszym regulatorem rozmytym przetestowanym przez nas był regulator PID. Dla dolnej części sterowań, przed punktem przełamania charakterystyki obiektu, użyliśmy nastaw regulatora z poprzedniego zadania. Drugi regulator został dobrany na podstawie charakterystyki statycznej, mając pierwszy regulator jako punkt odniesienia. Wiedzieliśmy, iż drugi regulator powinien być bardziej agresywny. Na tej podstawie dostaliśmy następujące nastawy

$$K_1 = 5, \quad T_{i1} = 65, \quad T_{d1} = 1, 25, \quad (6.1)$$

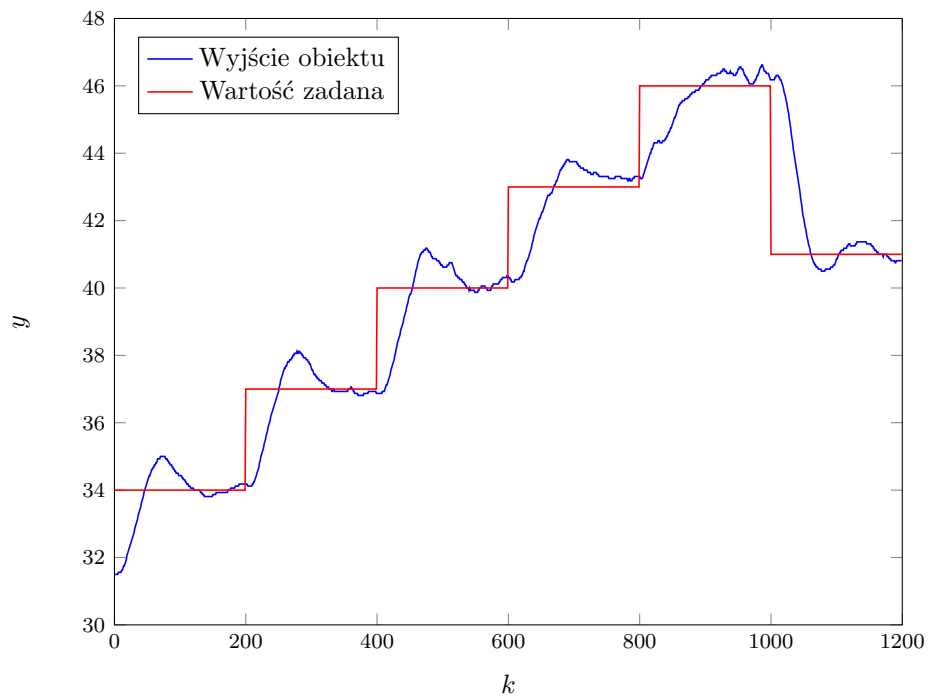
$$K_2 = 6, 5, \quad T_{i2} = 45, \quad T_{d2} = 1, 25. \quad (6.2)$$

Działanie tak dobranych regulatorów zostało przedstawione na rysunku 6.1. Sterowanie generowane przez taki zestaw regulatorów przedstawia rysunek 6.2. Błąd regulacji wynosi  $E = 2,101 \cdot 10^3$ . Niestety, nie byliśmy zadowoleni działaniem tego regulatora, dlatego postanowiliśmy przetestować zestaw regulatorów o lekko poprawionych nastawach. Drugie nastawy miały lekko niższe wzmocnienie, tak aby zmniejszyć przesterowanie. Nastawy prezentowały się następująco

