

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)**

**Sprawozdanie z projektu nr 4, zadanie nr 5**

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

**Warszawa, 2017**

# Spis treści

<b>1. Opis obiektu</b>	2
<b>2. Punkt pracy</b>	3
<b>3. Badanie zachowania obiektu</b>	4
3.1. Odpowiedzi skokowe	4
3.2. Charakterystyka statyczna	5
3.3. Charakterystyka dynamiczna	5
<b>4. Regulatory PID i DMC</b>	7
4.1. Regulator PID	7
4.2. Regulator DMC	11
<b>5. Rozmyte regulatory PID i DMC</b>	16
5.1. 2 regulatory lokalne	16
5.1.1. PID	17
5.1.2. DMC	18
5.2. 3 regulatory lokalne	18
5.2.1. PID	20
5.2.2. DMC	21
5.3. 4 regulatory lokalne	21
5.3.1. PID	23
5.3.2. DMC	25
5.4. 5 regulatory lokalne	25
5.4.1. PID	27
5.4.2. DMC	29

# 1. Opis obiektu

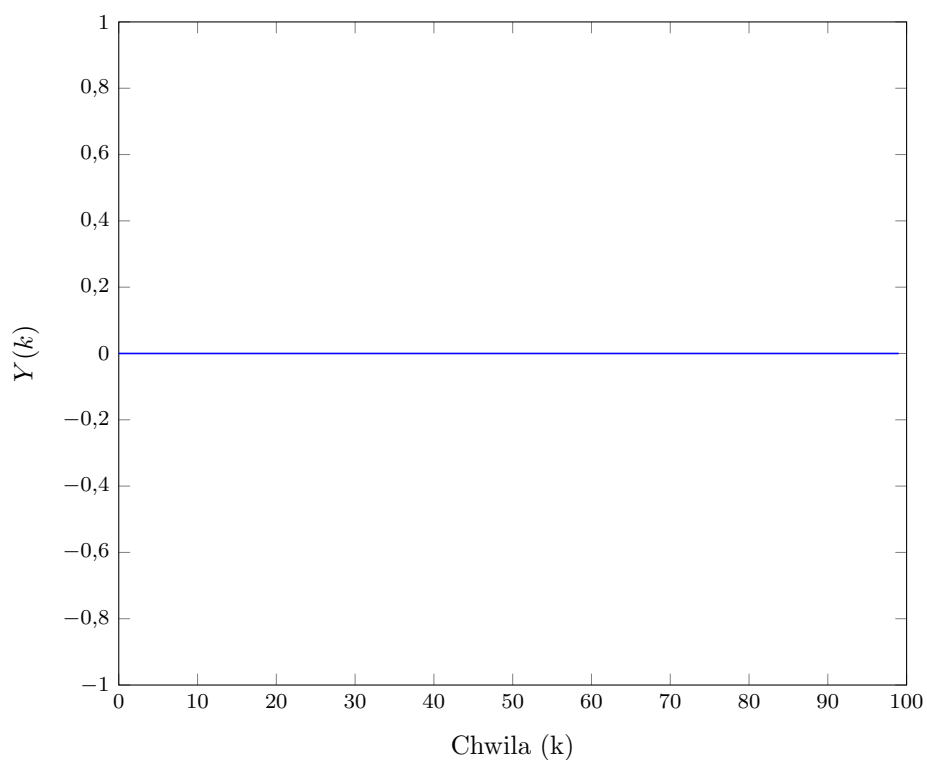
Obiekt używany w projekcie jest symulacją obiektu, napisaną w języku MATLAB. Opisywany jest on wzorem

$$Y(k) = f(U(k-5), U(k-6), Y(k-1), Y(k-2)) \quad (1.1)$$

gdzie  $k$  jest aktualną chwilą symulacji. Punkt pracy obiektu jest osiągany dla wartości sterowania równej 0, natomiast wyjście w owym punkcie ustala się na wartości 0. Okres próbkowania obiektu wynosi 0,5s.

## 2. Punkt pracy

Wartości punktu pracy opisane w sekcji 1 zostały zweryfikowane. Weryfikacja polegała na prostym sprawdzeniu na jakiej wartości wyjścia stabilizuje się obiekt przy zadanym sterowaniu. Eksperyment potwierdził wcześniej opisane wartości, a jego przebieg obrazuje wykres 2.1

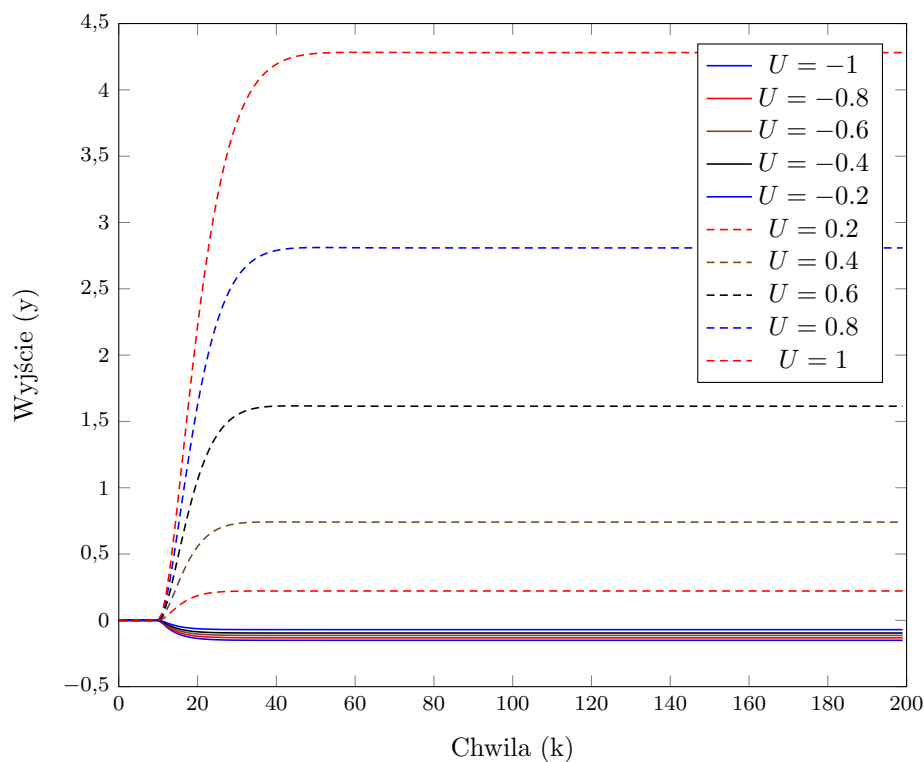


Rys. 2.1. Wyjście obiektu dla sterowania  $U = 0$ .

### 3. Badanie zachowania obiektu

#### 3.1. Odpowiedzi skokowe

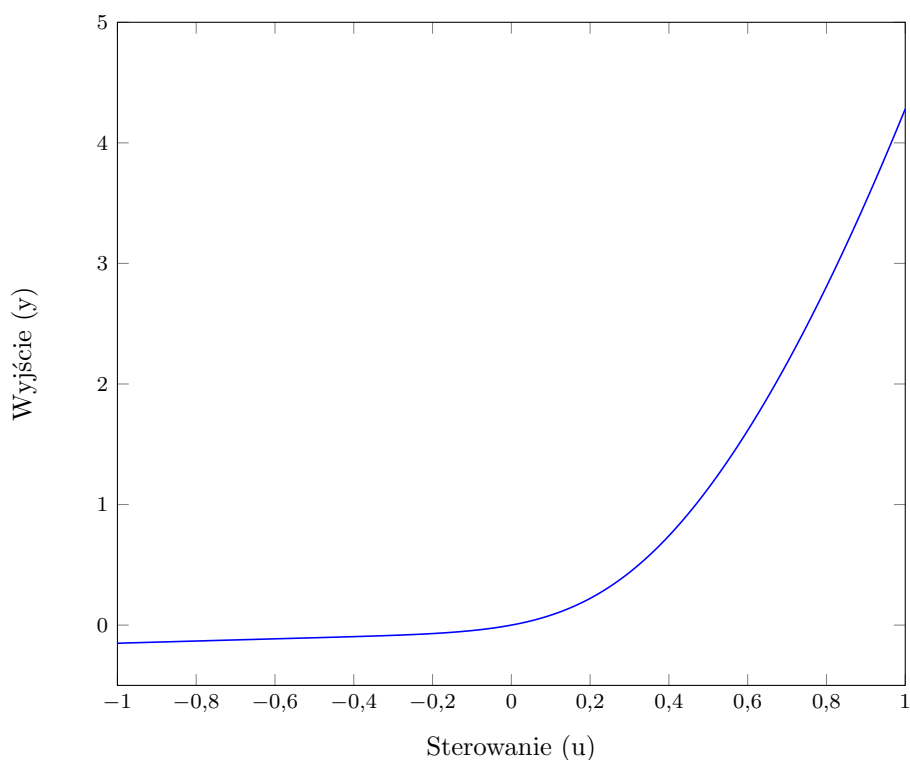
Aby lepiej poznać naturę obiektu przeprowadzone zostały ogólne badania zachowania obiektu i jego odpowiedzi na różne skoki wartości sterującej. Eksperyment zakładał, iż na początku obiekt będzie w punkcie pracy ( $Y = 0$ ,  $U = 0$ ), a następnie, w chwili  $k = 7$  wykonany zostanie skok do zaplanowanej wcześniej wartości sterowania. Biorąc pod uwagę ograniczenia na wartość sterowania  $U^{min} = -1$  i  $U^{max} = 1$  wartość sterowania po skoku mieściła się w owym zakresie. Wyniki eksperymentu zostały zobrazowane na wykresie 3.1.



Rys. 3.1. Odpowiedzi skokowe dla różnych wartości sterowania. (Wartość końcowa sterowania w legendzie)

### 3.2. Charakterystyka statyczna

Następnie wyznaczona została charakterystyka statyczna obiektu. Znalaziona została poprzez sprawdzenie przy jakiej wartości wyjścia obiekt stabilizuje się dla danej wartości sterowania. Na podstawie tego sporządzony został wykres. Wyniki zostały zamieszczone na wykresie 3.2.

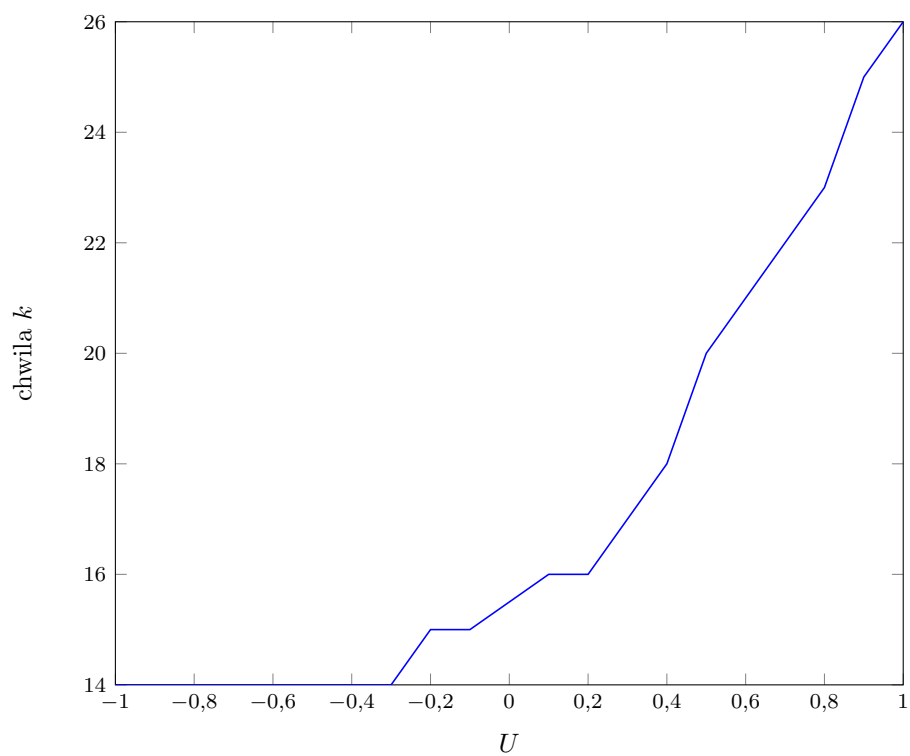


Rys. 3.2. Charakterystyka statyczna obiektu.

