

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

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

Wojciech Rokicki, Radosław Pietkun, Jakub Gruszecki

Warszawa, 2020

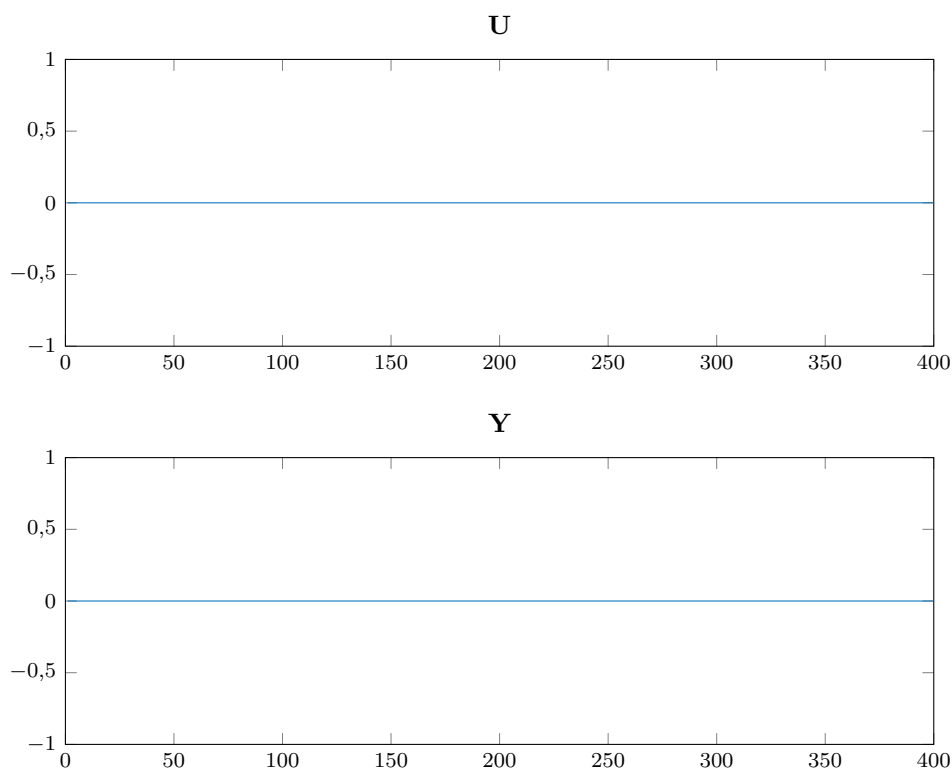
# Spis treści

<b>1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy</b>	2
1.1. Poprawność wartości sygnałów w punkcie pracy	2
1.2. Wnioski	2
1.3. Implementacja	2
<b>2. Odpowiedzi skokowe i charakterystyka statyczna</b>	3
2.1. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru wejście-wyjście procesu	3
2.2. Charakterystyka statyczna	3
2.3. Właściwości statyczne i dynamiczne	3
2.4. Implementacja	4
<b>3. Symulacja cyfrowego algorytmu PID oraz algorytmu DMC</b>	5
3.1. Regulator PID	5
3.2. Regulator DMC	5
3.3. Implementacja	6
<b>4. Dobór parametrów cyfrowego algorytmu PID oraz algorytmu DMC</b>	7
4.1. Regulator PID	7
4.2. Regulator DMC	7
<b>5. Rozmyty algorytm PID oraz DMC</b>	14
<b>6. Regulacja za pomocą rozmytych regulatorów PID</b>	15
6.1. Funkcje przynależności Gaussa	15
6.2. Funkcje przynależności trójkątne	17
6.3. Funkcje przynależności trapezoidalne	23
6.4. Wnioski	27
<b>7. Regulacja za pomocą rozmytych regulatorów DMC</b>	30
7.1. Funkcje przynależności Gaussa	30
7.2. Funkcje przynależności trójkątne	33
7.3. Funkcje przynależności trapezoidalne	36
7.4. Wnioski	44

# 1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

## 1.1. Poprawność wartości sygnałów w punkcie pracy

W celu sprawdzenia poprawności wartości sygnałów  $U_{pp}$  oraz  $Y_{pp}$  obiekt został pobudzony sygnałem o wartości:  $U_{pp} = 0$ . Wartości sygnałów w punkcie pracy będą poprawne, jeśli sygnał wyjściowy przyjmie wartość stałą  $Y_{pp} = 0$ .



Rys. 1.1. Przebiegi sygnałów  $u(k)$ ,  $y(k)$  w punkcie pracy

## 1.2. Wnioski

Na podstawie rysunku 1.1 widać, że dla stałej wartości sygnału sterującego  $U_{pp} = 0$  wyjście obiektu przyjmuje stałą wartość, równą  $Y_{pp} = 0$ . Jest to dowód na to, że podane wartości sygnałów wejściowego sterowania oraz wyjściowego w punkcie pracy są poprawne.

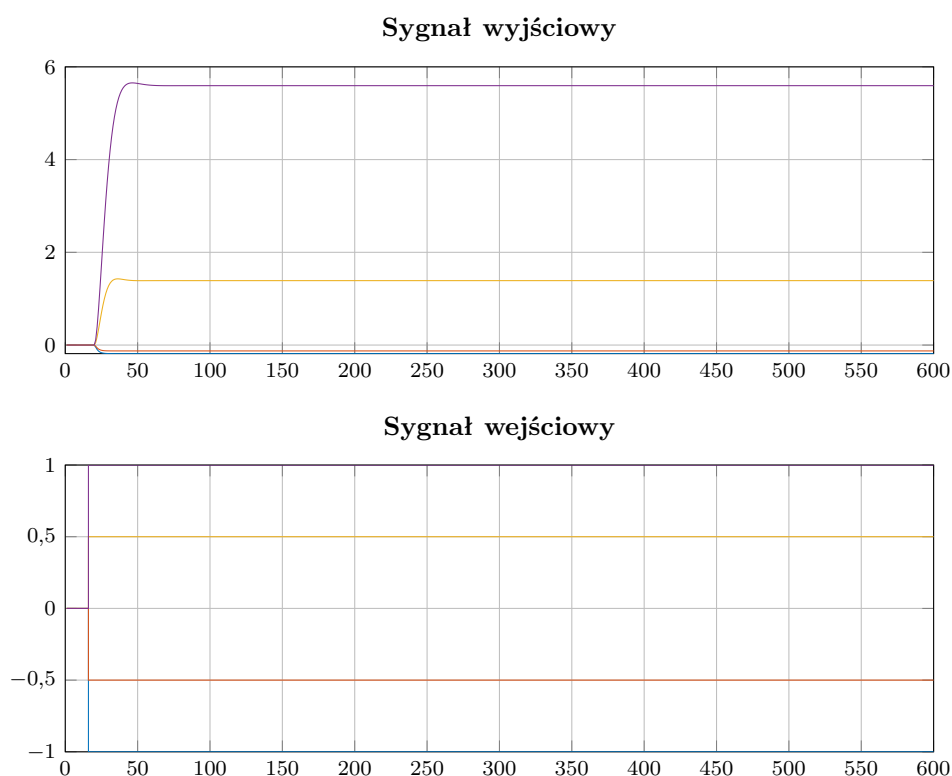
## 1.3. Implementacja

Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystany został skrypt `zad1.m`.

## 2. Odpowiedzi skokowe i charakterystyka statyczna

### 2.1. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru wejście-wyjście procesu

W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowych obiekt był pobudzany, w punkcie pracy, różnymi skokami sygnału sterującego w chwili  $k = 16$ . Przeprowadzono cztery testy dla różnych wartości skoków. Uzyskane odpowiedzi skokowe wraz z odpowiadającymi im przebiegami sygnału sterowania przedstawiono na rys. 2.1.



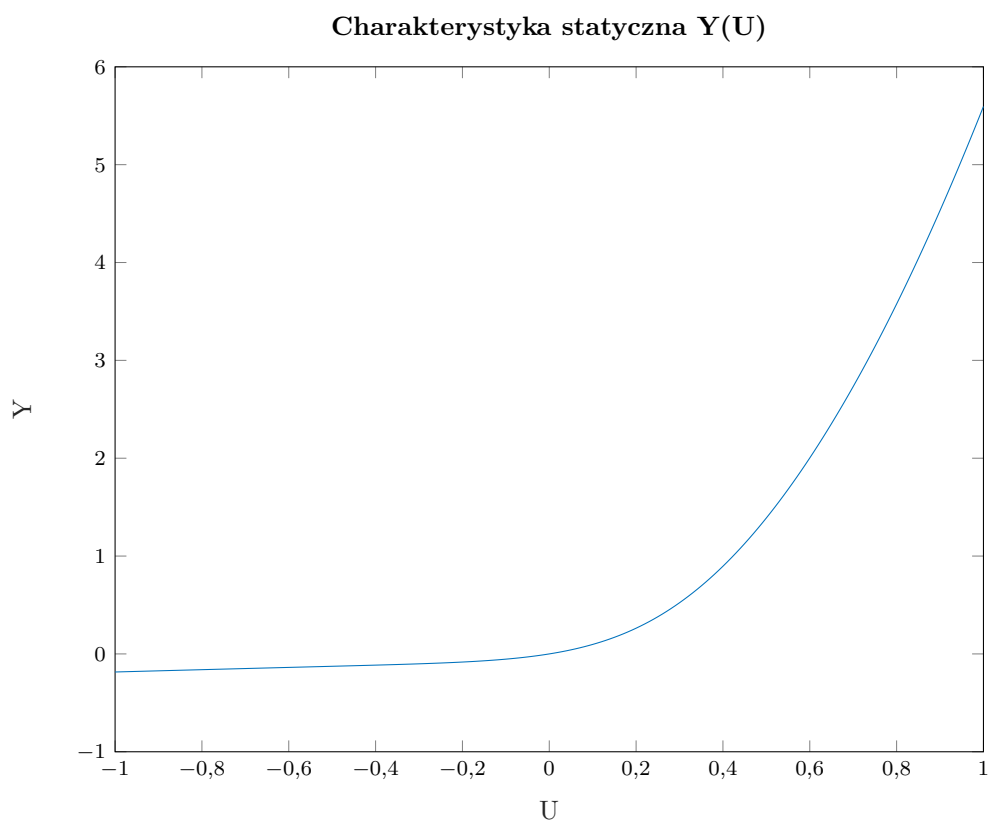
Rys. 2.1. Odpowiedzi skokowe toru wejście-wyjście procesu

### 2.2. Charakterystyka statyczna

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej procesu wyznaczono odpowiedź układu w stanie ustalonym dla pobudzeń różnymi wartościami sygnału sterującego. Zebrane wyniki przedstawiono na rys. 2.2.

