

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego  
nr 3, zadanie nr 2

Eva Reszka, Mateusz Roszkowski, Dominika Zając

Warszawa, 2021

# Spis treści

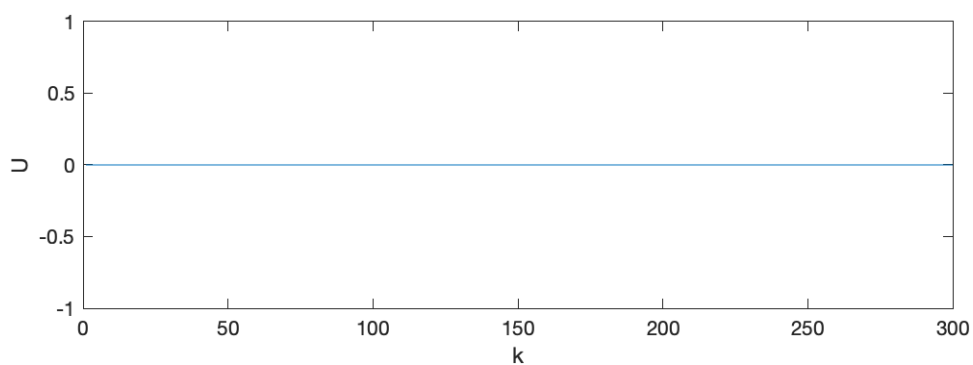
<b>1. Projekt</b>	2
1.1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy	2
1.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych procesu	2
1.3. Algorytmy PID i DMC	3
1.4. Rozmyty algorytm PID	4
1.5. Rozmyty algorytm DMC	7
<b>2. Ćwiczenie laboratoryjne</b>	12
2.1. Przygotowanie do wykonania ćwiczenia	12
2.2. Przebiegi sygnałów wyjściowych	12
2.3. Regulator PID z laboratorium 1	13
2.4. Regulator DMC z laboratorium 1	14
2.5. Rozmyty algorytm PID	15
2.6. Rozmyty algorytm DMC	15

# 1. Projekt

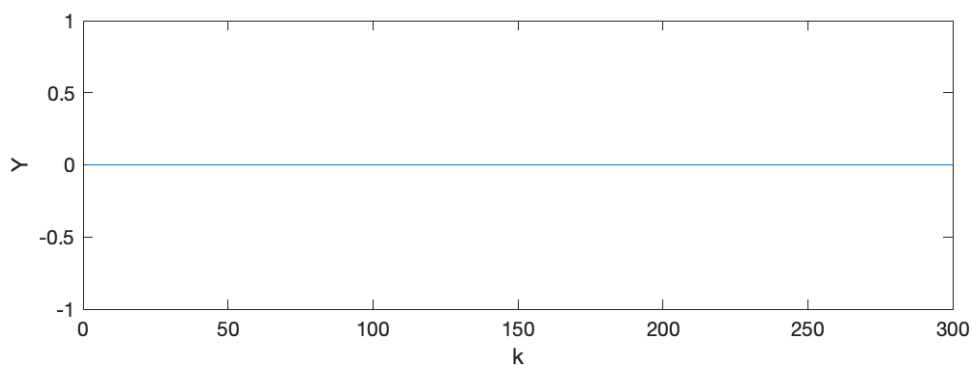
## 1.1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

Implementacja zadania znajduje się w pliku `zad1_2.m`.

Punkt pracy równy jest  $U_{pp} = 0$ ,  $Y_{pp} = 0$ , co zostało przedstawione na wykresach 1.1 i 1.2.



Rys. 1.1. Wejście układu w punkcie pracy

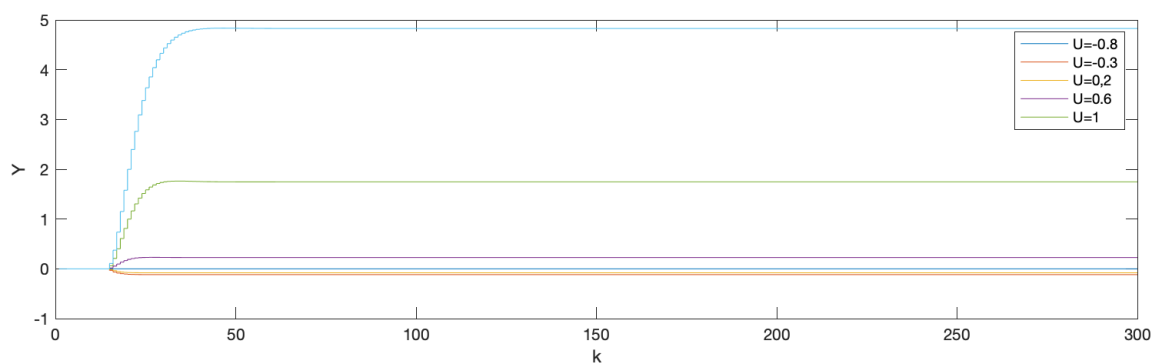


Rys. 1.2. Wyjście układu w punkcie pracy

## 1.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych procesu

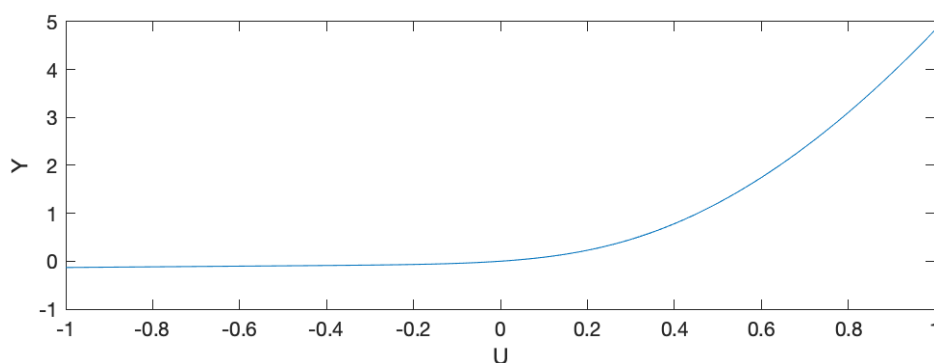
Układ został pobudzony sygnałami o wartościach  $U = [-0,8; -0,3; 0,2; 0,6; 1,0]$ .

Otrzymane zostały w ten sposób odpowiedzi skokowe:



Rys. 1.3. Otrzymane odpowiedzi skokowe

Na wykresie 1.4 widoczna jest charakterystyka statyczna obiektu.



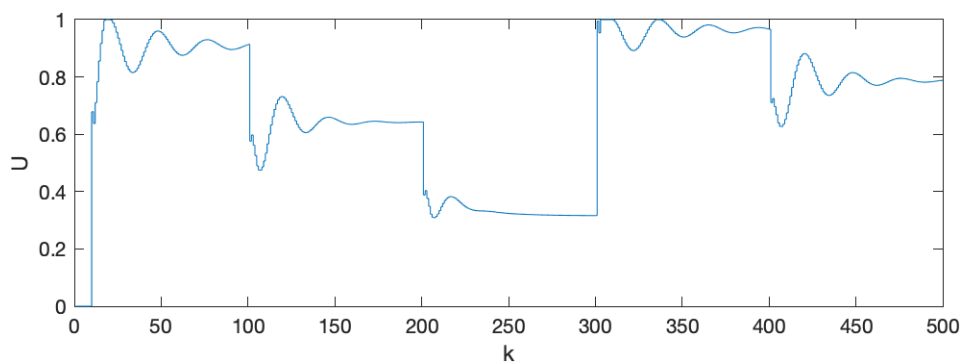
Rys. 1.4. Charakterystyka statyczna

Właściwości dynamiczne oraz statyczne nie są liniowe. Do charakterystyki statycznej nie może zostać dopasowana prosta.