Otrzymana charakterystyka przedstawiona na wykresie 3.2 jest nieliniowa. Nie można zatem określić wzmocnienia statycznego. Ponadto należy się spodziewać, że "tradycyjne" regulatory PID i DMC, przystosowane do obiektów liniowych, mogą mieć problemy z prawidłową regulacją.

### 3.3. Charakterystyka dynamiczna

Charakterystyka dynamiczna obiektu wyznaczana jest na podstawie czasu potrzebnego na osiągnięcie co najmniej 90% wartości końcowej wyjścia. Oś odciętych stanowią wartości sterowania, zaś na osi rzędnych wykresu znajdują się chwile  $k$ , w których zostało osiągnięte 90% wartości końcowej wyjścia. Wynik eksperymentu przedstawia wykres 3.3.



Rys. 3.3. Charakterystyka dynamiczna obiektu.

Jak widać na wykresie 3.3, charakterystyka dynamiczna obiektu nie jest liniowa.

## 4. Regulatory PID i DMC

Do wyznaczenia dobrych nastaw regulatorów PID i DMC użyjemy metody eksperymentalnej, starając się zminimalizować błąd regulacji dany wzorem 4.1.

$$E = \sum_{k=1}^{k_{konc}} (y^{zad}(k) - y(k))^2 \quad (4.1)$$

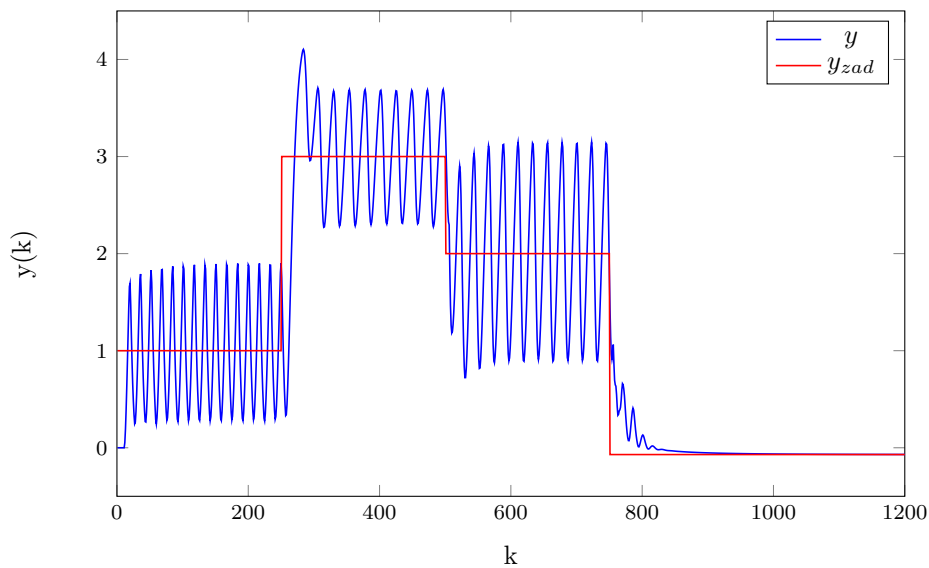
Ponadto jakość regulacji będziemy oceniać optycznie, na podstawie otrzymanych wykresów.

Wartościami zadanymi wykorzystywanymi we wszystkich eksperymentach są kolejno: 1, 3, 2, -0,07.

### 4.1. Regulator PID

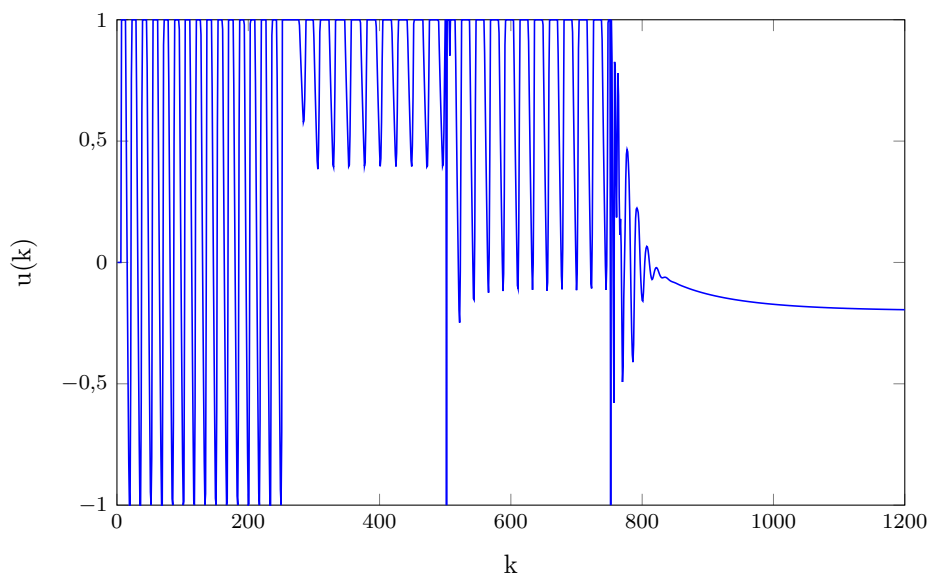
Badania zaczęliśmy od nastaw:

- $K = 1$
- $T_i = 10$
- $T_d = 2$

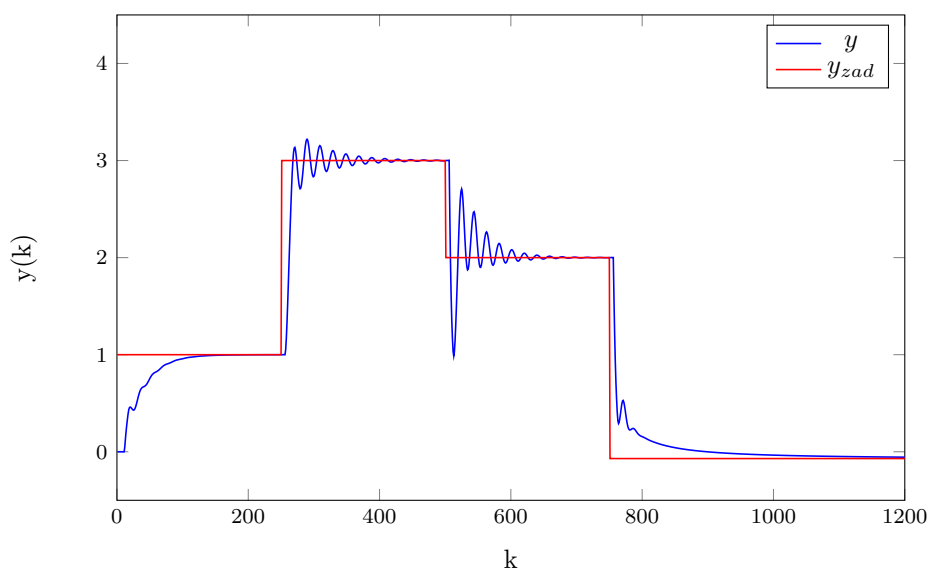


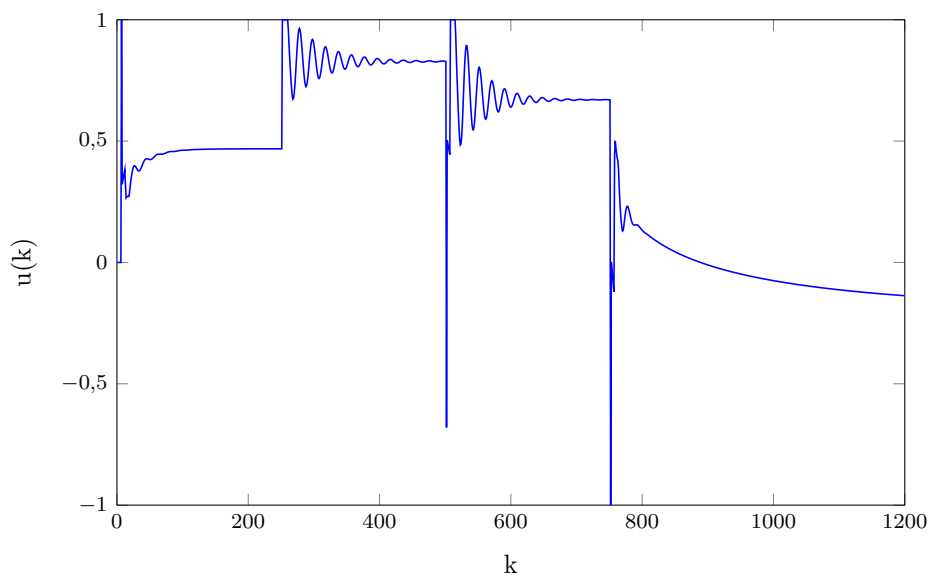
Rys. 4.1. Parametry PID:  $K = 1$ ,  $T_i = 10$ ,  $T_d = 2$



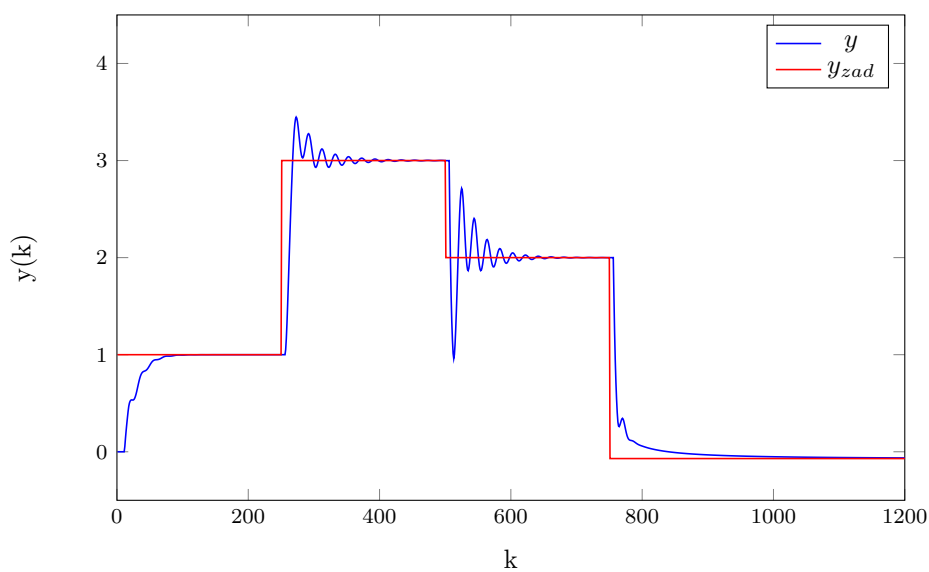
Rys. 4.2. Parametry PID:  $K = 1$ ,  $T_i = 10$ ,  $T_d = 2$ 