### 2.3. Właściwości statyczne i dynamiczne

Na podstawie rys. 2.2 można powiedzieć, że właściwości statyczne i dynamiczne obiektu są nieliniowe.



Rys. 2.2. Charakterystyka statyczna procesu

## 2.4. Implementacja

Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystany został skrypt `zad2.m`.

### 3. Symulacja cyfrowego algorytmu PID oraz algorytmu DMC

#### 3.1. Regulator PID

Regulator PID składa się trzech członów: proporcjonalnego, całkującego oraz różniczkującego. Działa on w pętli sprzężenia zwrotnego, mając na celu zredukowanie uchybu (różnicy między wartością zadaną a zmierzoną wartością sygnału wyjściowego procesu) poprzez odpowiednią zmianę sygnału sterującego. Dyskretny regulator PID ma postać:

$$u(k) = r_2 e(k-2) + r_1 e(k-1) + r_0 e(k) + u(k-1) \quad (3.1)$$

gdzie:

$$r_2 = K \frac{T_d}{T_p} \quad (3.2)$$

$$r_1 = K \left( \frac{T_p}{2T_i} - \frac{2T_d}{T_p} - 1 \right) \quad (3.3)$$

$$r_0 = K \left( 1 + \frac{T_p}{2T_i} + \frac{T_d}{T_p} \right) \quad (3.4)$$

gdzie  $K$  - wzmocnienie członu proporcjonalnego,  $T_i$  - czas zdwojenia członu całkującego,  $T_d$  - czas wyprzedzenia członu różniczkującego,  $T_p$  - okres próbkowania

#### 3.2. Regulator DMC

Regulator DMC jest to regulator predykcyjny - działa on z wyprzedzeniem, zanim nastąpią zmiany wartości sygnału wyjściowego. Wektor przyrostów sterowań dany jest wzorem:

$$\Delta U(k) = \mathbf{K} [Y^{\text{zad}}(k) - Y^0(k)] \quad (3.5)$$

$$= \mathbf{K} [Y^{\text{zad}}(k) + Y(k) + \mathbf{M}^P \Delta U^P(k)] \quad (3.6)$$

gdzie:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda I)^{-1} \mathbf{M}^T \quad (3.7)$$

$$\Delta U^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k-(D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times 1} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{N \times N_u} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{M}^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \dots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix}_{N \times (D-1)} \quad (3.10)$$

gdzie  $N$  - horyzont predykcji,  $N_u$  - horyzont sterowania,  $D$  - horyzont dynamiki,  $\lambda$  - kara za zmianę sterowania

W tym przypadku należy wyznaczyć tylko pierwszy element macierzy  $\Delta U(k)$  czyli  $\Delta u(k|k)$ . Aktualne sterowanie uzyskuje się poprzez zsumowanie  $\Delta u(k|k)$  z poprzednim sterowaniem.

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - \sum_{j=1}^{D-1} \mathbf{k}_j^u \Delta u(k-j) \quad (3.11)$$

$$k_e = \sum_{i=1}^N k_{1,i} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{k}_j^u = \overline{\mathbf{K}}_1 \mathbf{M}_j^P, \quad j = 1, \dots, D-1 \quad (3.13)$$

### 3.3. Implementacja

Do zrealizowania zadania został użyty skrypt `zad3.m`. Należy ustawić odpowiednie wartości dla zmiennych o nazwach `piddmc` (0 - pid, 1 - dmc) oraz ograniczenia (0 - wyłączone, 1 - włączone).

## 4. Dobór parametrów cyfrowego algorytmu PID oraz algorytmu DMC

TODO: Wstawić przebiegi z strojenia PIDA i DMC.

Skoki:

$0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1 \rightarrow -0.1 \rightarrow 5$

### 4.1. Regulator PID

Dobieranie nastawów regulatora PID zaczynamy ze wzmocnieniem równym 1 i wyłączonym członem całkującym oraz różniczkującym.

Error = 9.1217e+03.

Zmniejszamy wzmocnienie tak ażeby zmniejszyć oscylacje.

Error = 7.8324e+03

Błąd zmalał, obserwujemy uchyb ustalony oraz oscylacje. Aby wyeliminować uchyb zwiększamy wpływ członu całkującego.

Error = 7.3528e+03

Error = 6.7934e+03

Możemy dalej zauważyć uchyb oraz oscylacje. W celu ich usunięcia zmniejszamy wzmocnienie oraz zwiększamy całkowanie.

Error = 414.1249

Error = 360.4340

Widzimy znaczną poprawę zarówno jakościową jak i wskaźnika ilościowego. Włączamy człon różniczkujący w celu skrócenia czasu osiągnięcia wartości zadanej.

Error = 306.9011

Możemy zauważyć poprawę wskaźnika ilościowego jednakże niepojęce są oscylacje. W celu zniwelowania ich zmniejszymy wzmocnienie, zwiększymy różniczkę.

Error = 403.7229

Wskaźnik ilościowy uległ pogorszeniu jednakże wyidzimy poprawę jakościową - wyeliminowanie oscylacji.

Ostateczne nastawy regulatora PID:

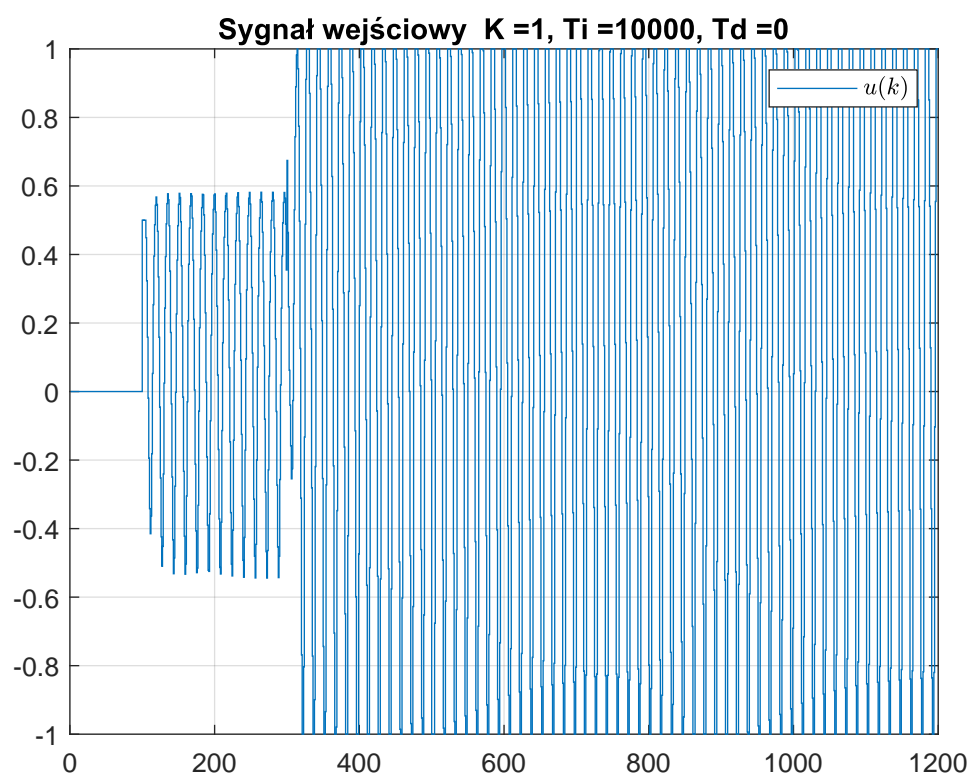
$K = 0.11 \quad T_i = 4.6 \quad T_d = 0.65$