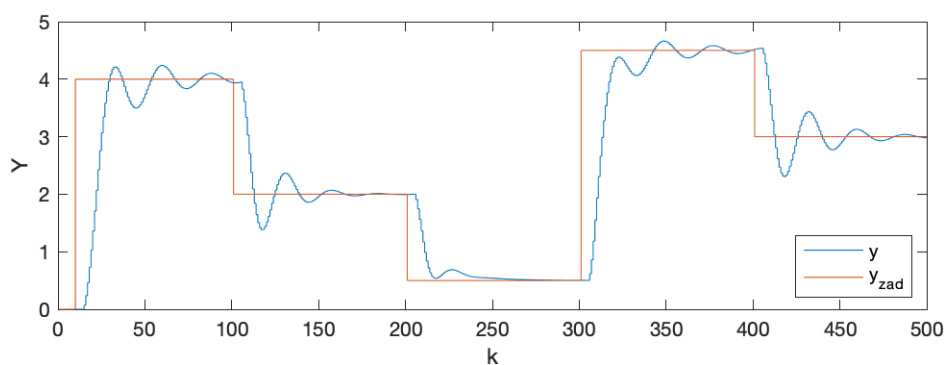
### 1.3. Algorytmy PID i DMC

Obiekt został poddany regulacji za pomocą algorytmów PID i DMC z Projektu 2.

Jakość sterowania zależy od wartości  $Y_{zad}$ . Różni się intensywność oscylacji oraz wartość przeregulowania. Wynika to z nieliniowości charakterystyki statycznej.

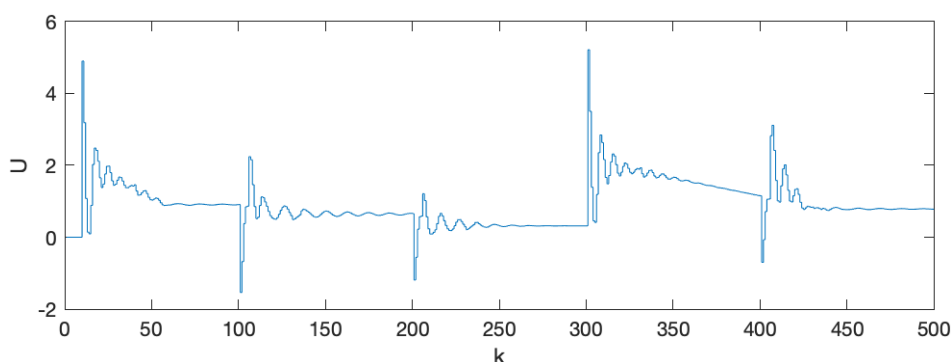


Rys. 1.5. Wejście układu - algorytm PID

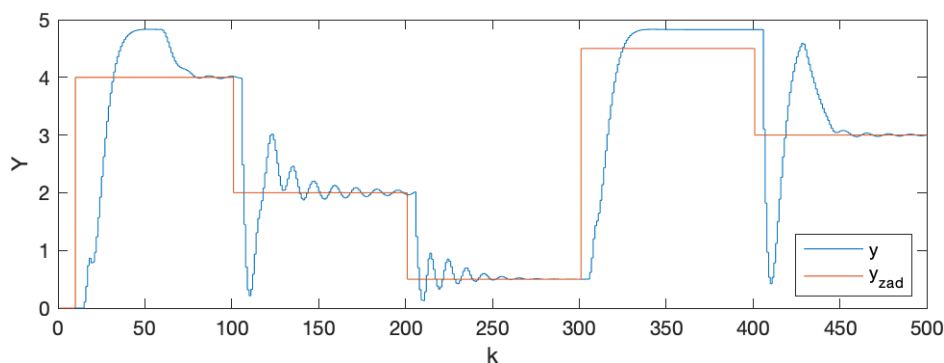


Rys. 1.6. Wyjście układu - algorytm PID

Wskaźnik jakości wyniosł  $E = 388.88$ .



Rys. 1.7. Wejście układu - algorytm PID



Rys. 1.8. Wyjście układu - algorytm PID

Wskaźnik jakości wyniosł  $E = 515.34$ . Jego wartość jest większa, niż dla PID. Regulator DMC sprawdził się gorzej od pierwszego algorytmu. Wstępuje znacznie większe przeregulowanie oraz oscylacje. Dla  $Y_{zad} = 4.5$  sygnał wyjściowy nie osiąga tej wartości.

#### 1.4. Rozmyty algorytm PID

Zaimplementowany został rozmyty algorytm PID dla różnej ilości regulatorów lokalnych (2, 3, 4, 5). Dla każdego z regulatorów nastawy zostały dobrane oddzielnie za pomocą optymalizacji znajdującej się w pliku `Dobieranie_PID.m`

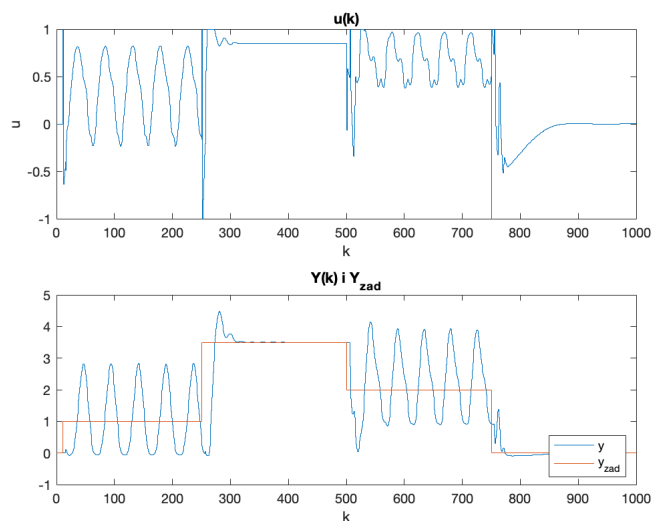
W wyniku optymalizacji otrzymano następujące nastawy i przebiegi:

— Dla dwóch regulatorów:

$$K_1 = -0.172946 \quad K_2 = 0.191360$$

$$T_{i1} = -1.070829 \quad T_{i2} = 8.028027$$

$$T_{d1} = -4.981247 \quad T_{d2} = 0.769607$$



Rys. 1.9. Przebiegi dla rozmytego regulatora PID. Liczba regulatorów = 2

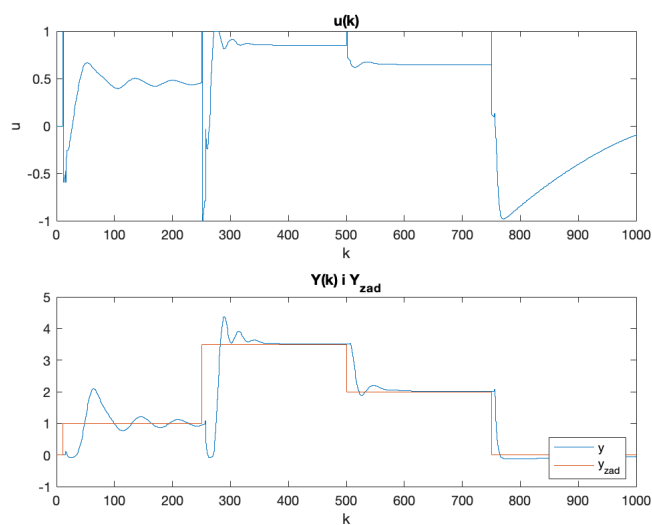
Wskaźnik jakości regulacji  $E = 795,4233$

— Dla trzech regulatorów

$$K_1 = -0.172946 \quad K_2 = -0.018484 \quad K_3 = 0.191360$$

$$T_{i1} = -2.055129 \quad T_{i2} = -10.214840 \quad T_{i3} = 8.028027$$

$$T_{d1} = -4.981247 \quad T_{d2} = 15.489054 \quad T_{d3} = 0.769607$$



Rys. 1.10. Przebiegi dla rozmytego regulatora PID. Liczba regulatorów = 3

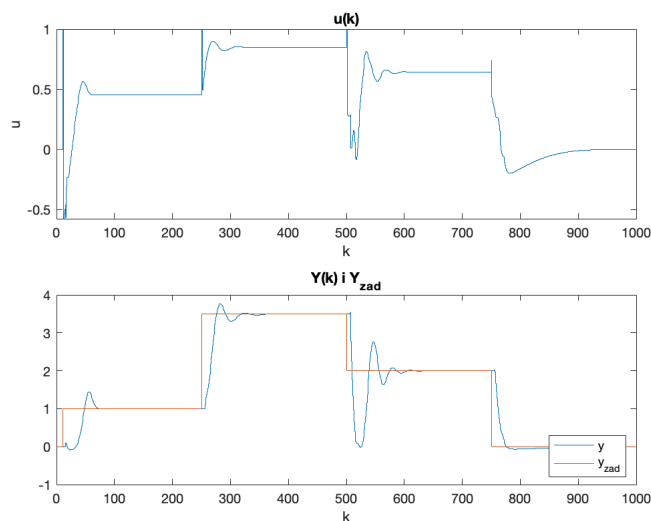
Wskaźnik jakości regulacji  $E = 387,9480$

— Dla czterech regulatorów

$$K_1 = -0.172946 \quad K_2 = 0.132199 \quad K_3 = -0.018484 \quad K_4 = 0.191360$$

$$T_{i1} = -2.055129 \quad T_{i2} = 3.637091 \quad T_{i3} = -10.214840 \quad T_{i4} = 8.028027$$

$$T_{d1} = -4.981247 \quad T_{d2} = 0.107170 \quad T_{d3} = 15.489054 \quad T_{d4} = 0.769607$$



Rys. 1.11. Przebiegi dla rozmytego regulatora PID. Liczba regulatorów = 4

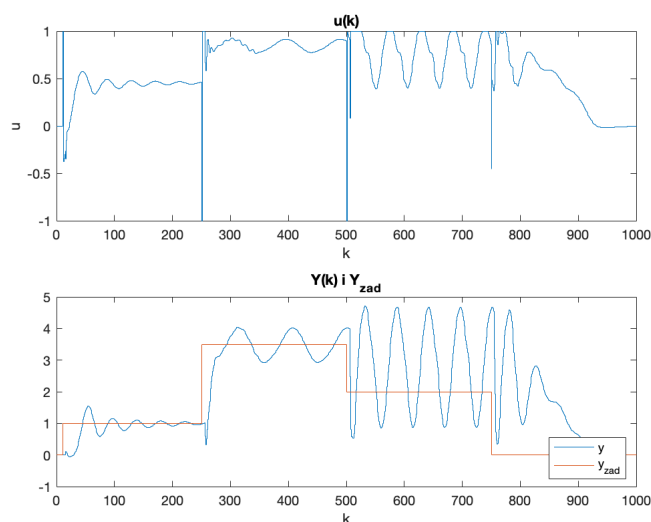
Wskaźnik jakości regulacji  $E = 246,4657$

— Dla pięciu regulatorów

$$K_1 = -0.172946 \quad K_2 = -0.027008 \quad K_3 = -0.018484 \quad K_4 = -0.131081 \quad K_5 = 0.191360$$

$$T_{i1} = -2.055129 \quad T_{i2} = -3.995364 \quad T_{i3} = -10.214840 \quad T_{i4} = -4.333814 \quad T_{i5} = 8.028027$$

$$T_{d1} = -4.981247 \quad T_{d2} = 26.380217 \quad T_{d3} = 15.489054 \quad T_{i4} = -6.294312 \quad T_{i5} = 0.769607$$



Rys. 1.12. Przebiegi dla rozmytego regulatora PID. Liczba regulatorów = 5

Wskaźnik jakości regulacji  $E = 1,6366e + 03$

Jakość regulacji była najlepsza w przypadku regulatora rozmytego z czterema regulatorami lokalnymi. Wraz ze wzrostem ilości regulatorów lokalnych rosła jakość regulacji, jednak coraz trudniejsze stawało się również odpowiednie dobranie parametrów regulatorów, przez co regulator z pięcioma regulatorami lokalnymi charakteryzuje się najgorszą jakością regulacji.

### 1.5. Rozmyty algorytm DMC

Następnie zaimplementowano algorytm rozmytego regulatora DMC dla różnej liczby regulatorów lokalnych (2, 3, lub 4). Dla każdego regulatora z inną liczbą regulatorów lokalnych dobrano parametry oddzielnie.

Zestaw liczb  $s_1, s_2, s_3, \dots$  obliczany jest oddzielnie dla każdego z regulatorów lokalnych poprzez wykorzystanie funkcji `licz_s.m`.

```
function s=licz_s(u1, u2)
    y_temp = wynik_y(u1);
    Y=zeros(1,200);
    U=zeros(1,200);
    Y(1:15)=y_temp;
    U(1:10)=u1;
    U(11:200)=u2;

    for k=7:1:200
        Y(k)=symulacja_obiektu2y_p3(U(k-5),U(k-6),Y(k-1),Y(k-2));
    end
    for j=1:1:190
        s(j)=(Y(j+10)-y_temp)/(u2-u1);
    end
end
```

Przyjmuje ona jako parametry wartości  $u1$  i  $u2$ . Parametr  $u1$  przekazywany jest następnie funkcji `wynik_y`, która przeprowadza symulację dla wartości sterowania  $u = u1$  i zwraca ostatnią wartość odpowiedzi skokową  $y\_temp$ .

```
function y = wynik_y(u)
    U_sym(1:200)=u;
    Y_sym(1:200)=0;
    for k=7:200
        Y_sym(k)=symulacja_obiektu2y_p3(U_sym(k-5),U_sym(k-6),
        Y_sym(k-1),Y_sym(k-2));
    end
    y=Y_sym(200);
end
```

Wartość ta została następnie wykorzystana do przeprowadzenia kolejnej symulacji, dla skoku wartości sterowania z  $u1$  do  $u2$ . Otrzymana odpowiedź skokowa została przeskalowana, w celu wyliczenia zestawu liczb  $s_1, s_2, s_3, \dots$ . Przekształcenie to przebiegło zgodnie ze wzorem 1.1, gdzie  $Y_{pp} = y\_temp$ . Zamiast  $Y_i$  użyto  $Y_{i+10}$ , ponieważ zmiana wartości sterowania z  $u1$  na  $u2$  wystąpiła w chwili  $k = 10$ .