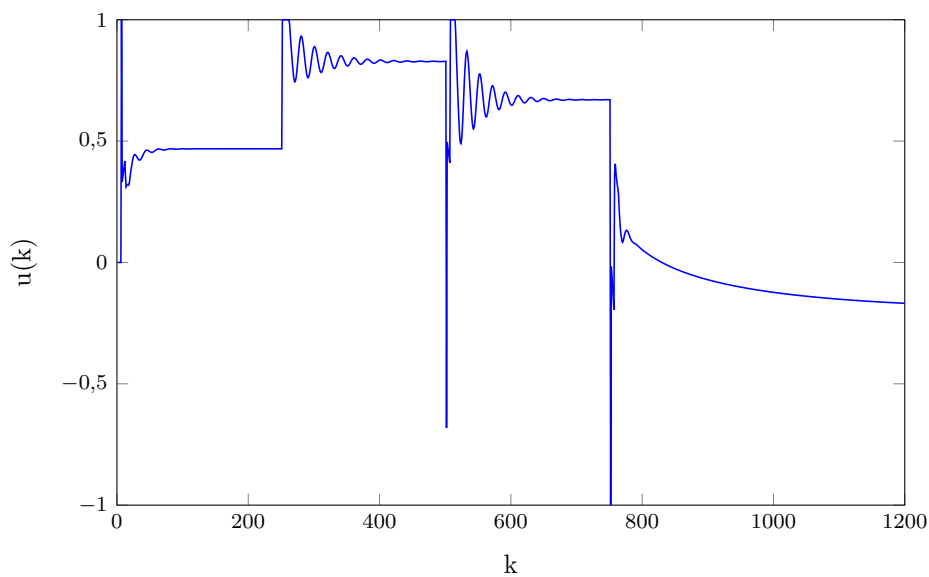
Jak widać na wykresach 4.1 i 4.2, występują silne oscylacje na wyjściu, a sterowanie odbija się od ograniczeń. Błąd regulacji wynosi  $E = 368,0794$ . W tym przypadku zdecydowanie należy zmniejszyć wzmacnienie regulatora. Wykresy 4.3 i 4.4 przedstawiają rezultaty dla wzmacnienia  $K = 0,3$ .

Rys. 4.3. Parametry PID:  $K = 0,3$ ,  $T_i = 10$ ,  $T_d = 2$

Rys. 4.4. Parametry PID:  $K = 0,3$ ,  $T_i = 10$ ,  $T_d = 2$ 

Udało się wyeliminować odbijanie sterowania od ograniczeń, ale nadal występują przeregulowania i gasnące oscylacje. Błąd regulacji wynosi  $E = 114,1445$ , a więc około trzykrotnie mniej niż w poprzednim przypadku. Kolejnym krokiem będzie zwiększenie wpływu całkowania, a więc zmniejszenie parametru  $T_i$ . Testowaną wartością będzie  $T_i = 7$ .

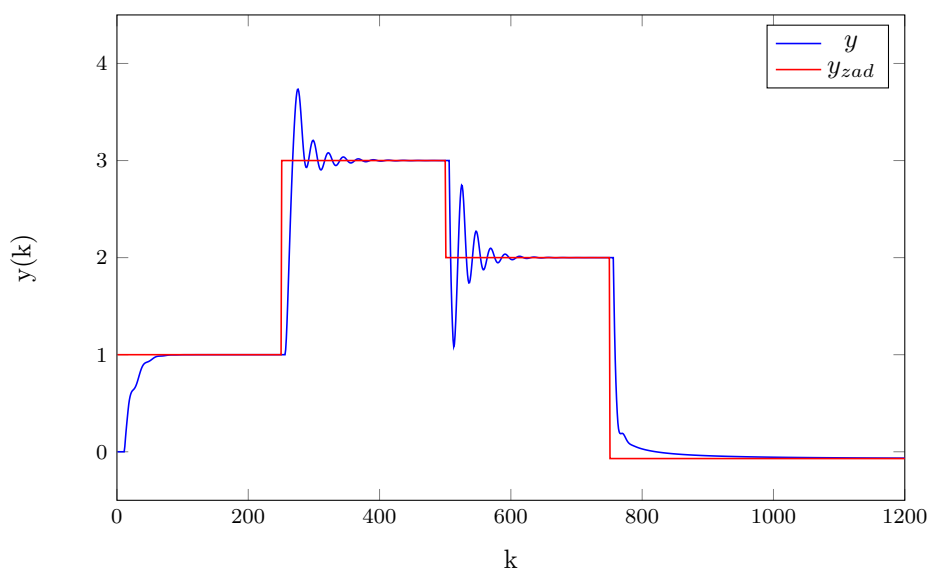
Rys. 4.5. Parametry PID:  $K = 0,3$ ,  $T_i = 7$ ,  $T_d = 2$

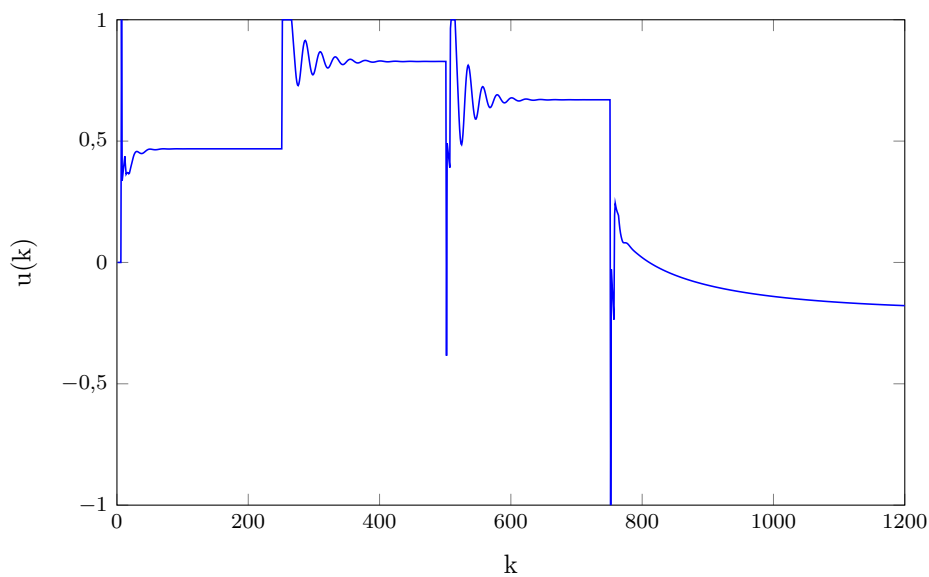
Rys. 4.6. Parametry PID:  $K = 0,3$ ,  $T_i = 7$ ,  $T_d = 2$ 

Różnica w stosunku do poprzednich wartości nie jest znaczna, choć oscylacje gasną nieco szybciej, co można zauważyć na wykresach 4.5 i 4.6. Poprawił się również wskaźnik jakości regulacji, wynoszący teraz  $E = 106,9172$ .

W kolejnej próbie poprawy działania regulatora przetestowane zostaną nastawy:

- $K = 0,3$
- $T_i = 6$
- $T_d = 1,5$

Rys. 4.7. Parametry PID:  $K = 0,3$ ,  $T_i = 6$ ,  $T_d = 1,5$

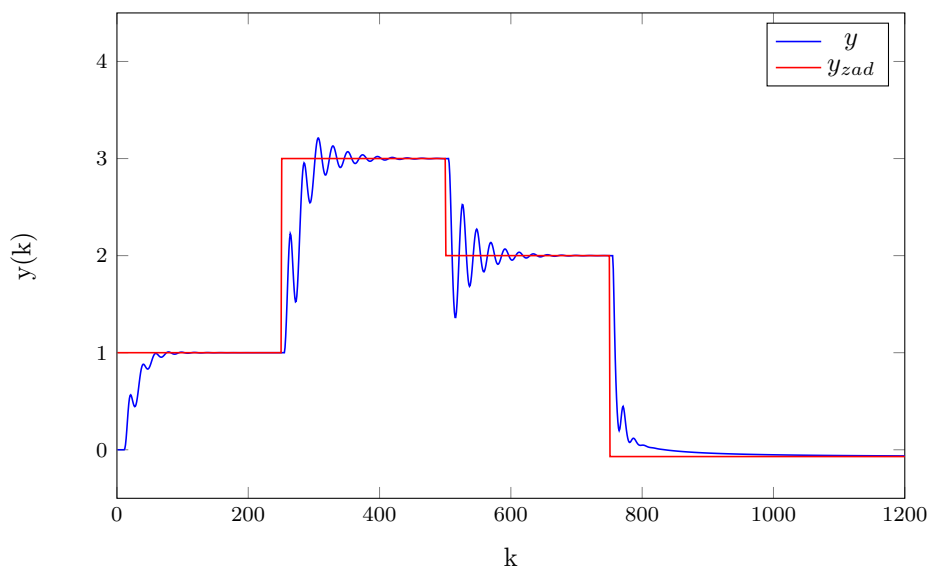
Rys. 4.8. Parametry PID:  $K = 0,3$ ,  $T_i = 6$ ,  $T_d = 1,5$ 

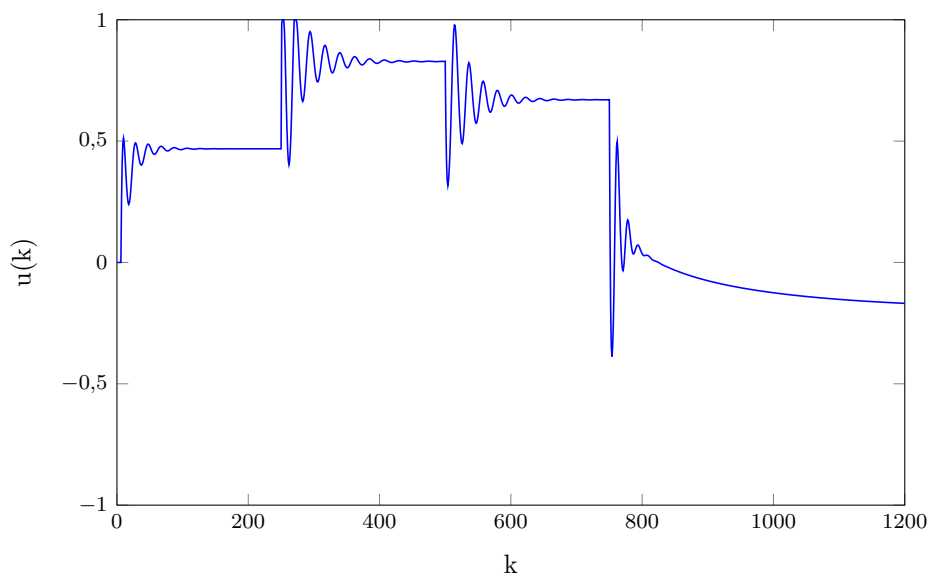
Zmiany na wykresach 4.7 i 4.8 w stosunku do poprzednich przypadków są niewielkie, choć nastąpiła poprawa wskaźnika jakości regulacji, którego wartość wynosi  $E = 105,6223$ .