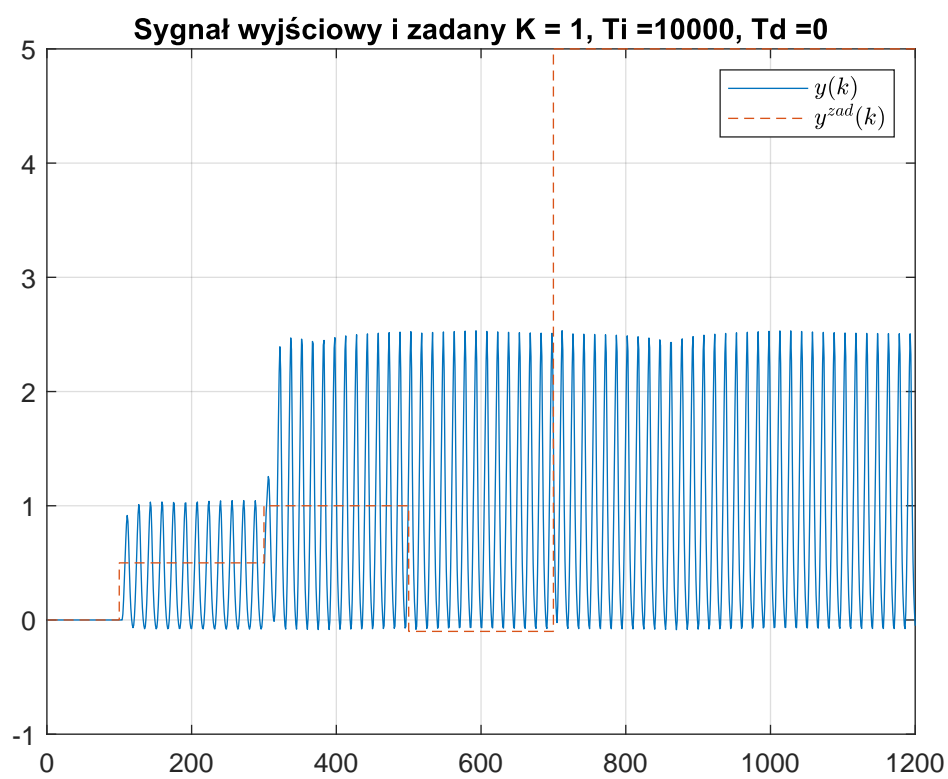
### 4.2. Regulator DMC

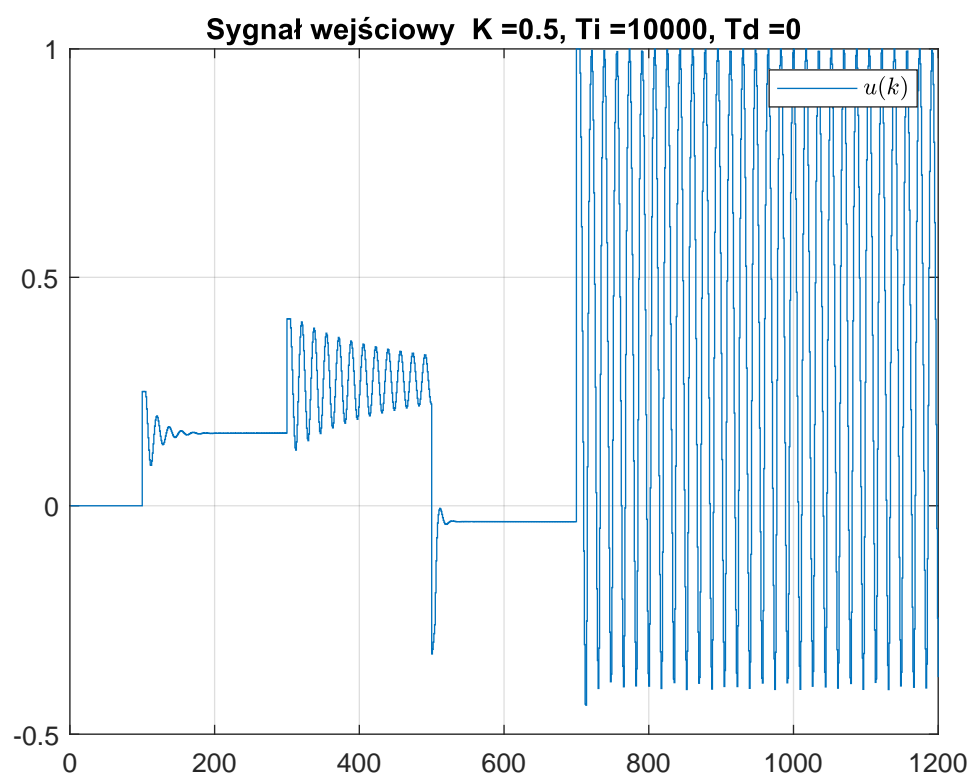
$D = 53; N = 20; N_u = 3;$

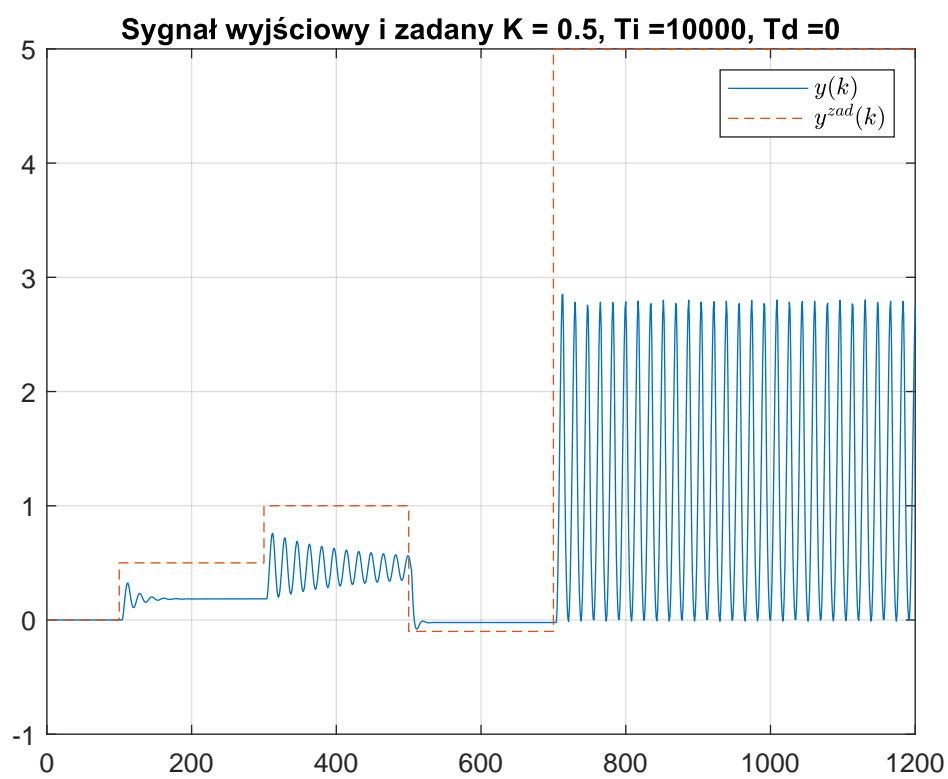
Error = 264.7306

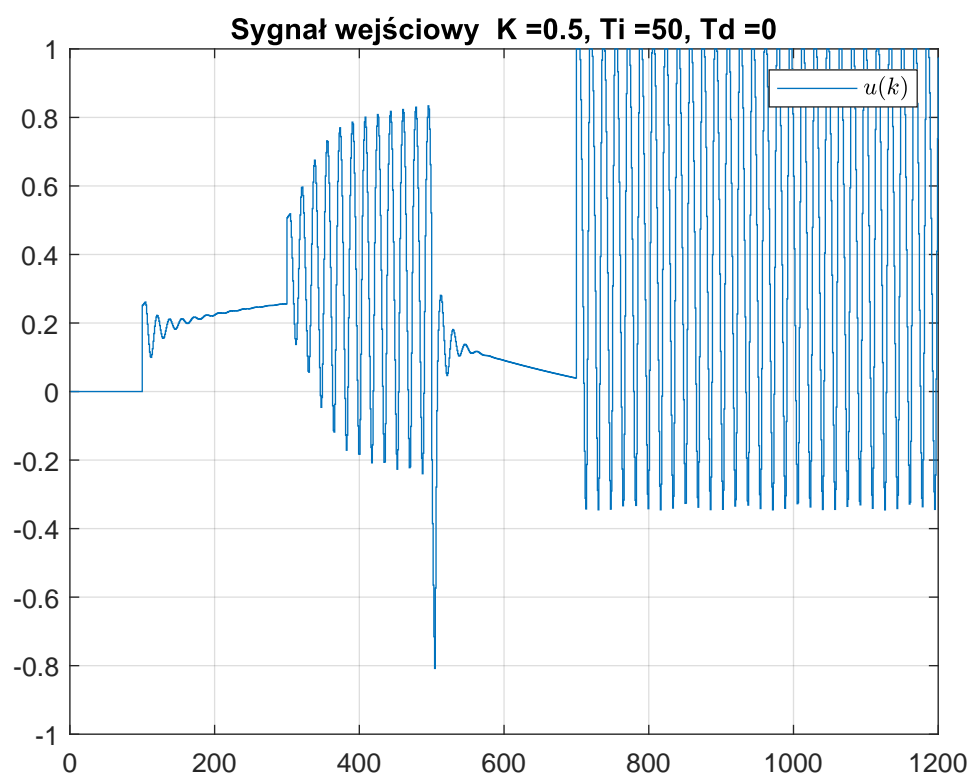


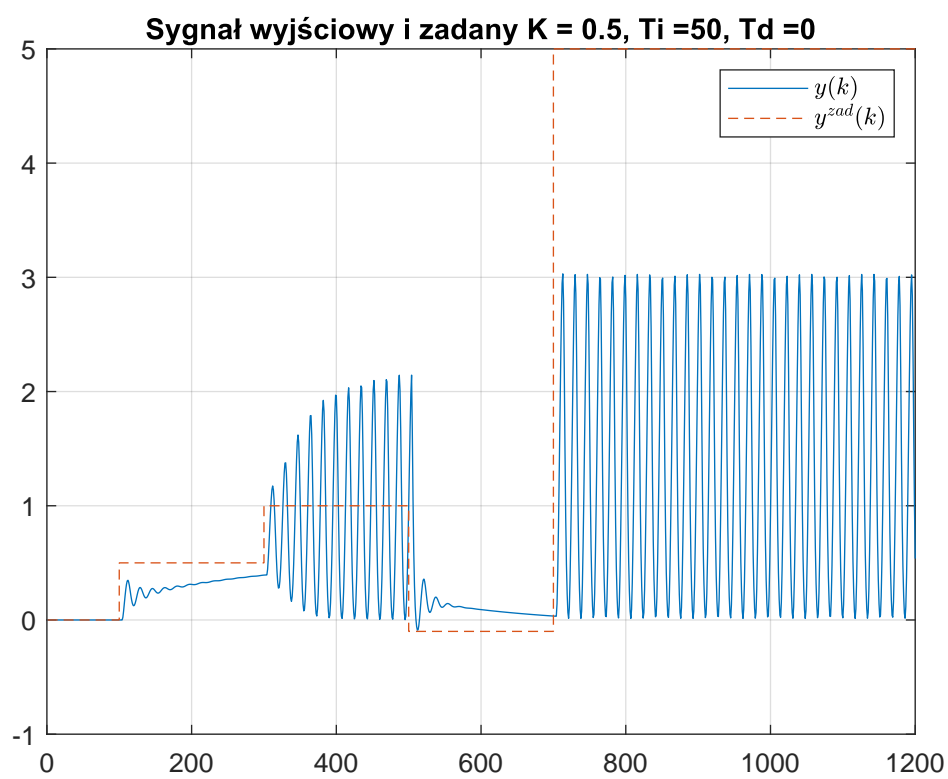


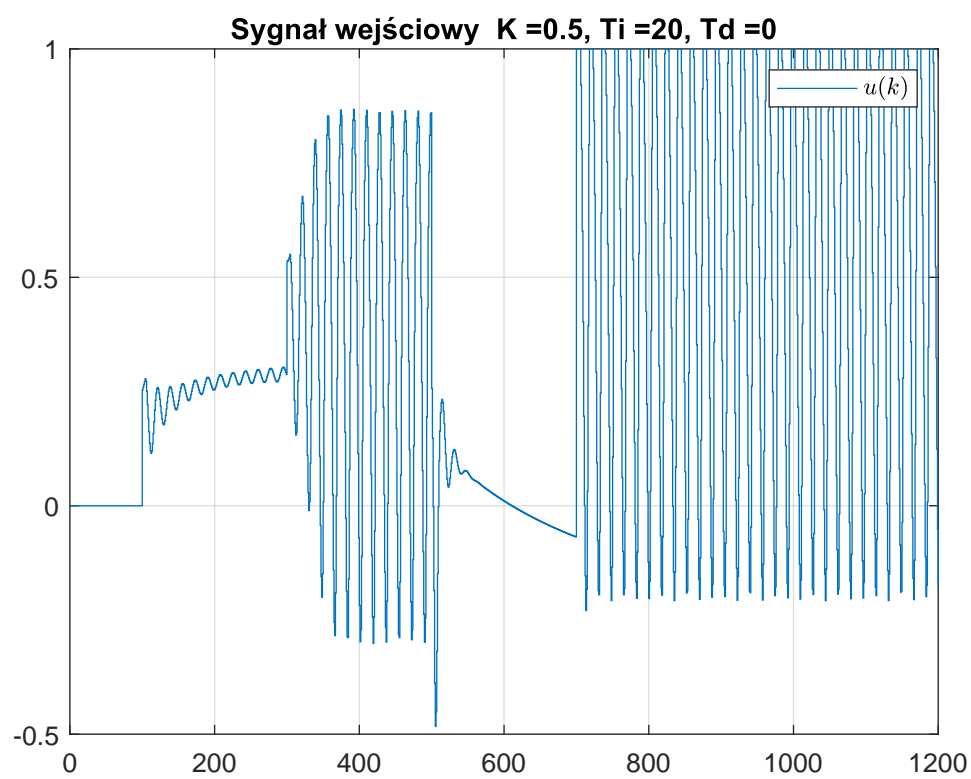


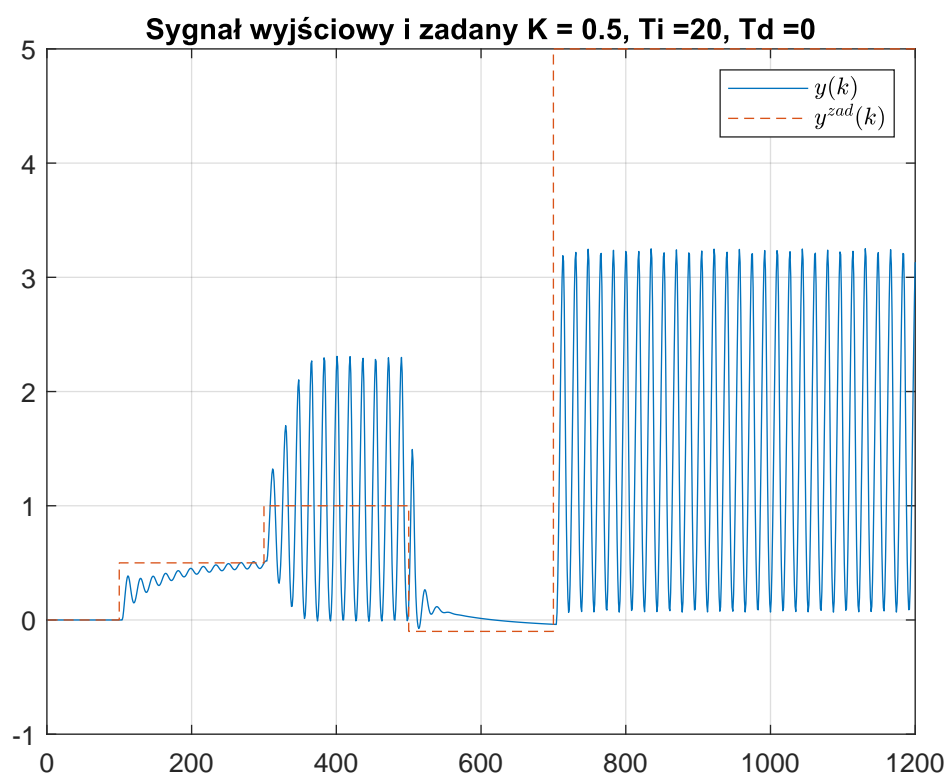




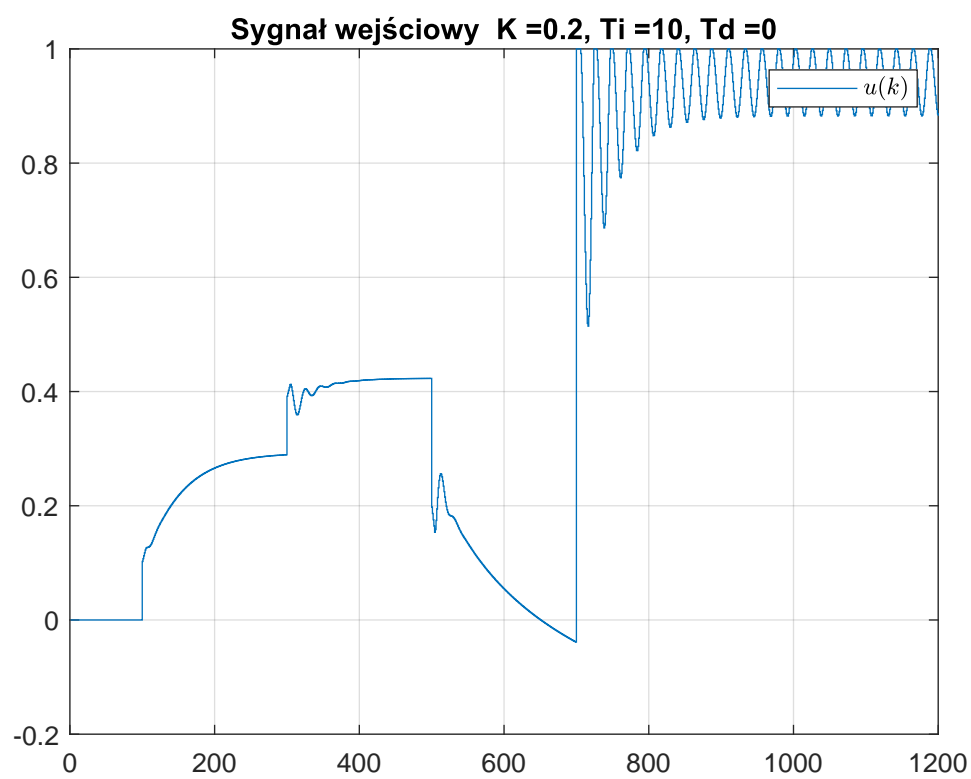


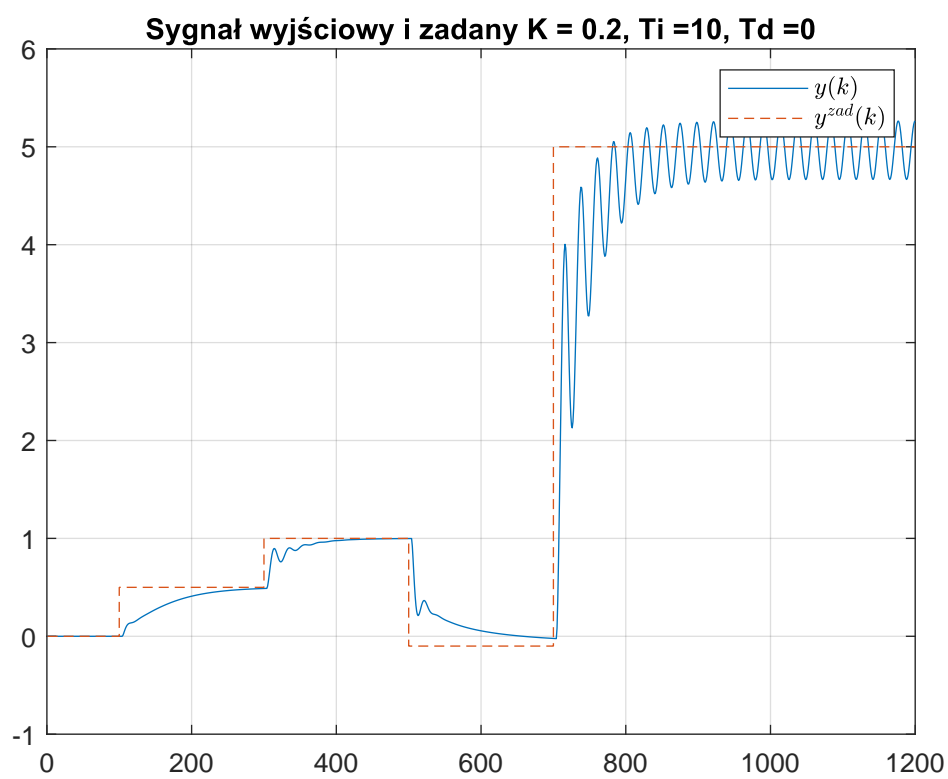


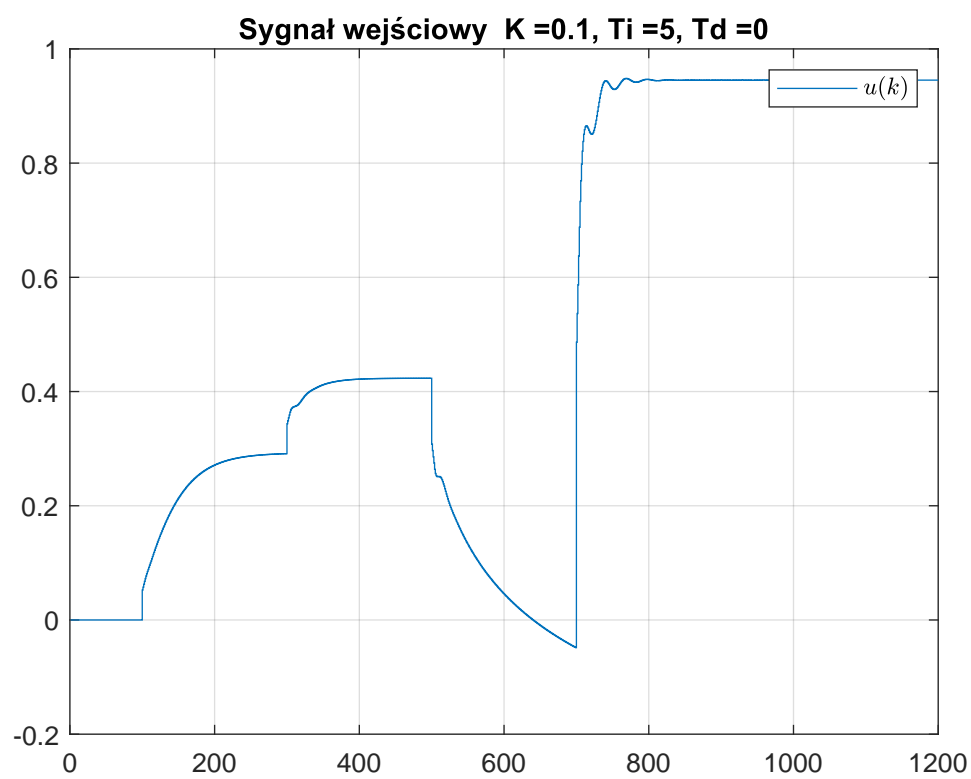


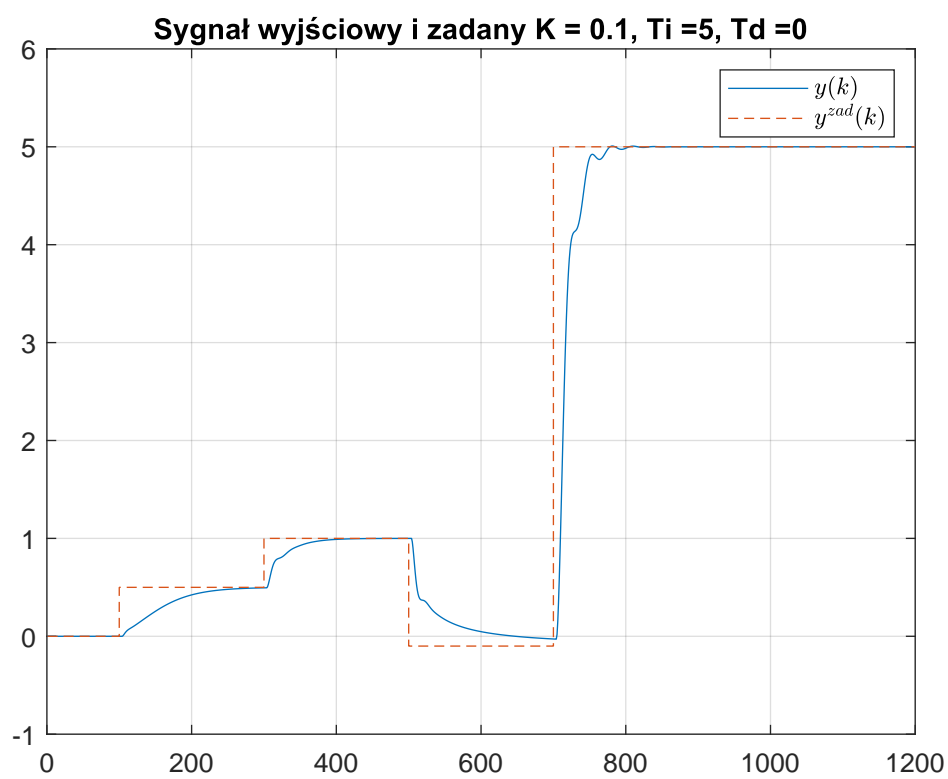