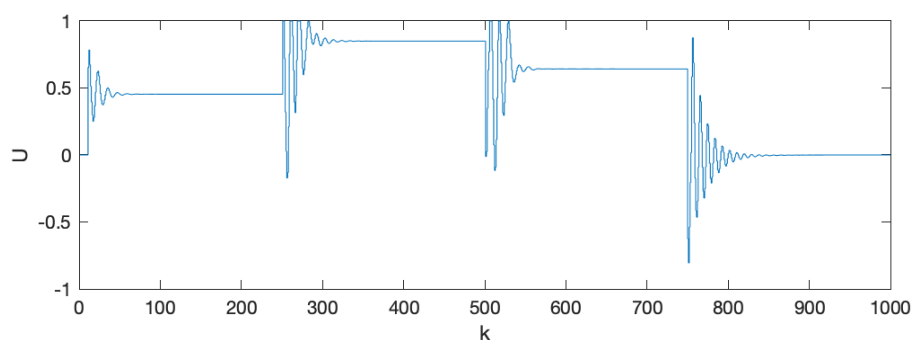
$$S_i = \frac{Y_{i+10} - Y_{pp}}{\Delta U}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (1.1)$$

Po otrzymaniu przekształconych odpowiedzi skokowych dla każdego z regulatorów lokalnych przystąpiono do liczenia macierzy  $M, M^P i K$ . Wartości horyzontów dynamiki  $D$  zostały dobrane oddzielnie dla każdego z regulatorów. Dla ułatwienia przyjęto, że  $N = N_u = D$ .  $\lambda = 1$  w przypadku każdego regulatora.

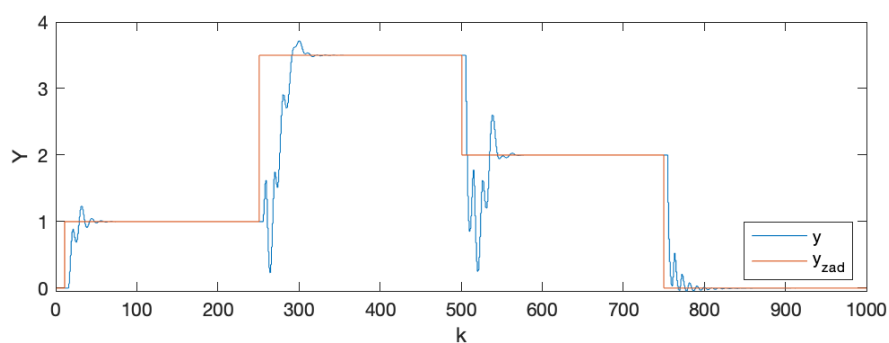
Współczynniki przynależności (wagi) każdego z regulatorów obliczone zostały w funkcji rozkład. Wykorzystana została funkcja przynależności dzwonowej `gbellmf`.



Regulator przetestowano dla kilku skoków wartości zadanej  $y_{zad}$ . Przebiegi dla różnej ilości regulatorów lokalnych, przy wartości parametru  $\lambda = 1$  przedstawiono poniżej.

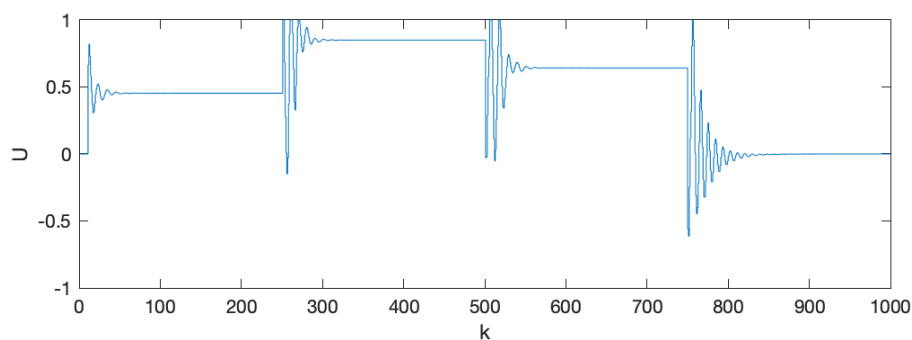


Rys. 1.13. Wartość sterowania  $u$  dla rozmytego regulatora DMC przy  $\lambda = 1$ . Liczba regulatorów = 2

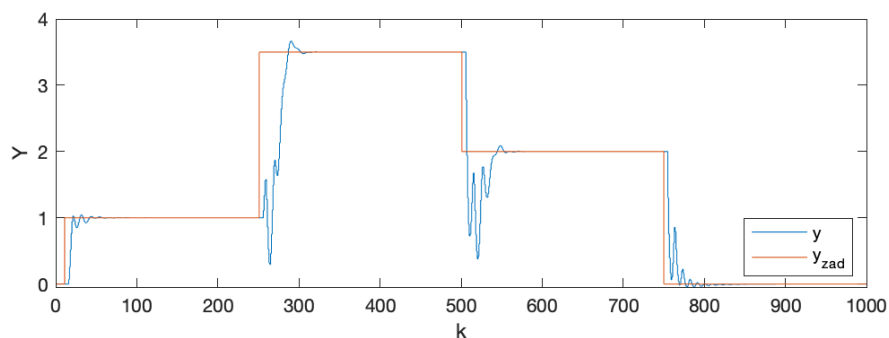


Rys. 1.14. Sygnał wyjściowy  $y$  dla rozmytego regulatora DMC przy  $\lambda = 1$ . Liczba regulatorów = 2

Dla dwóch regulatorów lokalnych wskaźnik jakości regulacji wyniósł  $E = 221,4943$ .