## 4.2. Regulator DMC

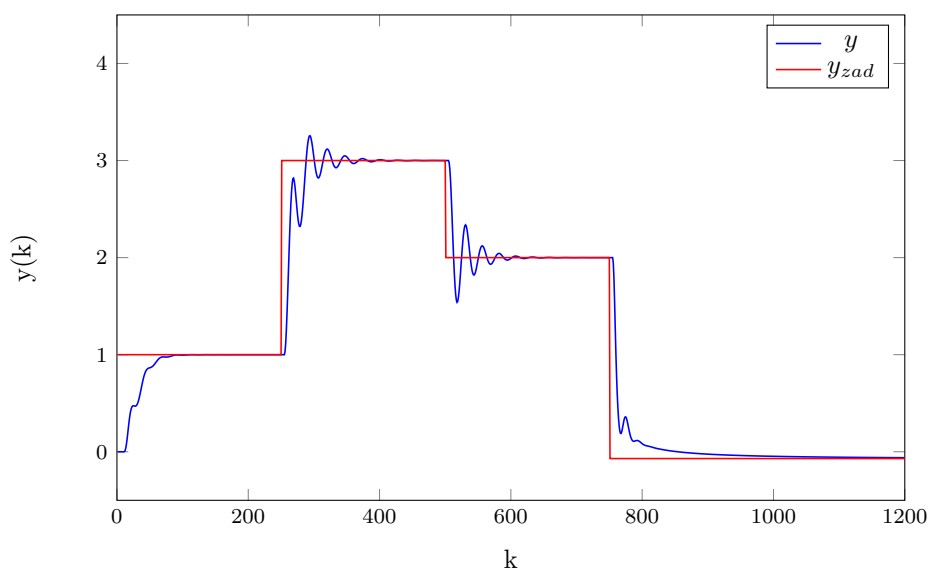
Dobór parametrów DMC metodą eksperymentalną rozpoczęliśmy od parametrów:

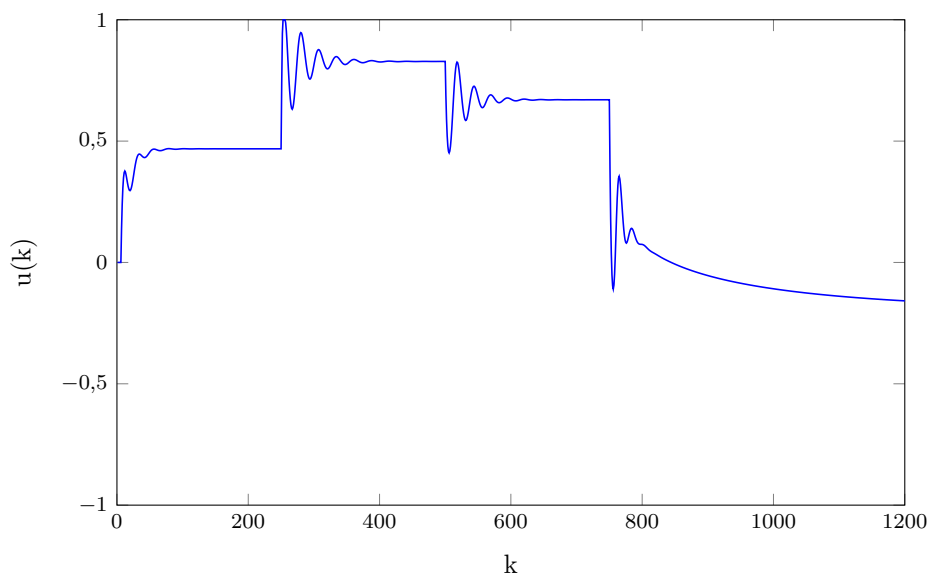
- $N = 50$
- $N_u = 50$
- $\lambda = 10$

Rys. 4.9. Parametry DMC:  $N = 50$ ,  $N_u = 50$ ,  $\lambda = 10$

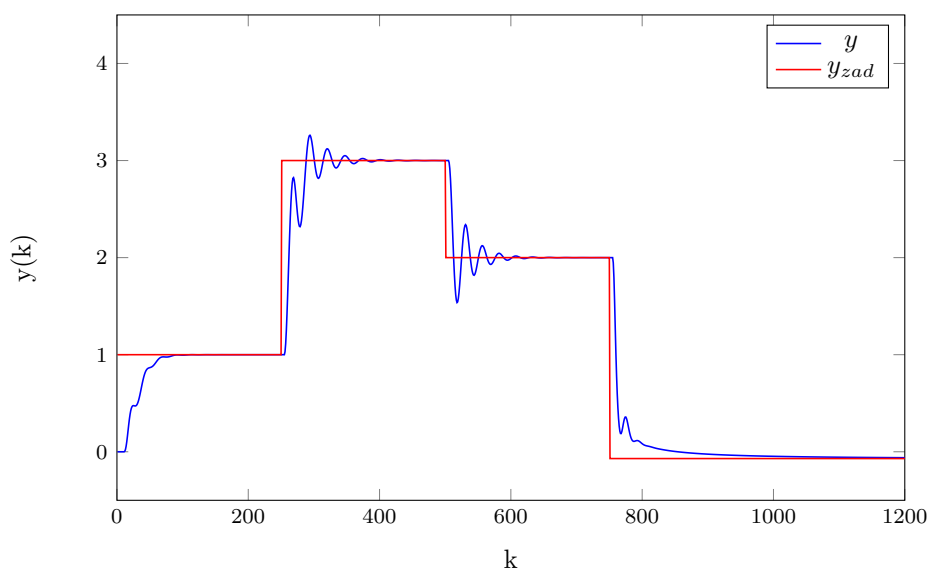
Rys. 4.10. Parametry DMC:  $N = 50$ ,  $N_u = 50$ ,  $\lambda = 10$ 

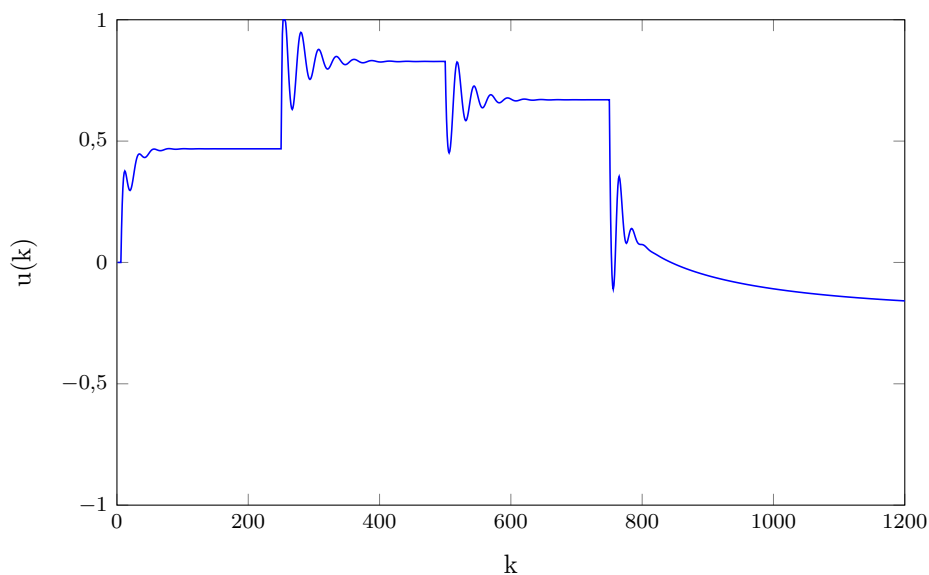
Jak widać na wykresach 4.9 i 4.10 występują przeregulowania i gasnące oscylacje. Wartość błędu regulacji wynosi  $E = 121,2675$ . Należy zwiększyć wartość parametru  $\lambda$ , aby "złagodzić" działanie regulatora.

Rys. 4.11. Parametry DMC:  $N = 50$ ,  $N_u = 50$ ,  $\lambda = 40$

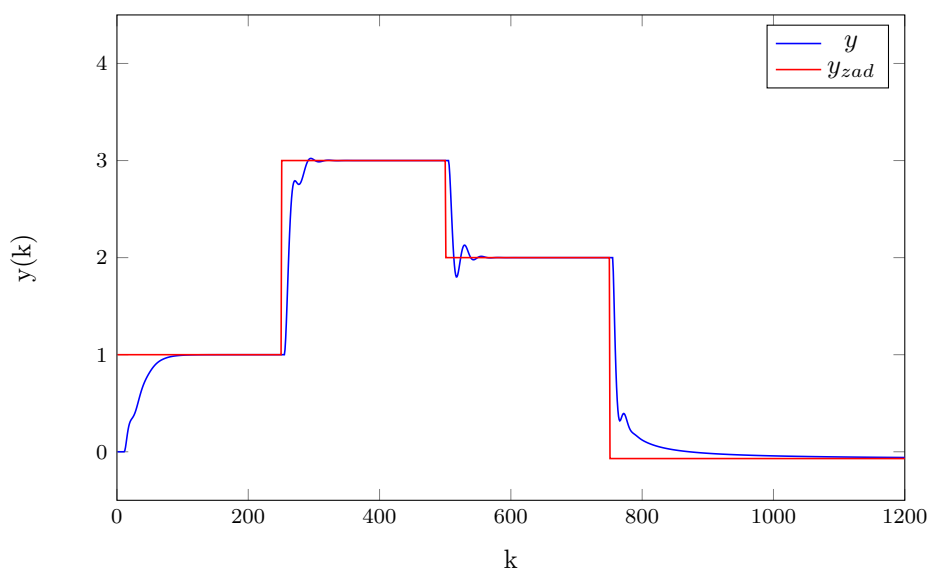
Rys. 4.12. Parametry DMC:  $N = 50$ ,  $N_u = 50$ ,  $\lambda = 40$ 

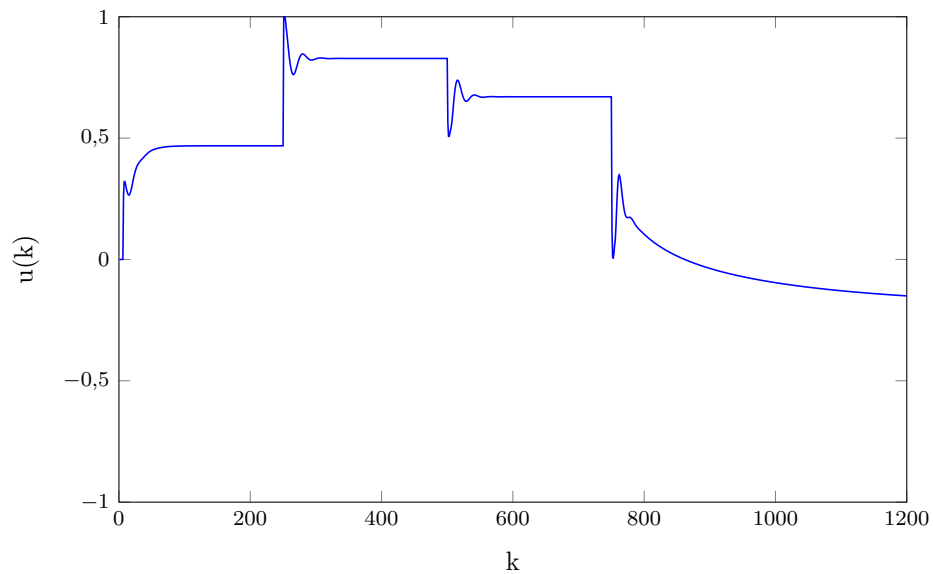
Dla regulatora, którego działanie przedstawiają wykresy 4.11 i 4.12 parametr  $\lambda$  ma wartość 40. Tak duża wartość spowodowała zmniejszenie oscylacji i poprawę wskaźnika wartości regulacji  $E = 110,1876$ . W kolejnych próbach skrócimy horyzonty sterowania i predykcji.