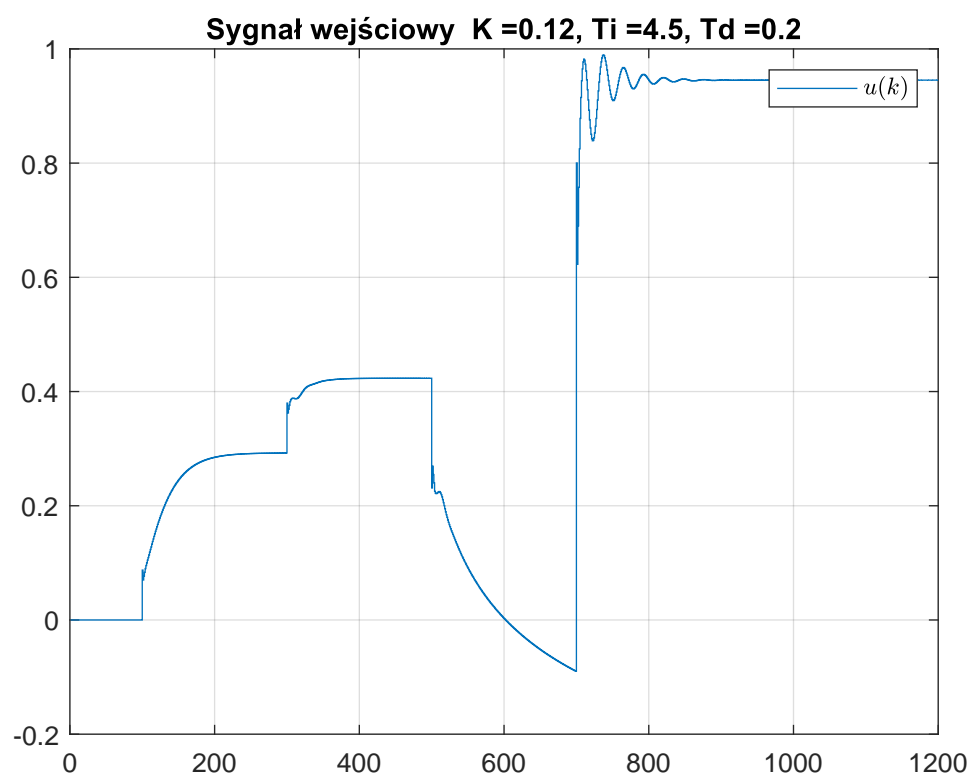


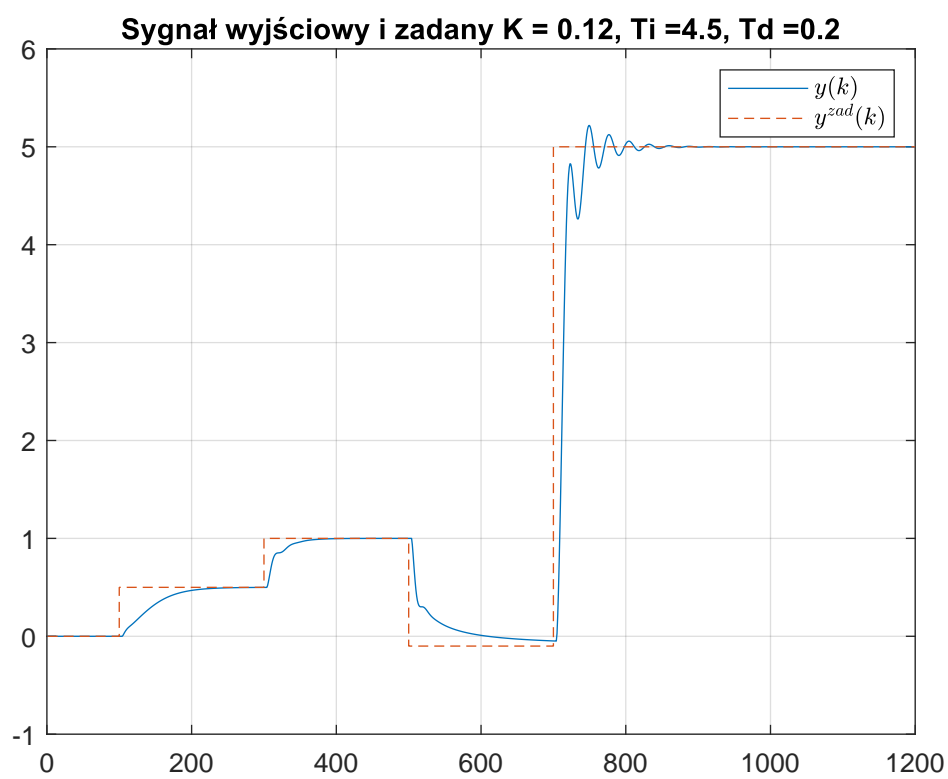


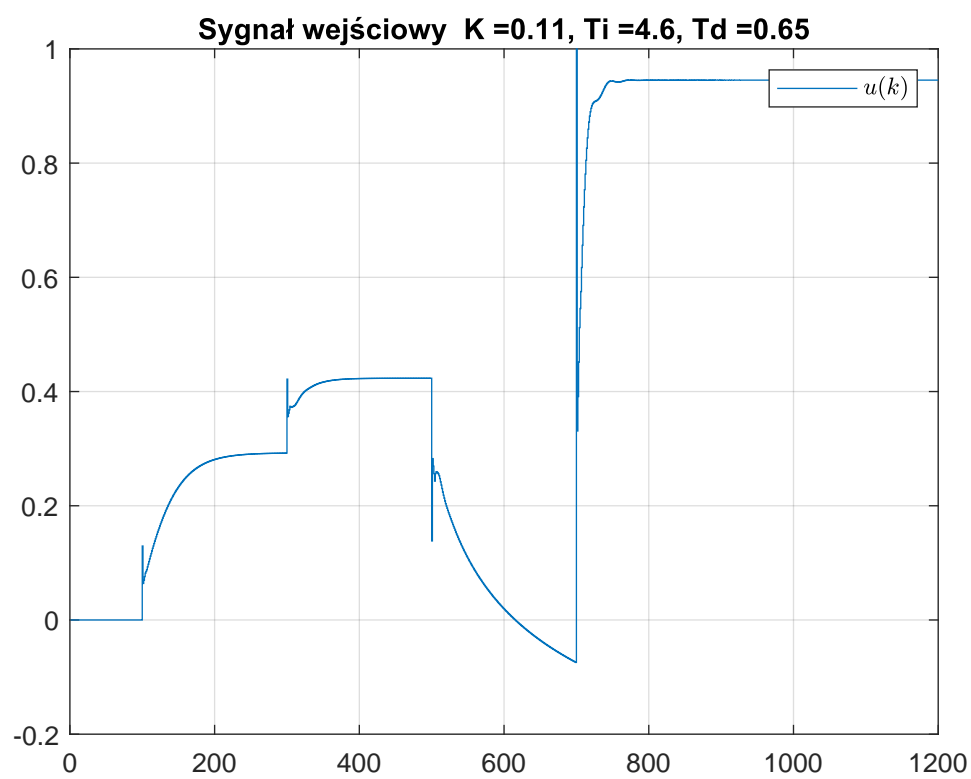


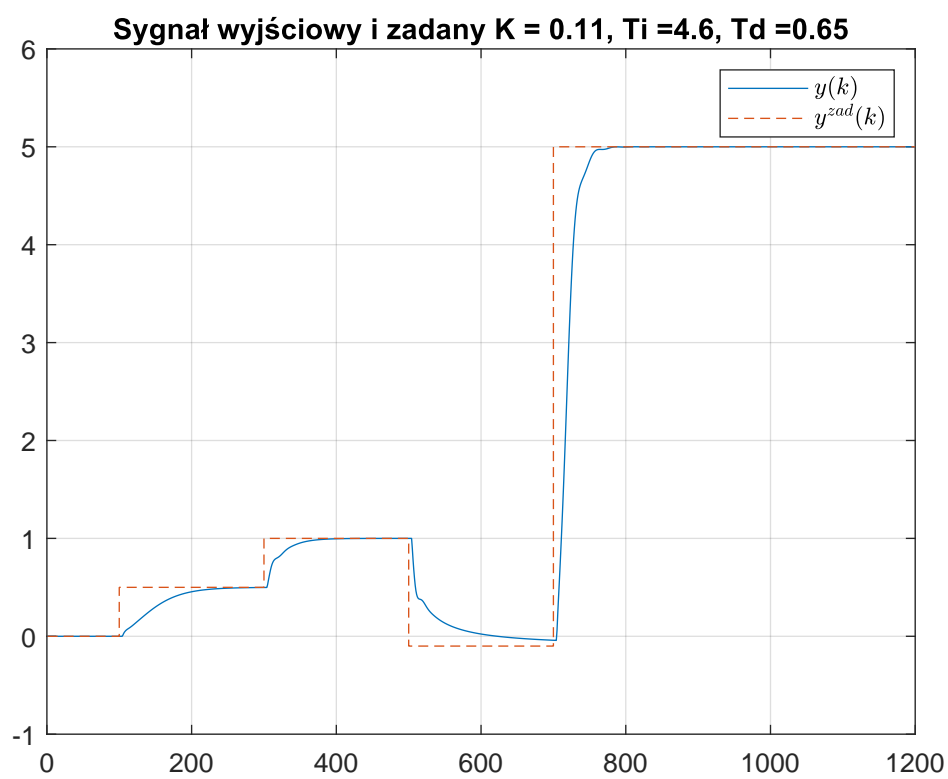




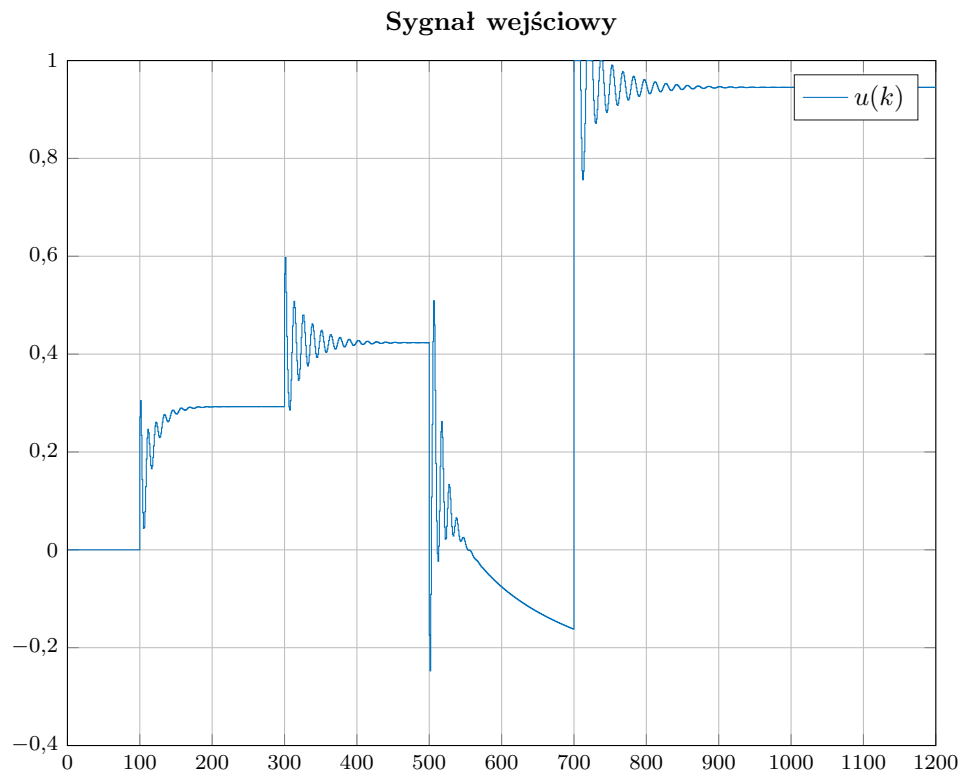




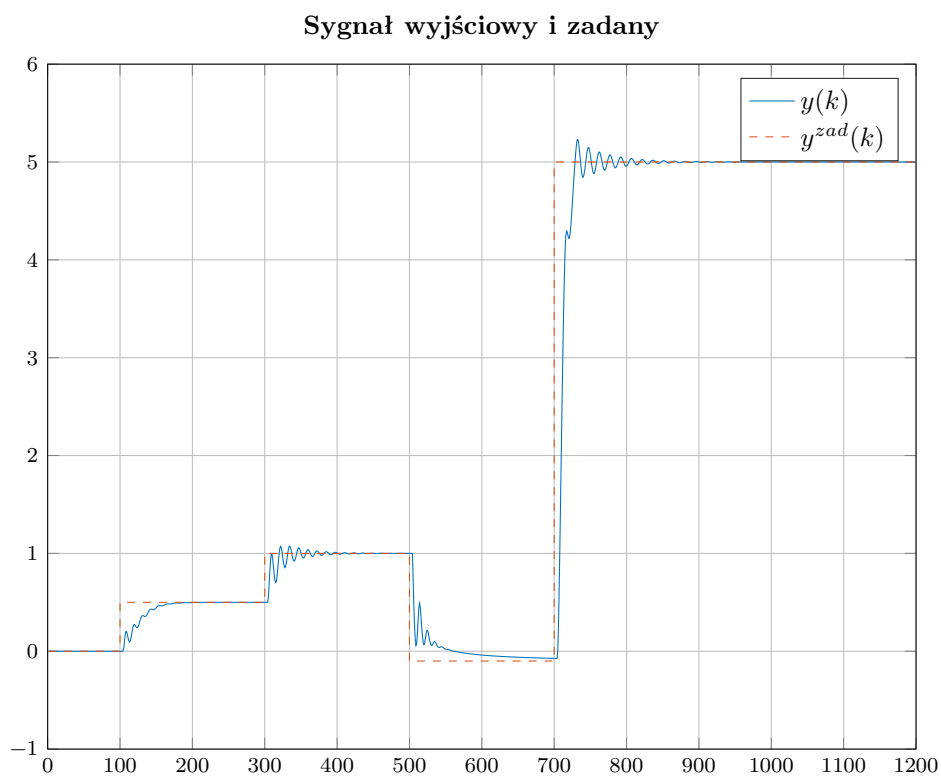








Rys. 4.17. Regulator DMC - sygnał sterujący



Rys. 4.18. Regulator DMC - sygnał wyjściowy i zadany

## 5. Rozmyty algorytm PID oraz DMC

## 6. Regulacja za pomocą rozmytych regulatorów PID

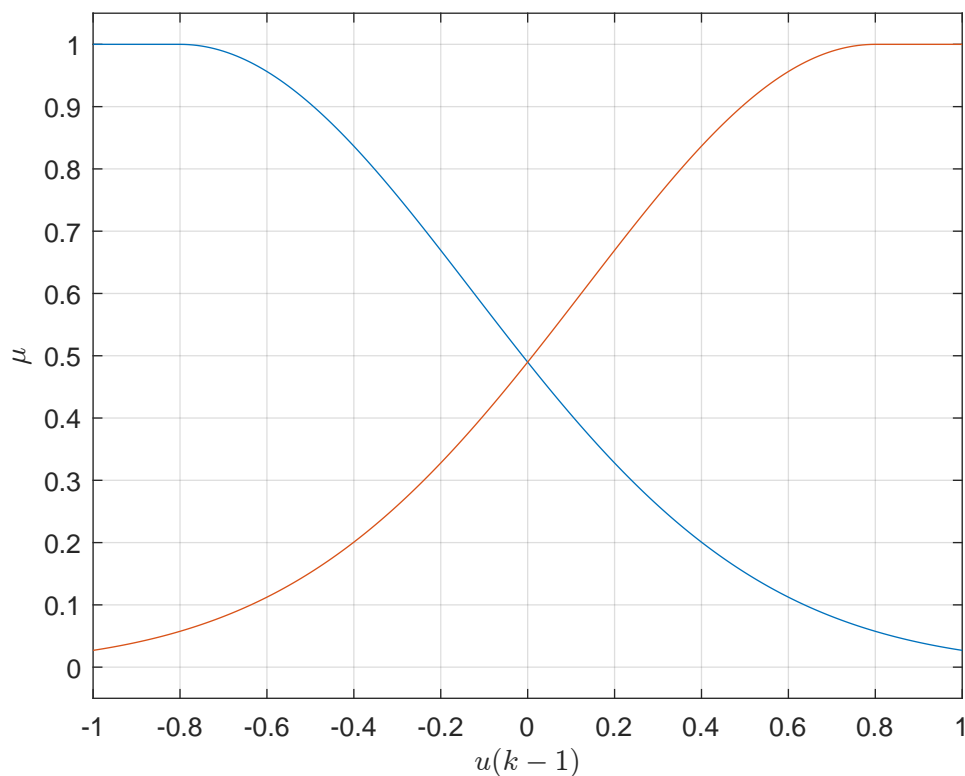