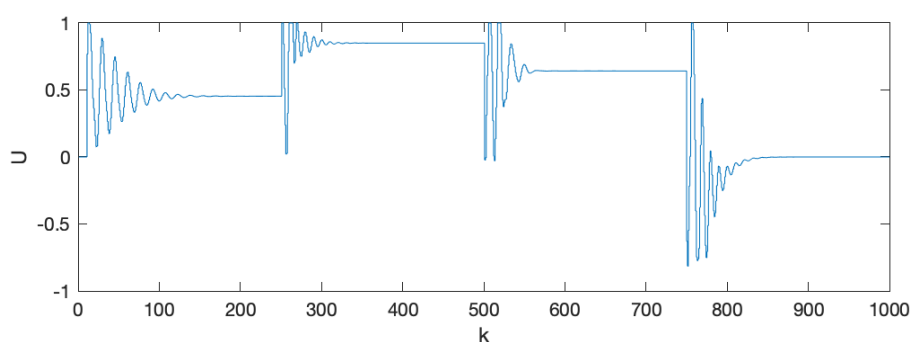


Rys. 1.15. Wartość sterowania  $u$  dla rozmytego regulatora DMC przy  $\lambda = 1$ . Liczba regulatorów = 3

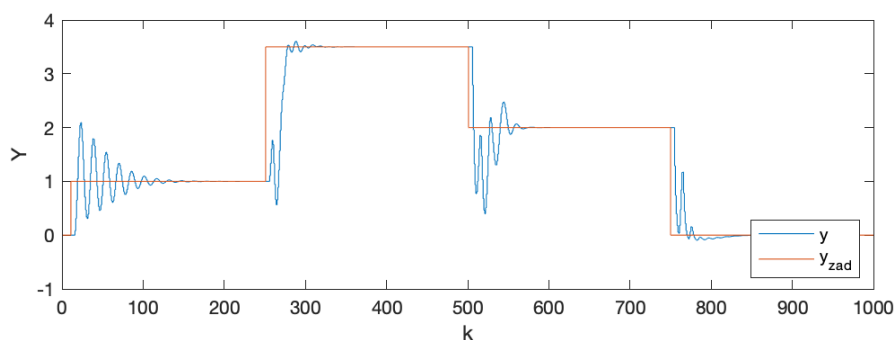


Rys. 1.16. Sygnał wyjściowy  $y$  dla rozmytego regulatora DMC przy  $\lambda = 1$ . Liczba regulatorów = 3

Dla trzech regulatorów lokalnych wskaźnik jakości regulacji wyniósł  $E = 210,3070$ .



Rys. 1.17. Wartość sterowania  $u$  dla rozmytego regulatora DMC przy  $\lambda = 1$ . Liczba regulatorów = 4



Rys. 1.18. Sygnał wyjściowy  $y$  dla rozmytego regulatora DMC przy  $\lambda = 1$ . Liczba regulatorów = 4

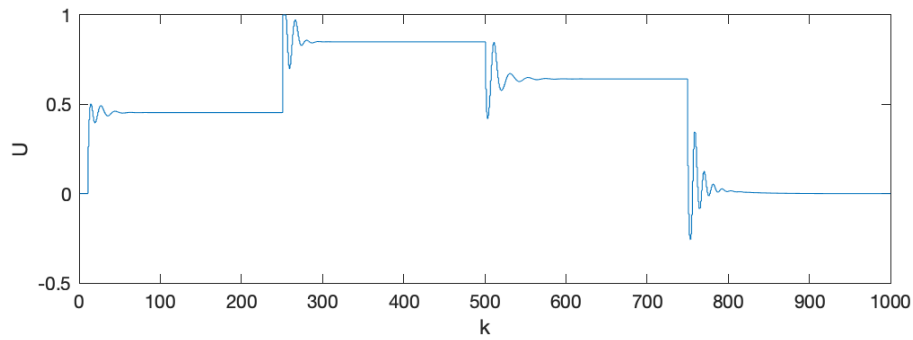
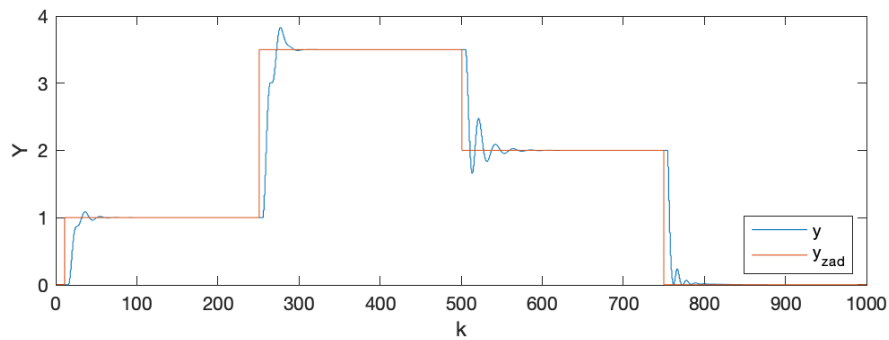
Dla czterech regulatorów lokalnych wskaźnik jakości regulacji wyniósł  $E = 191,2044$

Następnie dobrano wartości parametrów  $\lambda$  dla każdego z regulatorów metodą eksperymentalną.

Otrzymano następujące nastawy i przebiegi

— Dla dwóch regulatorów:

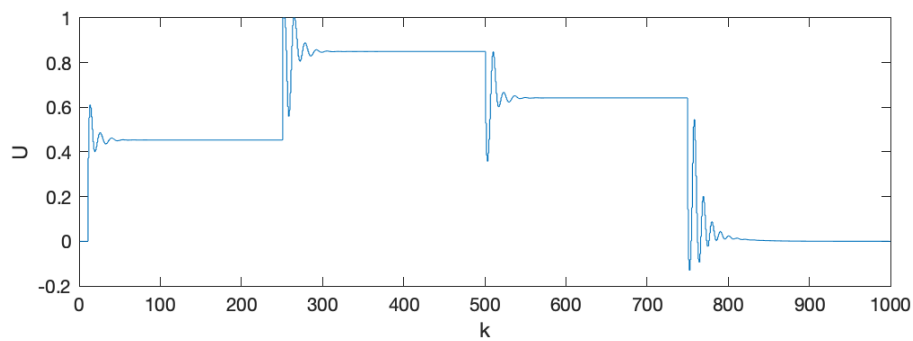
$$\lambda_1 = 9.3 \quad \lambda_2 = 21.2$$

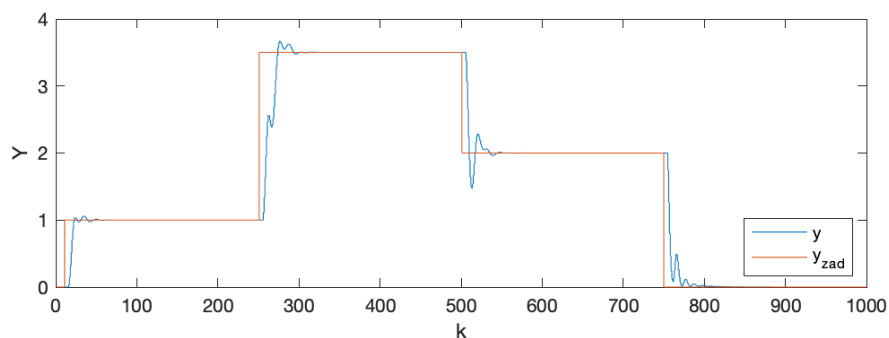
Rys. 1.19. Wartość sterowania  $u$  dla rozmytego regulatora DMC. Liczba regulatorów = 2Rys. 1.20. Sygnał wyjściowy  $y$  dla rozmytego regulatora DMC. Liczba regulatorów = 2

Wskaźnik jakości regulacji  $E = 103,9025$

— Dla trzech regulatorów

$$\lambda_1 = 4.1 \quad \lambda_2 = 9.5 \quad \lambda_3 = 17$$

Rys. 1.21. Wartość sterowania  $u$  dla rozmytego regulatora DMC. Liczba regulatorów = 3