Rys. 4.13. Parametry DMC:  $N = 25$ ,  $N_u = 25$ ,  $\lambda = 40$

Rys. 4.14. Parametry DMC:  $N = 25$ ,  $N_u = 25$ ,  $\lambda = 40$ 

Jak widać na wykresach 4.13 i 4.14, skrócenie horyzontów do wartości  $N = 25$  i  $N_u = 25$  nie przyniosło poprawy jakości sterowania. Błąd regulacji wynosi  $E = 110,3305$ . Jako że obiekt jest nieliniowy, regulator nie ma do dyspozycji prawidłowego modelu w postaci odpowiedzi skokowej dla części zakresów sterowania. Z tego powodu sprawdzimy działanie DMC dla horyzontu sterowania równego  $N_u = 1$ .

Rys. 4.15. Parametry DMC:  $N = 25$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 40$

Rys. 4.16. Parametry DMC:  $N = 25$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 40$ 

Jak widać na wykresach 4.15 i 4.16 zmiana horyzontu sterowania na  $N_u = 1$  przyniosła oczekiwane rezultaty. Niemalże całkowicie zostały wyeliminowane przeregulowania, a wyjście obiektu stabilizuje się szybko. Wskaźnik jakości regulacji wynosi  $E = 102,3977$ , co jest nieco lepszym wynikiem niż dla regulatora PID, którego działanie przedstawiają wykresy 4.7 i 4.8.



## 5. Rozmyte regulatory PID i DMC

Do wyznaczania optymalnych nastaw lokalnych regulatorów PID i DMC użyliśmy dostępnego w Matlabie algorytmu genetycznego, minimalizującego błąd regulacji dany wzorem 5.1.

$$E = \sum_{k=1}^{k_{konc}} (y^{zad}(k) - y(k))^2 \quad (5.1)$$

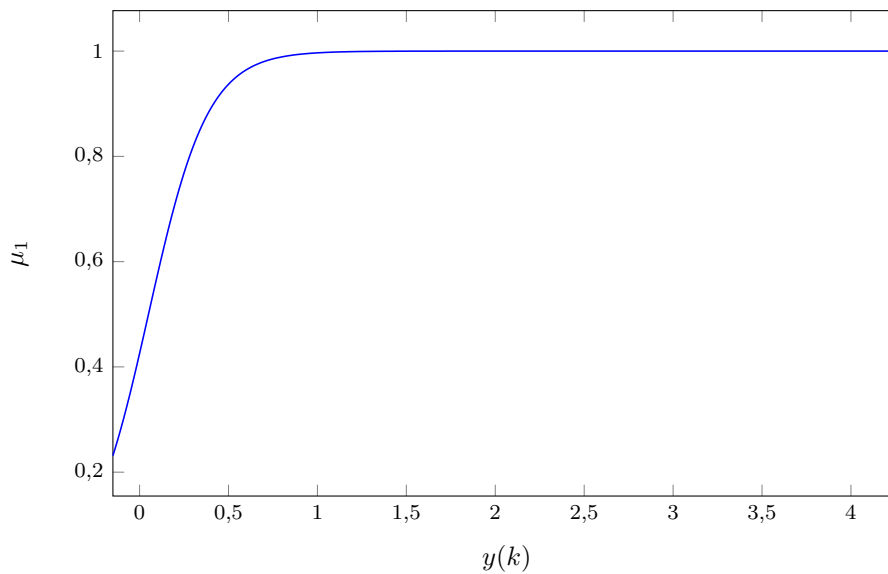
Ponadto jakość regulacji będziemy oceniać optycznie, na podstawie otrzymanych wykresów. Wartościami zadanymi wykorzystywanymi we wszystkich eksperymentach są kolejno: 1, 3, 2, -0,07.

### 5.1. 2 regulatory lokalne

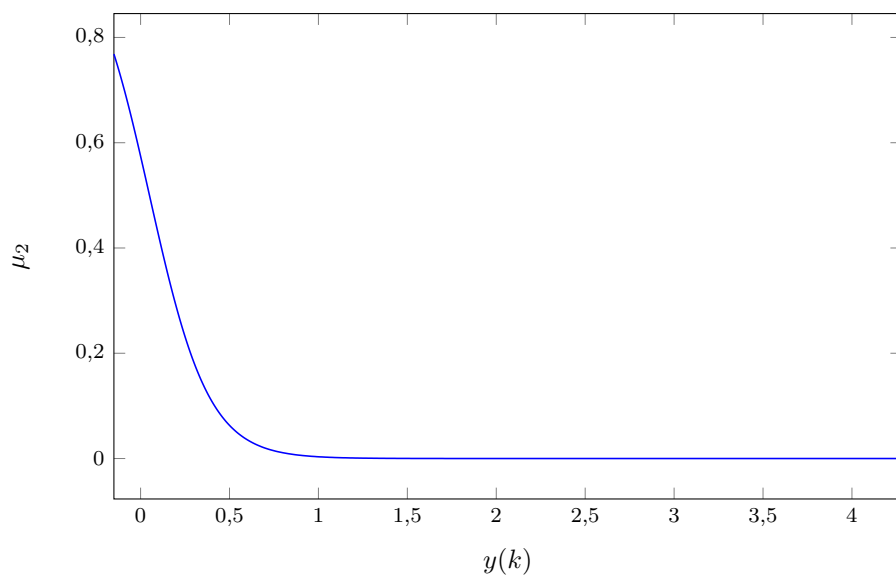
Dla 2 regulatorów lokalnych użyliśmy sigmoidalnych funkcji przynależności, danych wzorami 5.2 i 5.3. Parametry mają wartości:  $\alpha = -3$ ,  $c = 0.3$ .

$$\mu_1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c)}} \quad (5.2)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c)}} \quad (5.3)$$



Rys. 5.1. Funkcja przynależności regulatora 1

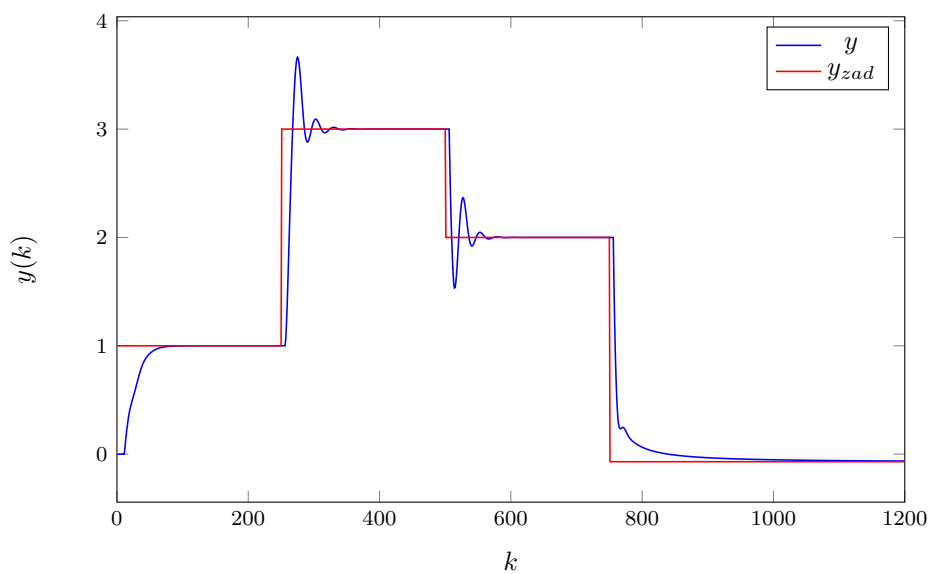


Rys. 5.2. Funkcja przynależności regulatora 2

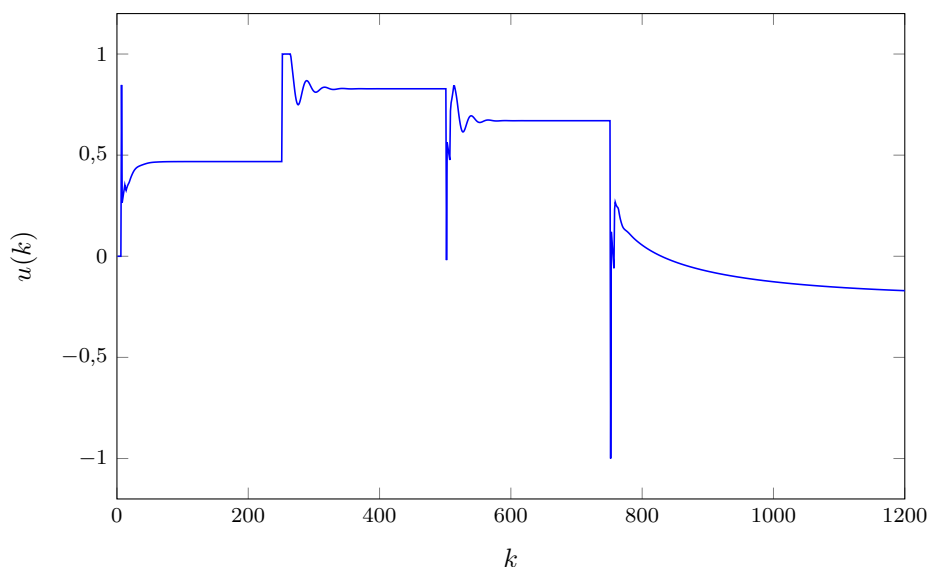
### 5.1.1. PID

Parametry algorytmu PID wyznaczone przez algorytm genetyczny są następujące:

- $K^1 = 0,24$
- $T_i^1 = 5,37$
- $T_d^1 = 1,05$
- $K^2 = 0,21$
- $T_i^2 = 5,32$
- $T_d^2 = 2,12$



Rys. 5.3. Wyjście obiektu dla 2 regulatorów lokalnych PID



Rys. 5.4. Sterowanie obiektu dla 2 regulatorów lokalnych PID

Wskaźnik jakości regulacji dla regulatora, którego działanie przedstawiają wykresy 5.3 i 5.4, ma wartość  $E = 101,5549$ . Błąd jest zatem nieznacznie niższy niż dla "klasycznego" regulatora DMC z wykresów 4.15 i 4.16, choć można zauważyć, że występują większe przeregulowania i oscylacje.

### 5.1.2. DMC

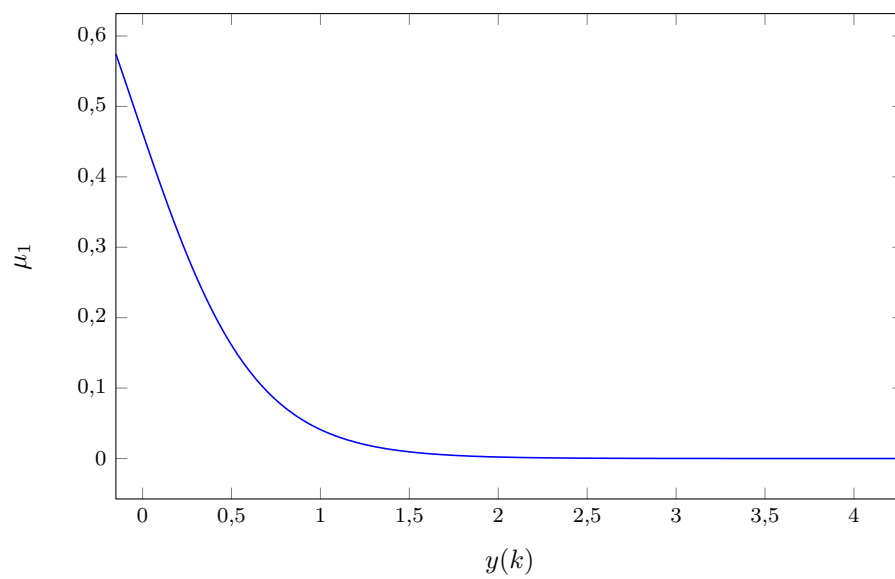
## 5.2. 3 regulatory lokalne

Dla 3 regulatorów lokalnych użyliśmy sigmoidalnych funkcji przynależności, danych wzorami 5.4, 5.5 i 5.6. Parametry mają wartości:  $\alpha = -3$ ,  $c^1 = -0,05$ ,  $c^2 = 1,3$ .