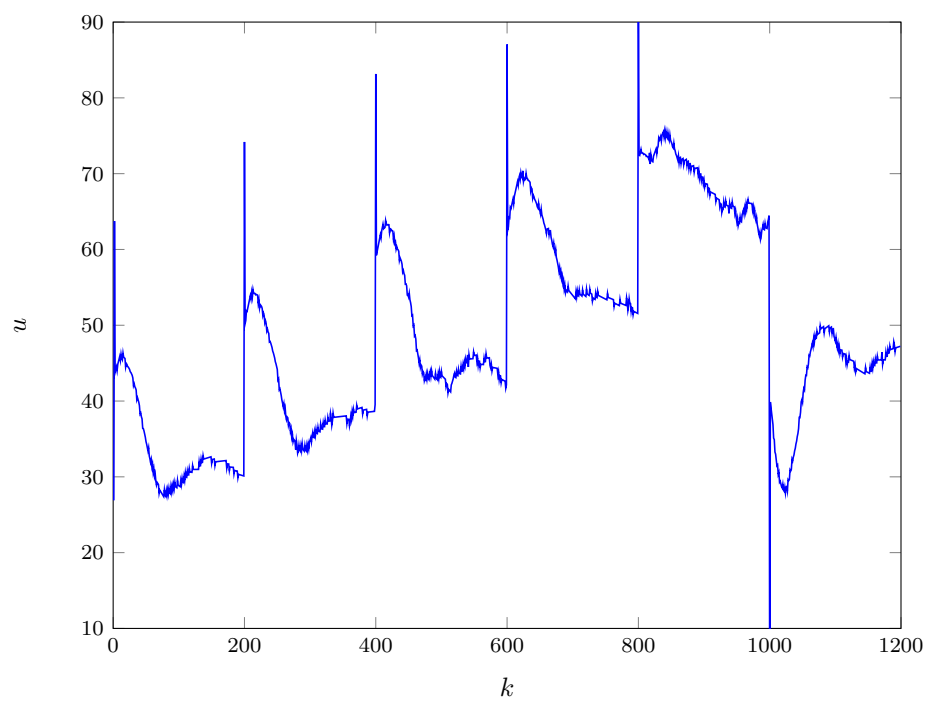
$$K_1 = 4, \quad T_{i1} = 65, \quad T_{d1} = 1, 25, \quad (6.3)$$

$$K_2 = 6, \quad T_{i2} = 45, \quad T_{d2} = 1, 25. \quad (6.4)$$

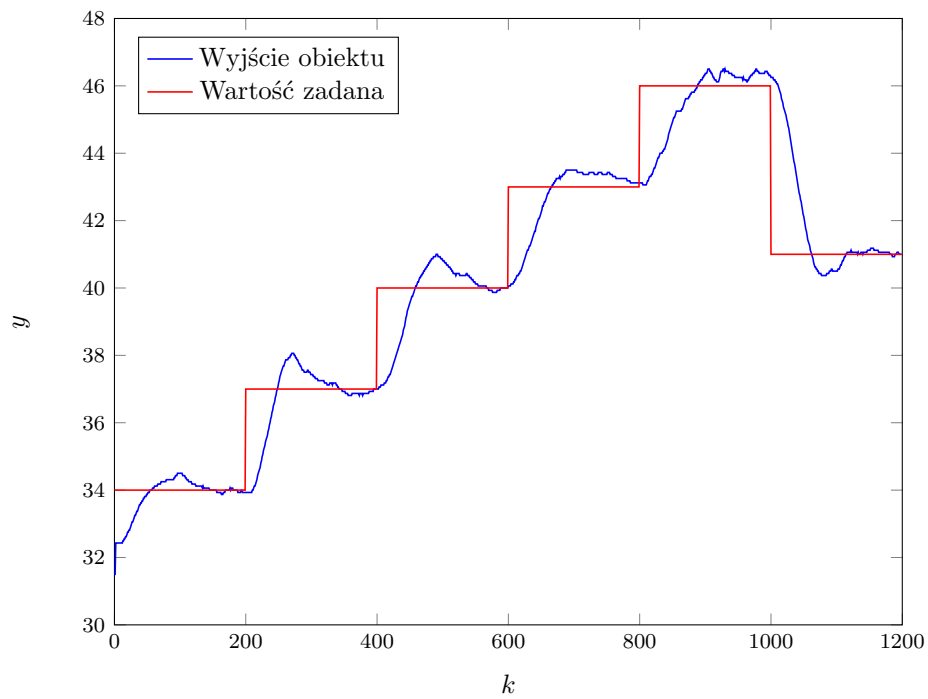
Wyniki działania tych regulatorów przedstawiają wykresy 6.3, oraz 6.2. Przeregulowania są zdecydowanie niższe. Błąd regulacji wynosi  $E = 1,961 \cdot 10^3$ . Wydaje nam się że można uzyskać lepsze efekty. Jednak po pierwsze nie mieliśmy czasu na takie eksperymenty, a po drugie celem laboratorium nie było stworzenie idealnego regulatora, a poznanie i porównanie działania regulatorów rozmytych, co zdecydowanie nam się udało.