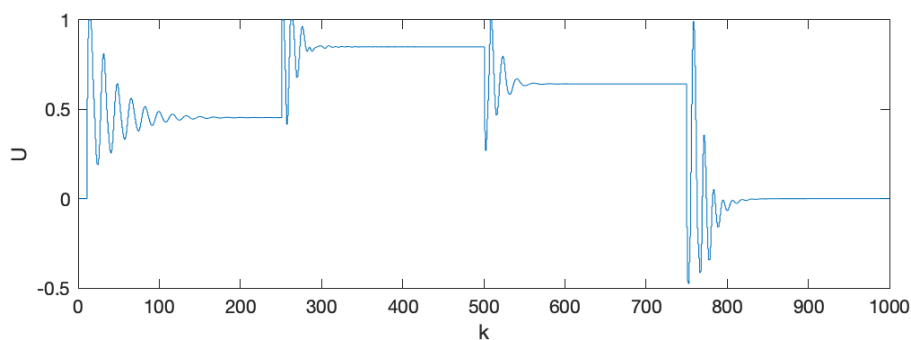


Rys. 1.22. Sygnał wyjściowy  $y$  dla rozmytego regulatora DMC. Liczba regulatorów = 3

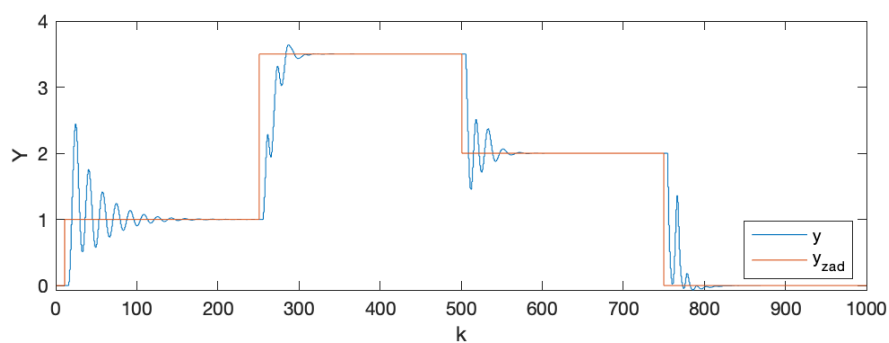
Wskaźnik jakości regulacji  $E = 109,2374$

— Dla czterech regulatorów

$\lambda_1 = 2.1$   $\lambda_2 = 2.2$   $\lambda_3 = 7.2$   $\lambda_4 = 1.1$



Rys. 1.23. Wartość sterowania  $u$  dla rozmytego regulatora DMC. Liczba regulatorów = 4



Rys. 1.24. Sygnał wyjściowy  $y$  dla rozmytego regulatora DMC. Liczba regulatorów = 4

Wskaźnik jakości regulacji  $E = 136,2552$

Wraz ze wzrostem ilości regulatorów lokalnych w regulatorze rozmytym, rosła jakość regulacji. Wskaźnik jakości regulacji  $E$  był coraz mniejszy, zauważalne były również coraz mniejsze oscylacje.

## 2. Ćwiczenie laboratoryjne

Podczas tego zadania laboratoryjnego wykorzystano:

- grzałkę G1 (sygnał sterujący  $U$ ),
- wentylator W1 (wartość zadana  $Y_{zad}$ ),
- czujnik temperatury T1 (sygnał wyjściowy  $Y$ )

### 2.1. Przygotowanie do wykonania ćwiczenia

Przed rozpoczęciem pomiarów sprawdzono możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem. Punkt pracy grzałki G1 dla zespołu obliczony został wg. wzoru 2.1:

$$G1 = 25 + Z \quad (2.1)$$

gdzie Z to numer zespołu, zatem dla grupy Z02 punkt pracy wynosi:

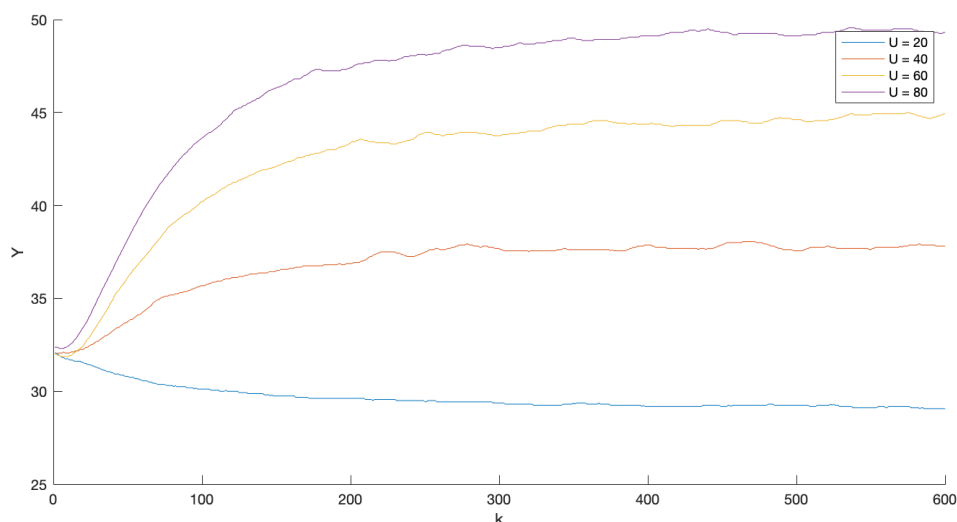
$$G1 = 25 + 2 = 27 \quad (2.2)$$

Następnie określono wartość pomiaru temperatury T1 dla obliczonego punktu pracy. W tym celu moc wentylatora W1 ustawiono na 50% za pomocą funkcji `sendControls(1, W1)`. Wartości mocy grzałki zadawane są poprzez funkcję `sendNonlinearControls(G1)`. Wartość G1 została ustawiona na 27%. Temperaturę odczytano korzystając z funkcji `readMeasurements(1)`. Temperatura T1 ustabilizowała się na wartości **31,81°C**

### 2.2. Przebiegi sygnałów wyjściowych

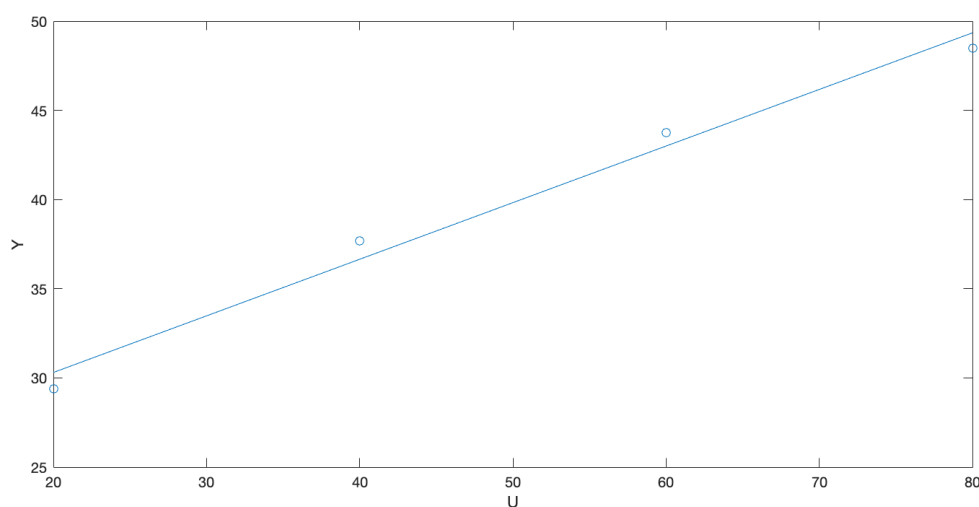
Do realizacji zadania wykorzystano podstawowy plik do komunikacji ze stanowiskiem grzejąco - chłodzącym `MinimalWorkingExample.m`.