Przetestowaliśmy działanie rozmytego regulatora PID dla różnych funkcji przynależności: Gaussa, trójkątnych oraz trapezoidalnych. Ponadto dla każdej z tych grup funkcji przeprowadziliśmy eksperymenty dla różnej liczby regulatorów lokalnych  $n_r = 2, 3, 4$ . Lokalne regulatory PID stroiliśmy metodą inżynierską poprzez stopniowe dostrajanie odpowiednich członów.

### 6.1. Funkcje przynależności Gaussa

Na początku sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 2$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 6.1. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.2 oraz 6.3. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 1,4152 \cdot 10^3$ .

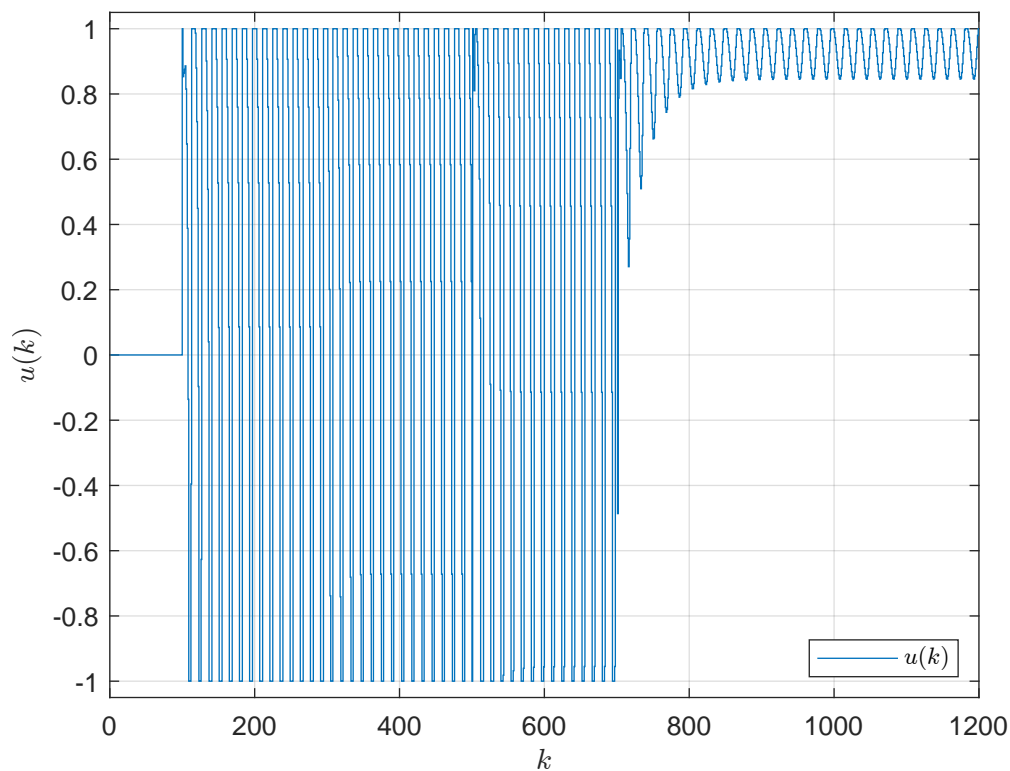
W kolejnym kroku zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 3$ . Funkcje przynależności są widoczne na rys. 6.4. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.5 oraz 6.6. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 354,5834$ .

Następnie sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 4$ . Funkcje przynależności są widoczne na rys. 6.7. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.8 oraz 6.9. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 355,1969$ . Porównując wartości wskaźnika  $E$  można zauważyć, że zwiększenie liczby regulatorów lokalnych nie wpłynęło w istotny sposób na jakość regulacji. W obu przypadkach wartość zadana jest osiągnięta dla różnych punktów pracy.

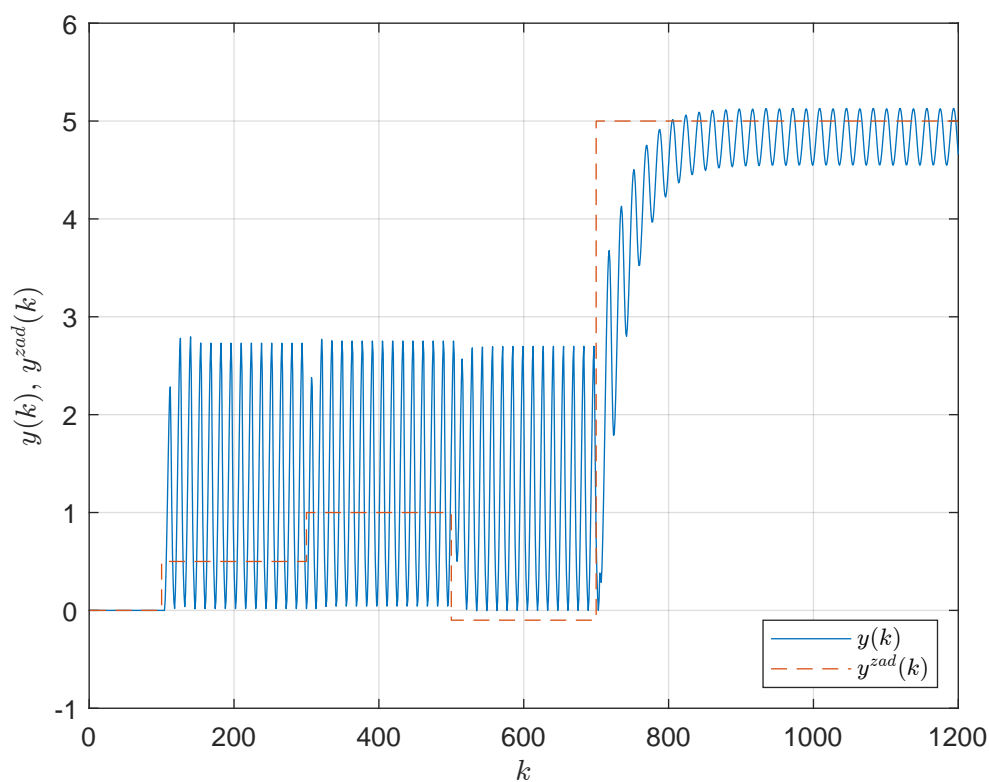


Rys. 6.1. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 2$

Zwiększenie  $n_r$  do wartości 4 pozwoliło na całkowitą eliminację przeregulowania, ale nawet dla mniejszych wartości było ono bardzo niewielkie.