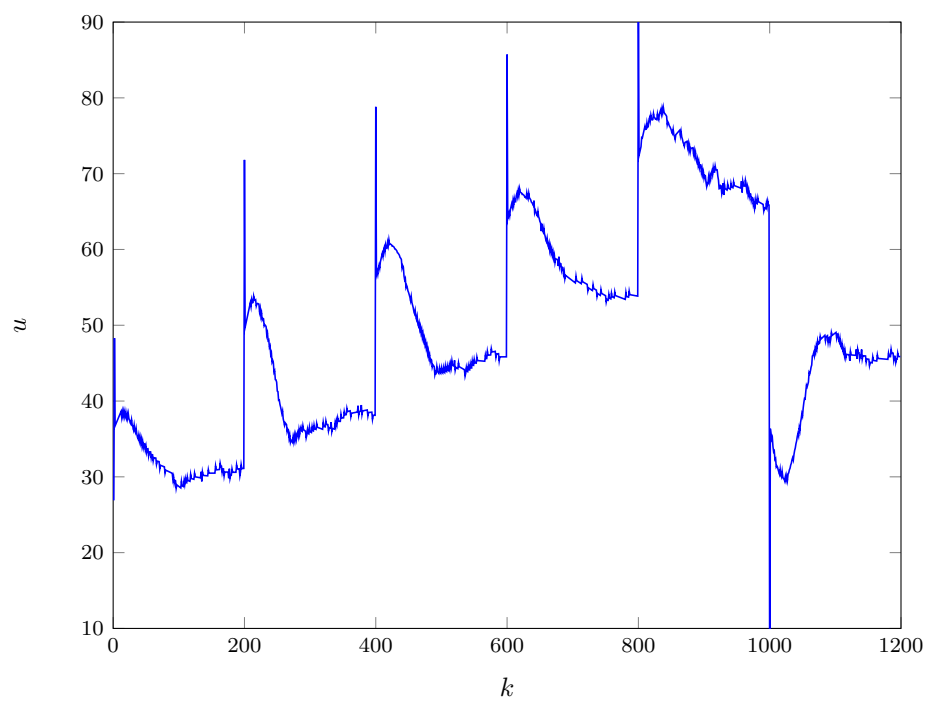
Rys. 6.1. Regulacja pierwszym rozmytym regulatorem PID.



Rys. 6.2. Sterowanie pierwszym rozmytym regulatorem PID.



Rys. 6.3. Regulacja drugim rozmytym regulatorem PID.



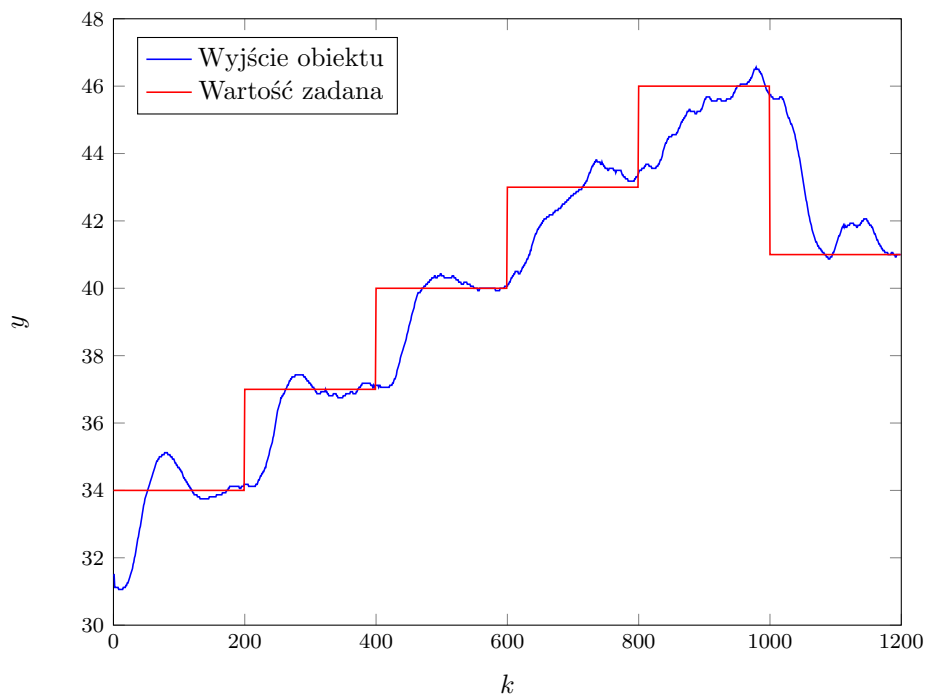
Rys. 6.4. Sterowanie drugim rozmytym regulatorem PID.