Zarejestrowano przebieg temperatury T1 dla trzech różnych zmian wartości sterowania G1, rozpoczynając z punktu pracy 27 do kolejno 20, 40, 60 i 80. Otrzymane przebiegi zmian przedstawiono na Rys. 2.1.



Rys. 2.1. Odpowiedź układu na wartości sterowania: 20, 40, 60 i 80

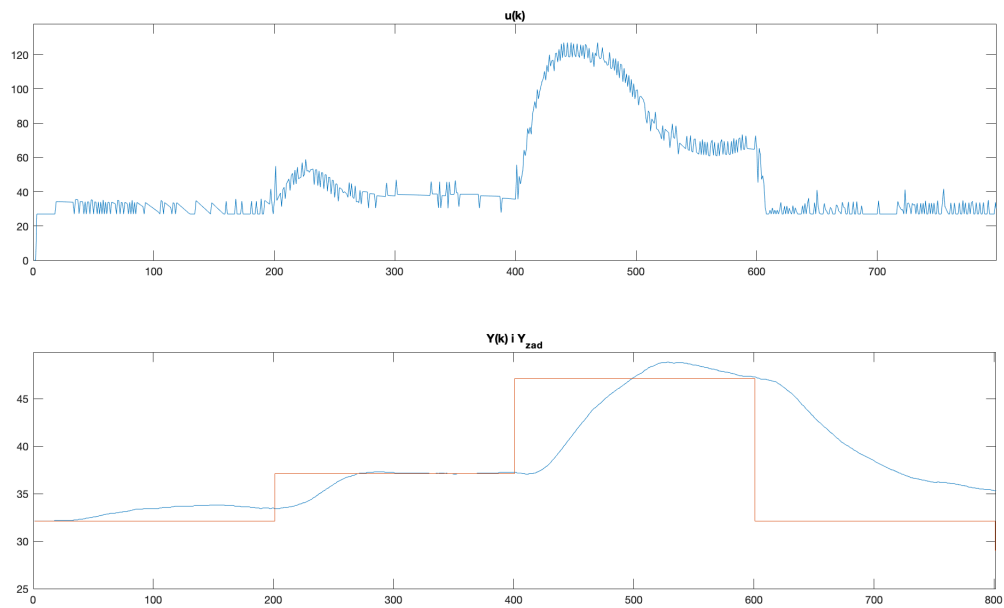
Punkty charakterystyki statycznej  $Y(U)$  odbiegają lekko od dopasowanej prostej (Rys. 2.2). Oznacza to, że właściwości statyczne obiektu są minimalnie nieliniowe.



Rys. 2.2. Charakterystyka statyczna obiektu

## 2.3. Regulator PID z laboratorium 1

Następnie przetestowano regulatory z laboratorium 1, w celu porównania ich zaimplementowanymi później regulatorami rozmytymi. Testy przeprowadzone zostały dla trajektorii zmian sygnału zadanego  $y_{zad}$ :  $T_{pp}$ ,  $T_{pp} + 5$ ,  $T_{pp} + 15$ ,  $T_{pp}$ . Dla wartości punktu pracy  $T_{pp} = T1 = 31,81$  zmiany te wynosiły kolejno:  $y_{zad} = 31,81$ ,  $y_{zad} = 36,81$ ,  $y_{zad} = 46,81$ ,  $y_{zad} = 31,81$ . Przebiegi przedstawione zostały na Rys. 2.3. Implementacja algorytmu dla regulatora PID znajduje się w pliku `zad3_PID.mat`.

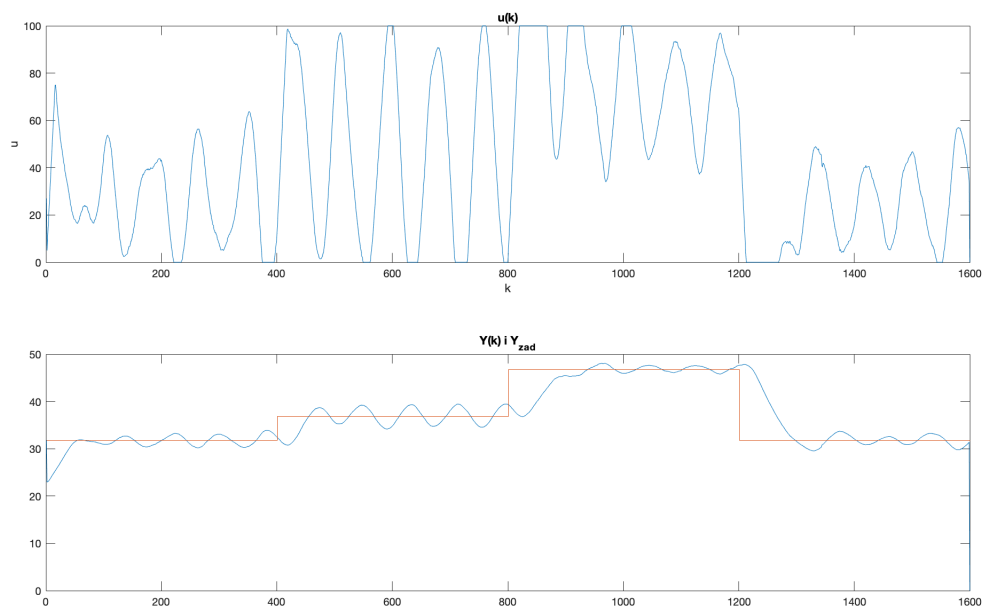


Rys. 2.3. Odpowiedź układu przy regulacji regulatorem PID z laboratorium 1

Wskaźnik jakości wyniósł  $E = 24241$

## 2.4. Regulator DMC z laboratorium 1

Analogicznie przetestowany został regulator DMC z laboratorium 1. Testy przeprowadzono dla tej samej trajektorii zmian sygnału zadanego. Przebiegi widoczne są na Rys. 2.4. Implementacja algorytmu dla regulatora DMC znajduje się w pliku `zad3.DMC.mat`.



Rys. 2.4. Odpowiedź układu przy regulacji regulatorem DMC z laboratorium 1

Wartość wskaźnika jakości regulacji wyniosła  $E = 19511$

## 2.5. Rozmyty algorytm PID

Zespół nie zdążył zaimplementować algorytmu realizującego regulację PID w czasie trwania laboratorium.

Jeśli dostępne byłoby więcej czasu, algorytm rozmytego regulatora PID zaimplementowany zostałby analogicznie do rozmytego regulatora PID z części projektowej. Dla każdego z trzech regulatorów lokalnych zostałyby dobrane oddzielne nastawy metodą eksperymentalną, tak by zapewnić najlepszą jakość regulacji. Do wyliczenia współczynników przynależności każdego z regulatorów użyta zostałaby funkcja przynależności dzwonowej `gbellmf`.