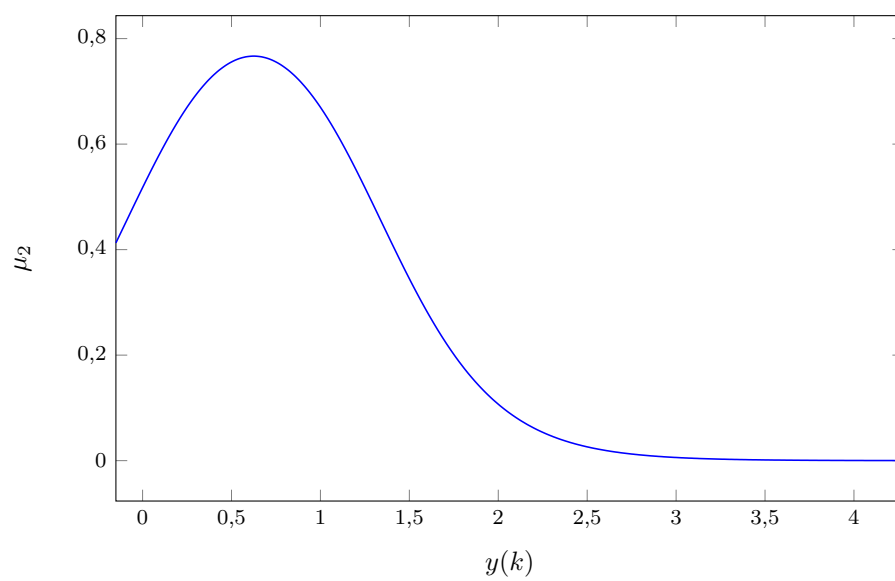
$$\mu_1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^1)}} \quad (5.4)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^1)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^2)}} \quad (5.5)$$

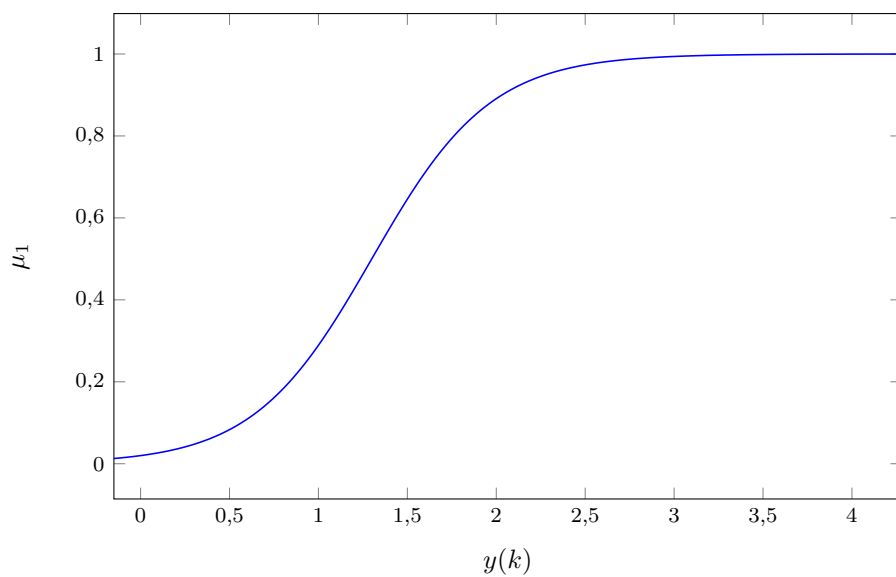
$$\mu_3 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^2)}} \quad (5.6)$$



Rys. 5.5. Funkcja przynależności regulatora 1



Rys. 5.6. Funkcja przynależności regulatora 2

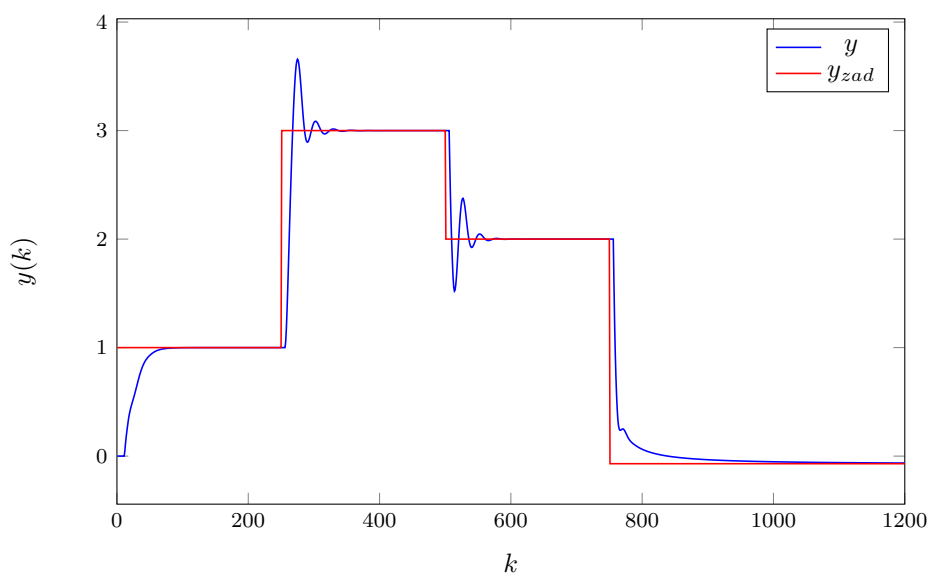


Rys. 5.7. Funkcja przynależności regulatora 3

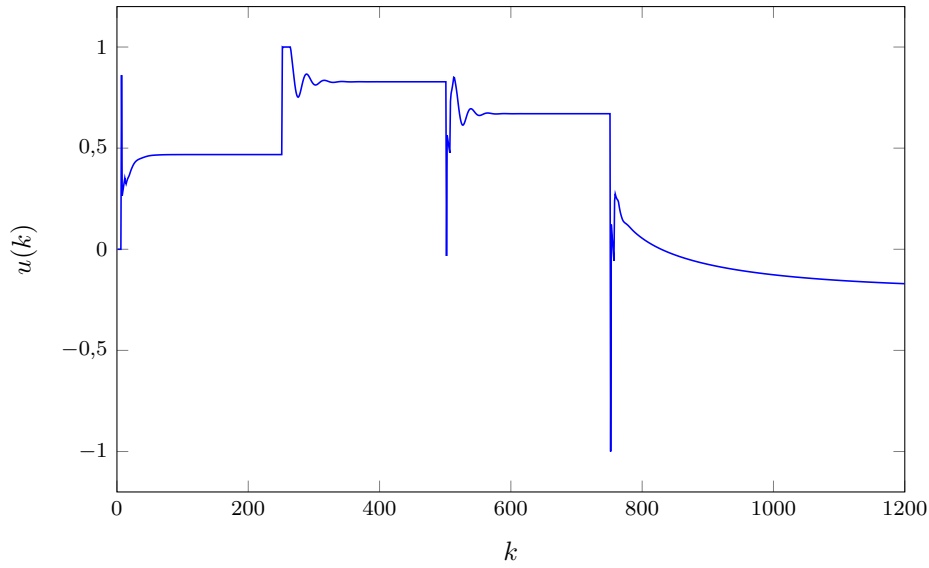
### 5.2.1. PID

Parametry algorytmu PID wyznaczone przez algorytm genetyczny są następujące:

- $K^1 = 0,163$
- $T_i^1 = 4,327$
- $T_d^1 = 1,91$
  
- $K^2 = 0,297$
- $T_i^2 = 9,87$
- $T_d^2 = 4,624$
  
- $K^3 = 0,385$
- $T_i^3 = 5,32$
- $T_d^3 = 0,383$



Rys. 5.8. Wyjście obiektu dla 3 regulatorów lokalnych PID



Rys. 5.9. Sterowanie obiektu dla 3 regulatorów lokalnych PID

Wskaźnik jakości regulacji dla regulatora, którego działanie przedstawiają wykresy 5.8 i 5.9, ma wartość  $E = 101,5483$ , a więc niemalże równy błędowi 2 regulatorów lokalnych. Różnica między wykresami 5.3 i 5.8 jest praktycznie niezauważalna.

### 5.2.2. DMC

## 5.3. 4 regulatory lokalne

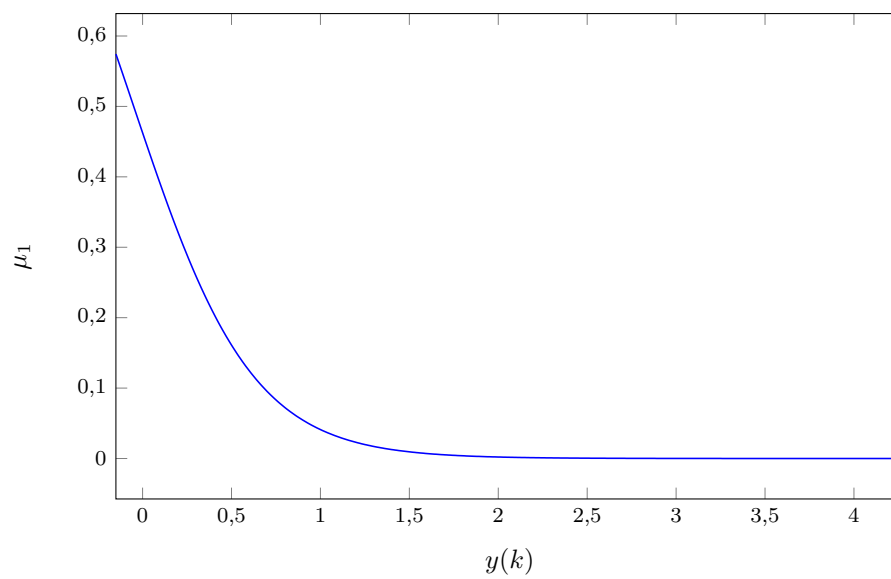
Dla 3 regulatorów lokalnych użyliśmy sigmoidalnych funkcji przynależności, danych wzorami 5.7, 5.8, 5.9 i 5.10. Parametry mają wartości:  $\alpha = -3$ ,  $c^1 = -0,05$ ,  $c^2 = 0,5$ ,  $c^3 = 1,3$ .

$$\mu_1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^1)}} \quad (5.7)$$

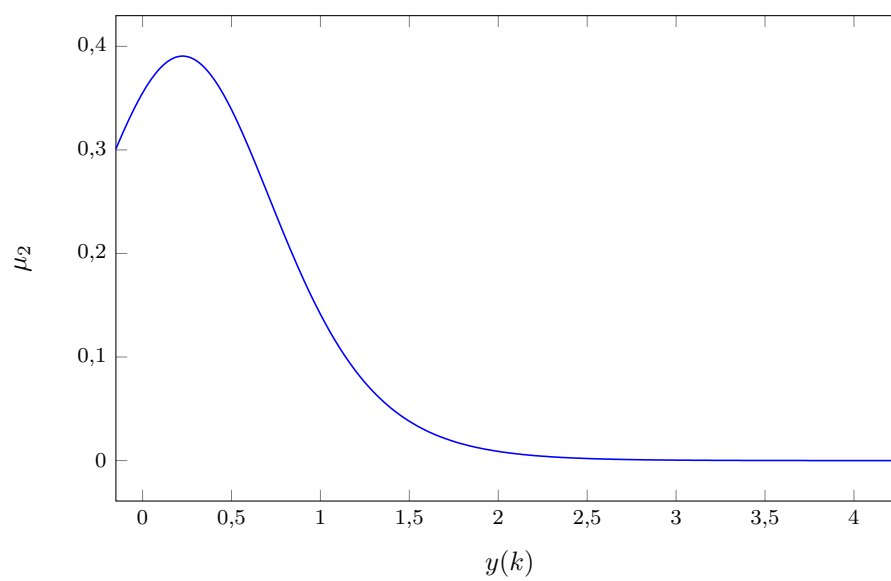
$$\mu_2 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^1)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^2)}} \quad (5.8)$$

$$\mu_3 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^3)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^4)}} \quad (5.9)$$