## 6.2. Rozmyty DMC

Nastawy regulatora DMC wybrane przez nas eksperymentalnie wynoszą:

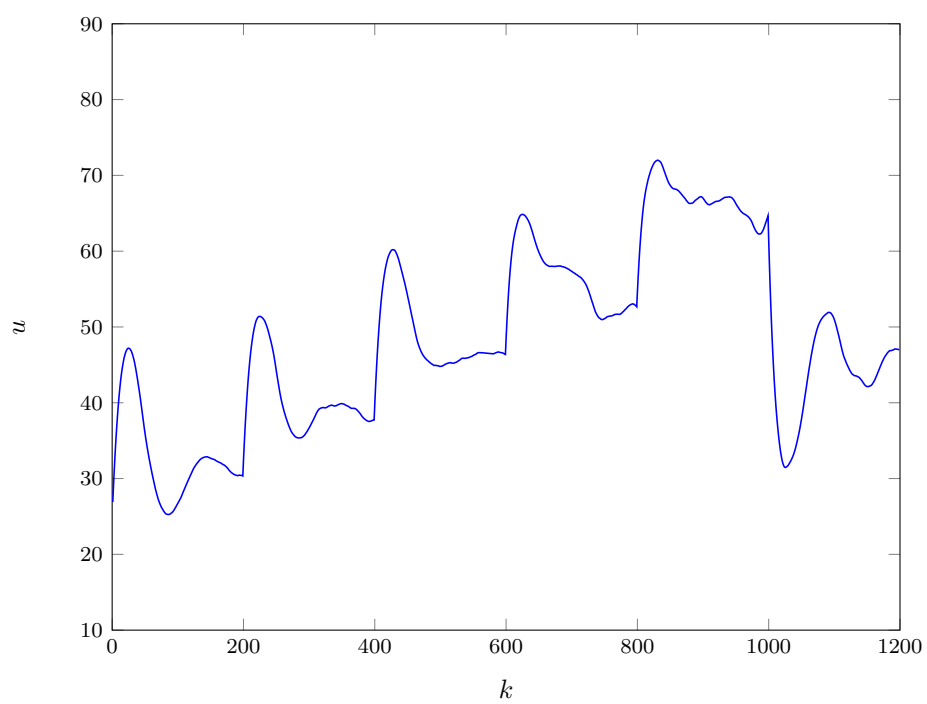
$$D = 500, \quad N = 500, \quad N_u = 500, \quad \Lambda_1 = 2, \quad \Lambda_2 = 1. \quad (6.5)$$

Oczywiście bazą dla działania tego regulatora jest odpowiednia odpowiedź skokowa. Zostały tutaj użyte aproksymacje znormalizowanych odpowiedzi skokowych przy skoku sterowania do  $U = 40$ , oraz  $U = 80$ . Pierwsza z tych aproksymacji była użyta już wcześniej i przedstawiona na wykresie 4.1. Wynik działania tego algorytmu przedstawia rysunek 6.5. Sterowanie generowane przezeń przedstawia wykres 6.6. Wynik działania tego regulatora nie jest najlepszy. Błąd regulacji wynosi  $E = 2,479 \cdot 10^3$ . Na początku widać ewidentny brak stabilizacji obiektu na wartości zadanej, co prawdopodobnie było wynikiem pośpiechu. Następne złe wyniki były prawdopodobnie spowodowane zakłóceniami i ludźmi chodzącymi dookoła, gdyż było to wykonywane na koniec zajęć. Niestety z tego samego powodu nie udało nam się przetestować innych nastaw, ani tego algorytmu w lepszych warunkach.



Rys. 6.5. Regulacja rozmytym regulatorem DMC.





Rys. 6.6. Sterowanie rozmytego regulatora DMC.