## 2.6. Rozmyty algorytm DMC

Zaimplementowany został algorytm rozmytego regulatora DMC.

Rozpoczęto od wyznaczenia zestawów liczb  $s_1, s_2, s_3, \dots$  dla każdego z trzech regulatorów. Zestawy te wyznaczone zostały poprzez przekształcenie odpowiedzi skokowych dla wartości sterowania  $u = 20$ ,  $u = 40$  i  $u = 80$  przedstawionych na Rys. 2.1. Przekształcenie to przebiegło zgodnie ze wzorem 2.3.

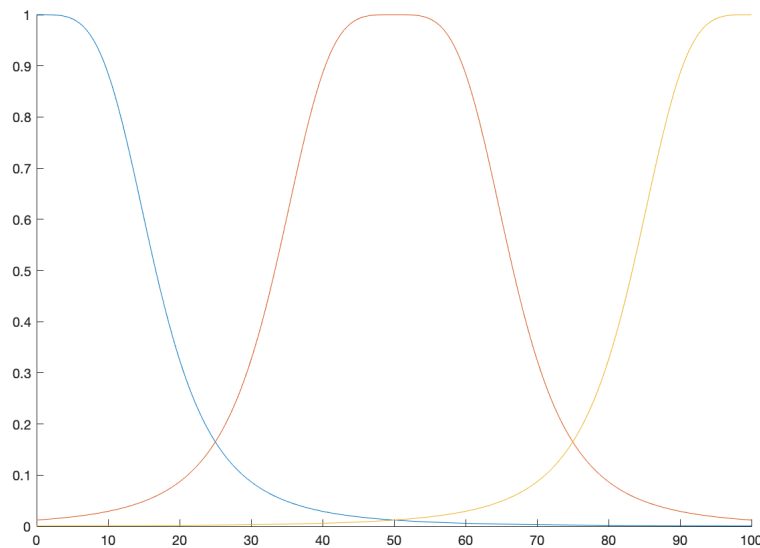
$$S_i = \frac{S_i^0 - Y_{pp}}{\Delta U}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

Z przebiegów nieprzekształconej odpowiedzi skokowej odczytano pierwsze i ostatnie skoki sygnału wyjściowego, które wykorzystano do obliczenia horyzontu dynamiki  $D$ . Wszelkie obliczenia wykonane zostały w programie MATLAB w pliku `zad4_s.m`.

Otrzymano zatem trzy zestawy liczb  $s_1, s_2, s_3, \dots$ , oraz trzy wartości horyzontów dynamiki  $D$  - po jednym na każdy z regulatorów:  $D_1 = 252$ ,  $D_2 = 289$ ,  $D_3 = 276$ .

Wartości te wykorzystane zostały do obliczeń w algorytmie DMC. Macierze  $M$ ,  $M^P$  i  $K$  obliczone zostały oddzielnie dla każdego z regulatorów. Następnie wyliczono wagi (współczynniki przynależności) dla każdego z regulatorów, korzystając z funkcji przynależności dzwonowej `gbellmf` w programie MATLAB. Użyte w naszym algorytmie funkcje przynależności przedstawione zostały na Rys. 2.5





Rys. 2.5. Funkcje przynależności

Wartość sygnału sterowania została wyliczona oddzielnie dla każdego z regulatorów zgodnie ze wzorem 2.4.

$$u^R(k) = K^R(Y^{zad}(k) - Y(k) - M^{P,r} \Delta u^P(k)) \quad (2.4)$$

jeżeli  $u(k-1) \in U_2$ ,

i gdzie R to numer regulatora

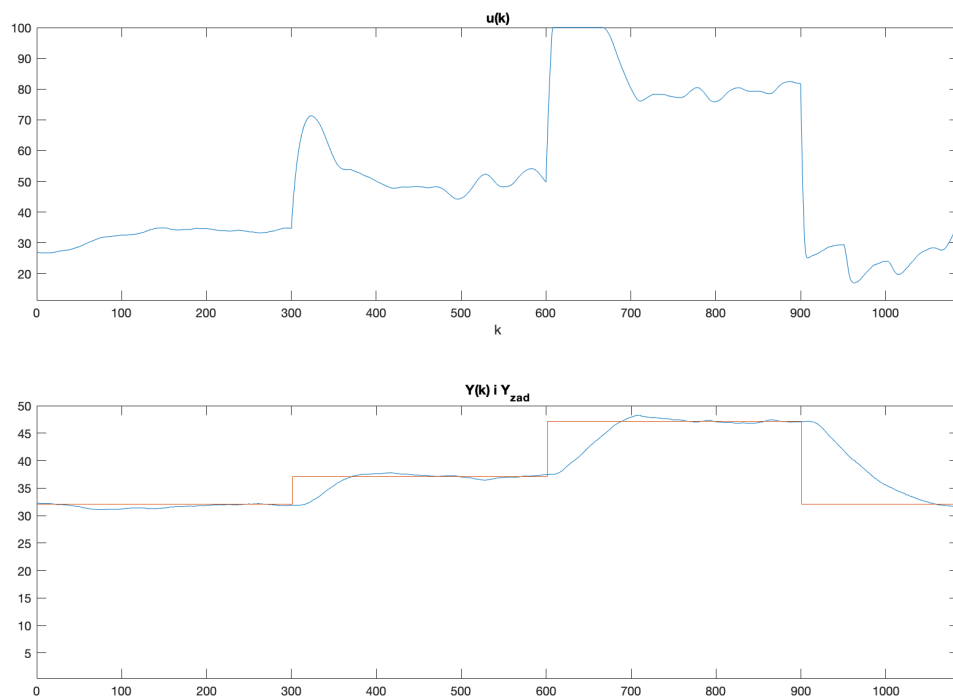
Poszczególne wartości sygnału sterowania  $u^R(k)$  dla każdego z regulatorów wykorzystane zostały do obliczenia całościowej wartości  $u(k)$  według wzoru 2.5.

$$u(k) = \frac{\sum w^i(k) u^i(k)}{\sum w^i(k)} \quad (2.5)$$

Implementacja algorytmu znajduje się w pliku `zad4_1.m`

Horyzont sterowania  $D$  dla regulatora DMC został dobrany poprzez wybranie największego z obliczonych wyżej horyzontów dynamiki dla każdego z regulatorów. W tym przypadku jego wartość wynosi  $D = 289$ . Zgodnie z treścią zadania laboratoryjnego pozostałe parametrom regulatora przypisano wartości  $N_u = N = D = 289$  i  $\lambda = 1$ .

Regulator przetestowano dla tej samej trajektorii co regulatory z laboratorium 1:  $y_{zad}$ :  $T_{pp}, T_{pp} + 5, T_{pp} + 15, T_{pp}$ . Wyniki przedstawione zostały na Rys. 2.6



Rys. 2.6. Przebiegi dla regulatora rozmytego DMC

Wartość wskaźnika jakości regulacji wyniosła  $E = 15709$ . Regulator rozmyty wykazuje się zatem lepszą jakością regulacji niż regulator DMC w najprostszej wersji analitycznej z laboratorium 1.