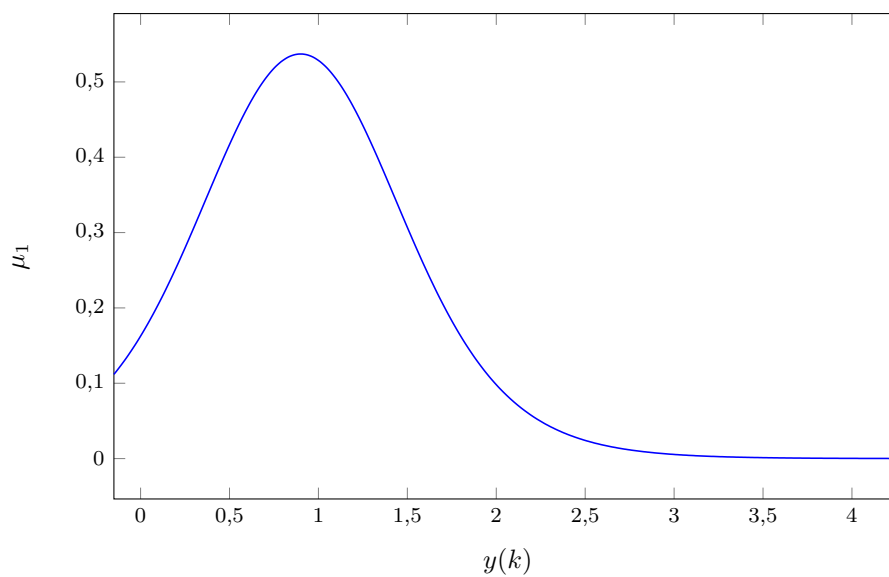
$$\mu_4 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^4)}} \quad (5.10)$$



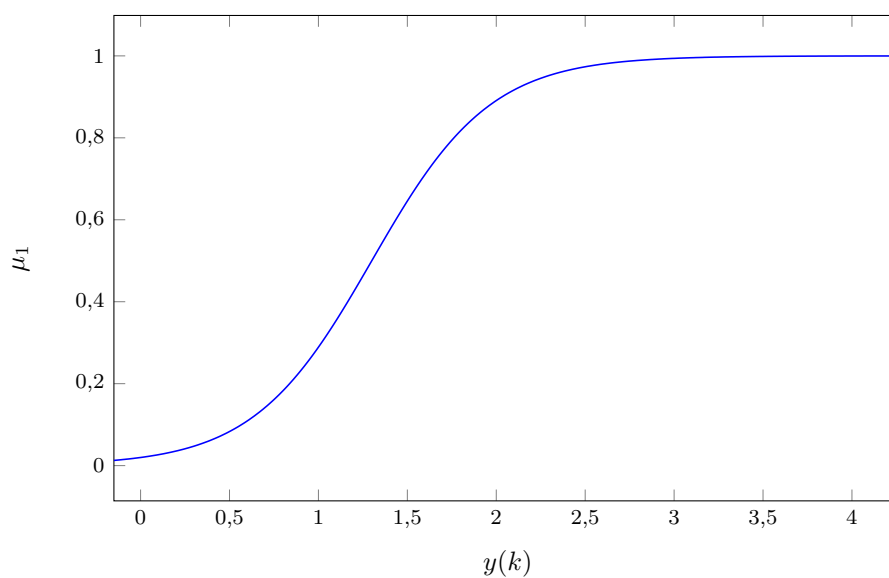
Rys. 5.10. Funkcja przynależności regulatora 1



Rys. 5.11. Funkcja przynależności regulatora 2



Rys. 5.12. Funkcja przynależności regulatora 3



Rys. 5.13. Funkcja przynależności regulatora 4

### 5.3.1. PID

Parametry algorytmu PID wyznaczone przez algorytm genetyczny są następujące:

- $K^1 = 0,1552$
- $T_i^1 = 3,7131$
- $T_d^1 = 0,34008$
  
- $K^2 = 0,4115$
- $T_i^2 = 8,52$
- $T_d^2 = 0,3931$
  
- $K^3 = 0,44$
- $T_i^3 = 2,6651$

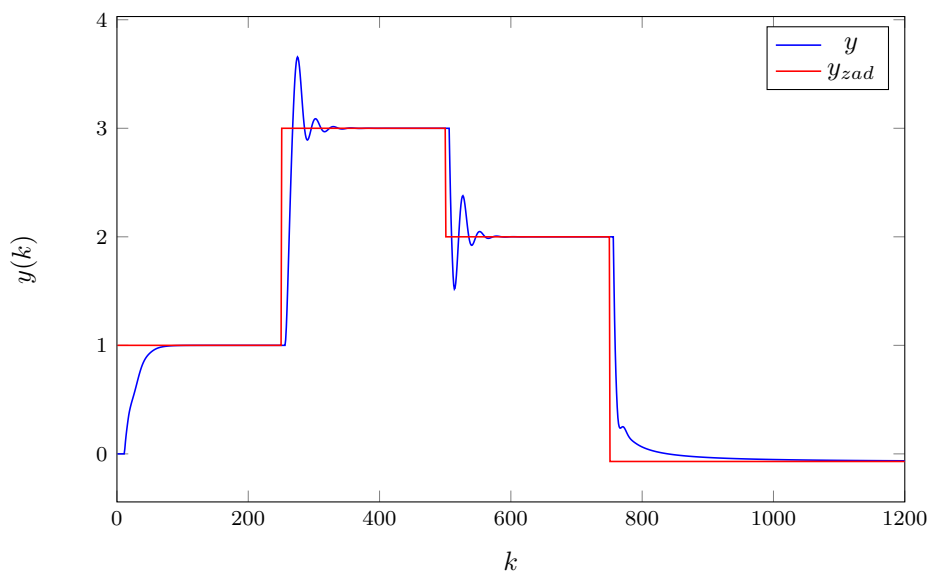


$$— T_d^3 = 11,7917$$

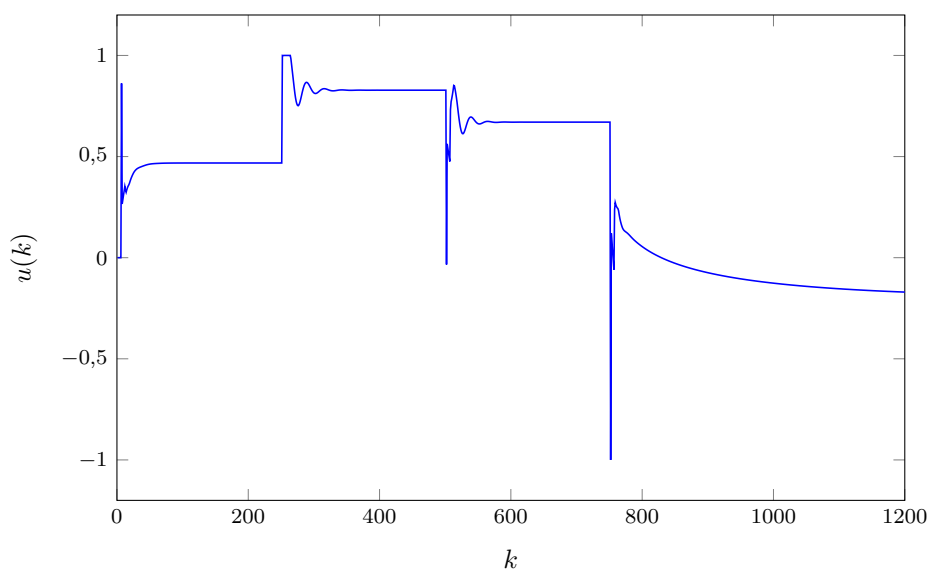
$$— K^4 = 0,5802$$

$$— T_i^4 = 13,6447$$

$$— T_d^4 = 12,907$$



Rys. 5.14. Wyjście obiektu dla 4 regulatorów lokalnych PID



Rys. 5.15. Sterowanie obiektu dla 4 regulatorów lokalnych PID

Wskaźnik jakości regulacji dla regulatora, którego działanie przedstawiają wykresy 5.14 i 5.15, ma wartość  $E = 101,5480$ , a więc niemalże równy błędowi 3 regulatorów lokalnych. Różnica między wykresami 5.8 i 5.14 jest praktycznie niezauważalna. Wskazuje to na fakt, że zwiększanie ilości regulatorów lokalnych PID nie wpływa na poprawę jakości regulacji. Dla potwierdzenia tej tezy, przeprowadzimy eksperyment dla 5 regulatorów lokalnych.

### 5.3.2. DMC

## 5.4. 5 regulatory lokalne

Dla 3 regulatorów lokalnych użyliśmy sigmoidalnych funkcji przynależności, danych wzorami 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 i 5.15. Parametry mają wartości:  $\alpha = -3$ ,  $c^1 = -0,05$ ,  $c^2 = 0,25$ ,  $c^3 = 0,5$ ,  $c^4 = 1,3$ .

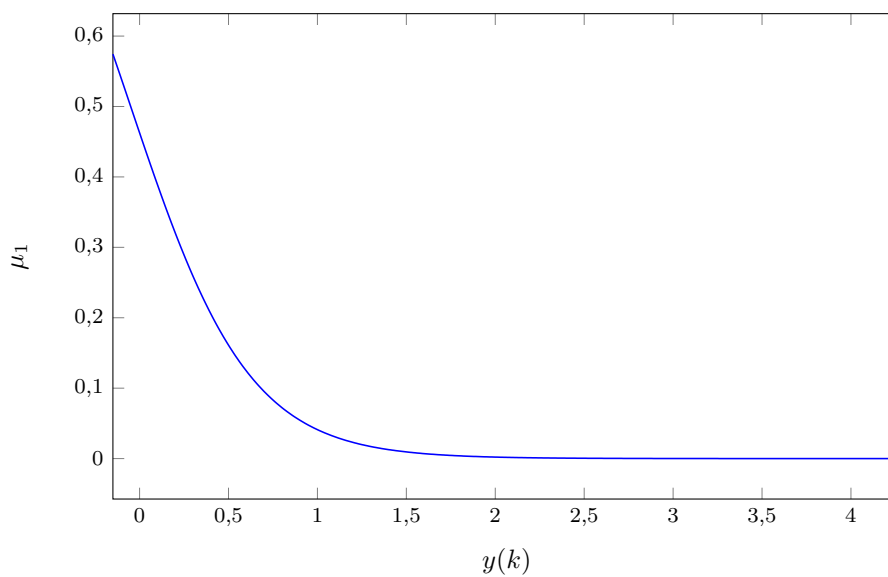
$$\mu_1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^1)}} \quad (5.11)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^1)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^2)}} \quad (5.12)$$

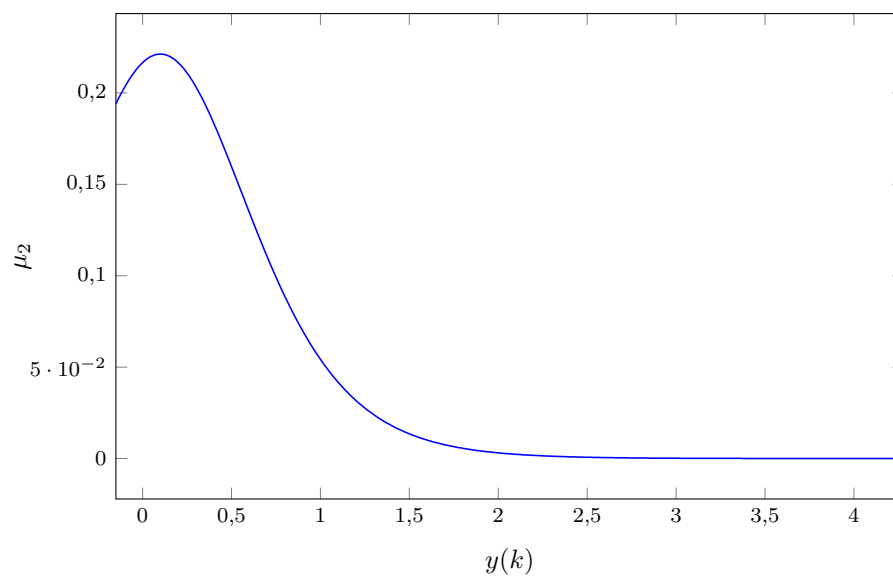
$$\mu_3 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^2)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^3)}} \quad (5.13)$$

$$\mu_4 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^3)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^4)}} \quad (5.14)$$

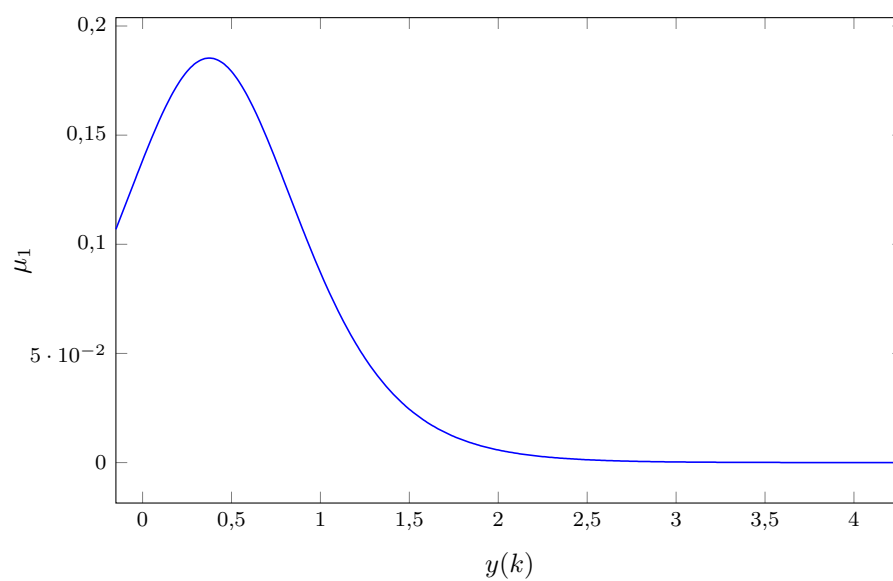
$$\mu_5 = \frac{1}{1 + e^{\alpha*(y(k)-c^4)}} \quad (5.15)$$



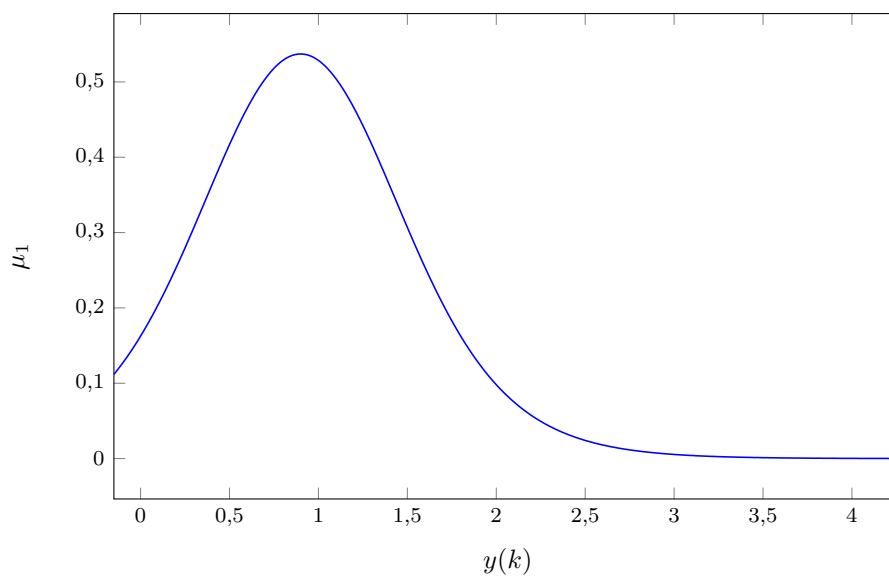
Rys. 5.16. Funkcja przynależności regulatora 1



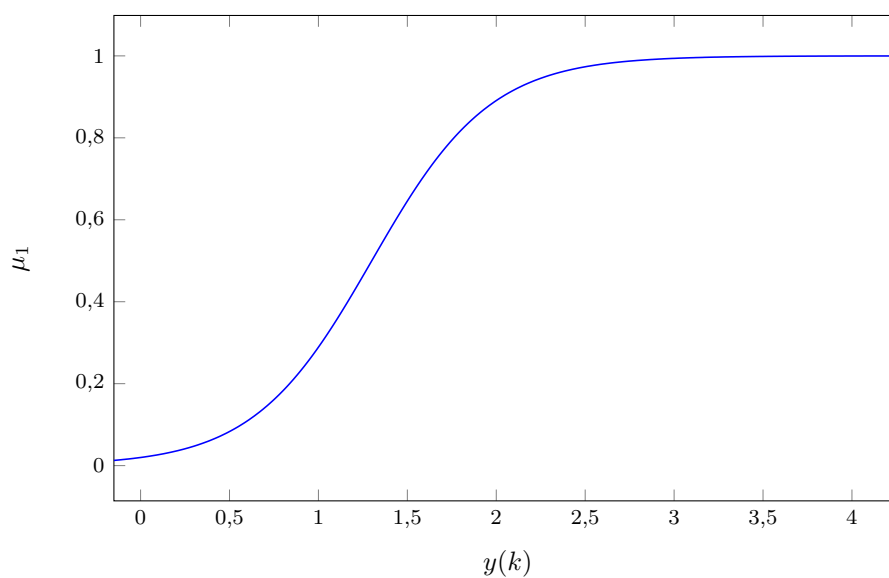
Rys. 5.17. Funkcja przynależności regulatora 2



Rys. 5.18. Funkcja przynależności regulatora 3



Rys. 5.19. Funkcja przynależności regulatora 4



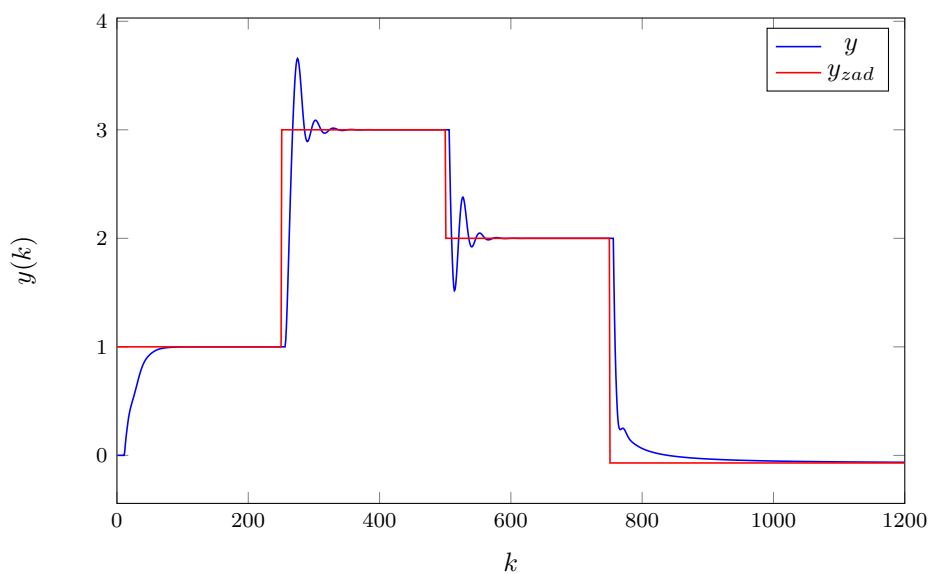
Rys. 5.20. Funkcja przynależności regulatora 5

#### 5.4.1. PID

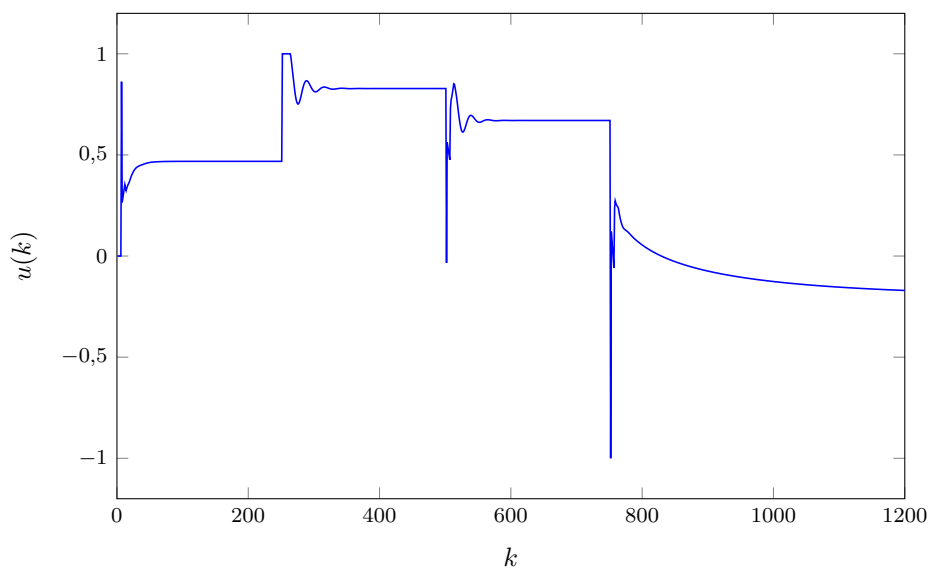
Parametry algorytmu PID wyznaczone przez algorytm genetyczny są następujące:

- $K^1 = 0,163$
- $T_i^1 = 4,327$
- $T_d^1 = 1,91$
  
- $K^2 = 0,297$
- $T_i^2 = 9,87$
- $T_d^2 = 4,624$
  
- $K^3 = 0,385$
- $T_i^3 = 5,32$

- $T_d^3 = 0,383$
- $K^4 = 0,385$
- $T_i^4 = 5,32$
- $T_d^4 = 0,383$
- $K^5 = 0,385$
- $T_i^5 = 5,32$
- $T_d^5 = 0,383$



Rys. 5.21. Wyjście obiektu dla 5 regulatorów lokalnych PID



Rys. 5.22. Sterowanie obiektu dla 5 regulatorów lokalnych PID

Wskaźnik jakości regulacji dla regulatora, którego działanie przedstawiają wykresy 5.21 i 5.22, ma wartość  $E = 101,5480$ , a więc równy błędowi 4 regulatorów lokalnych. Potwierdza to tezę, że tworzenie kolejnych regulatorów lokalnych nie ma sensu.

#### **5.4.2. DMC**