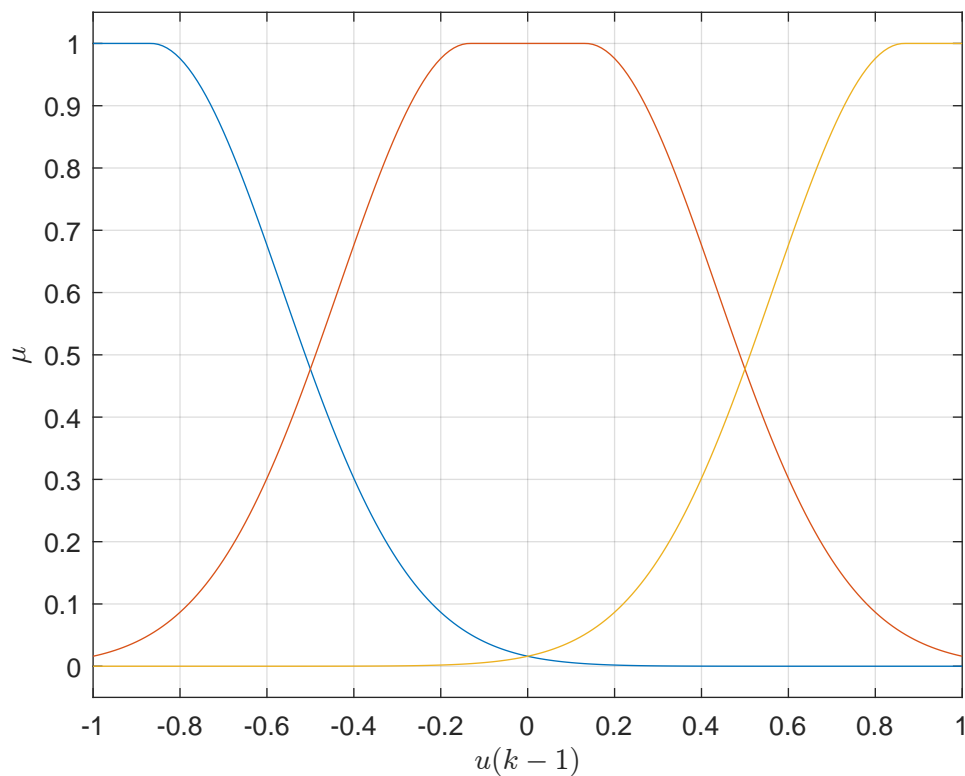
Rys. 6.2. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 2$  - sygnał sterujący



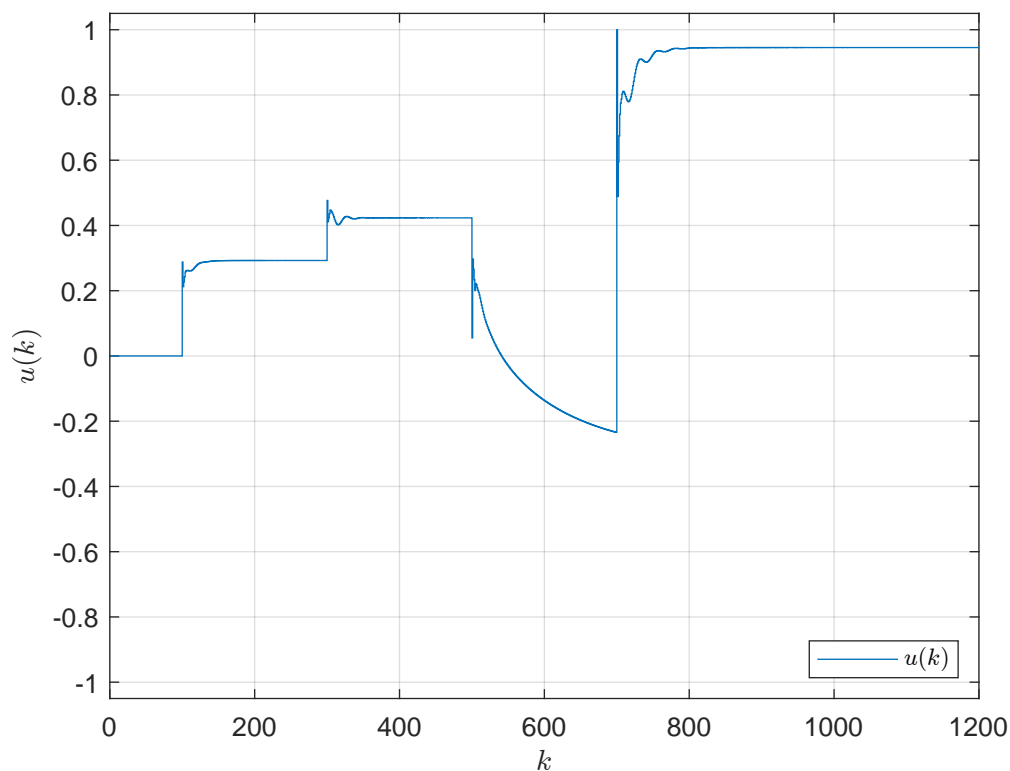
Rys. 6.3. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 2$  - sygnał wyjściowy i zadany

## 6.2. Funkcje przynależności trójkątne

Na początku sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 2$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 6.10. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.11 oraz 6.12. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 6,2368 \cdot 10^{33}$ .

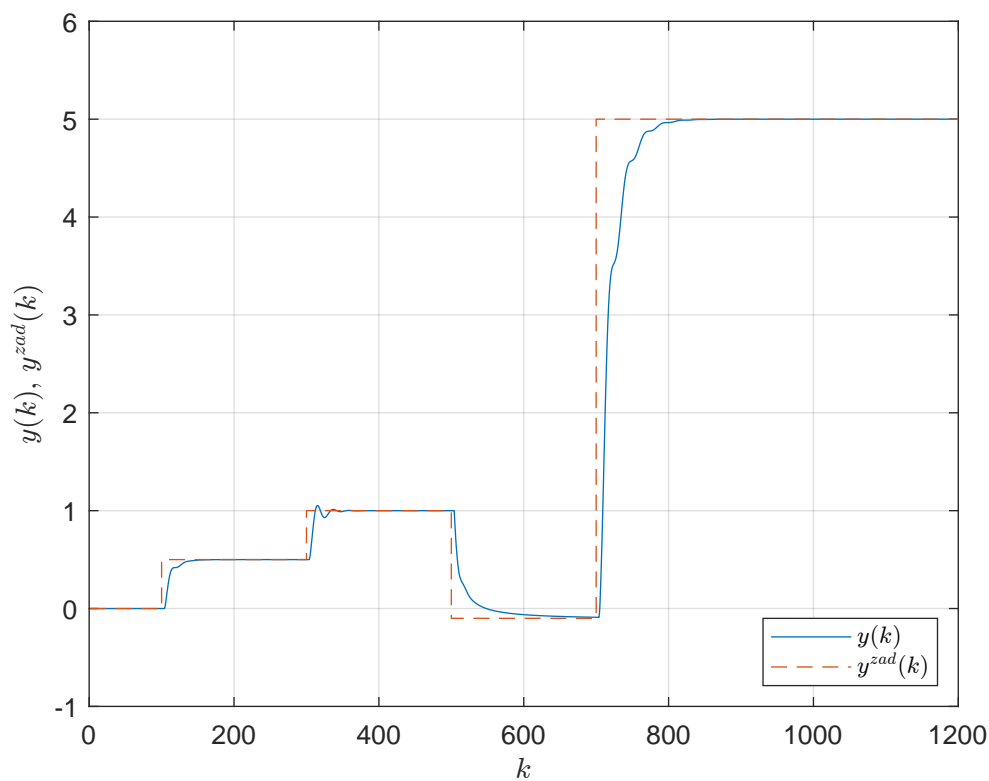


Rys. 6.4. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 3$

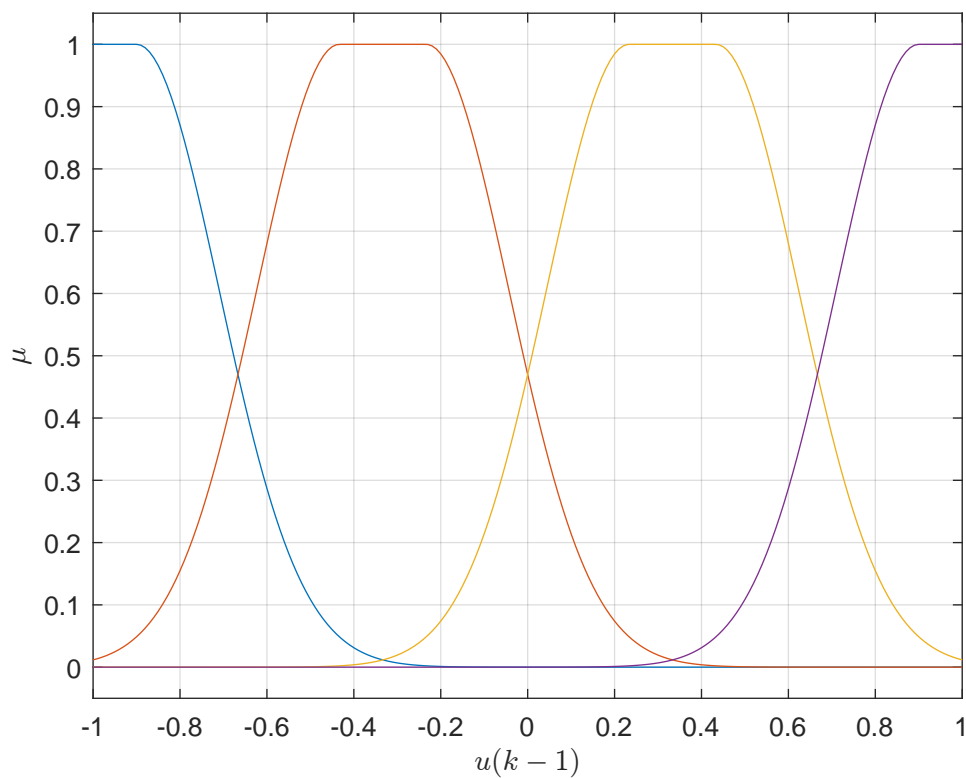


Rys. 6.5. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 3$  - sygnał sterujący

W kolejnym kroku zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 3$ . Funkcje przyna-



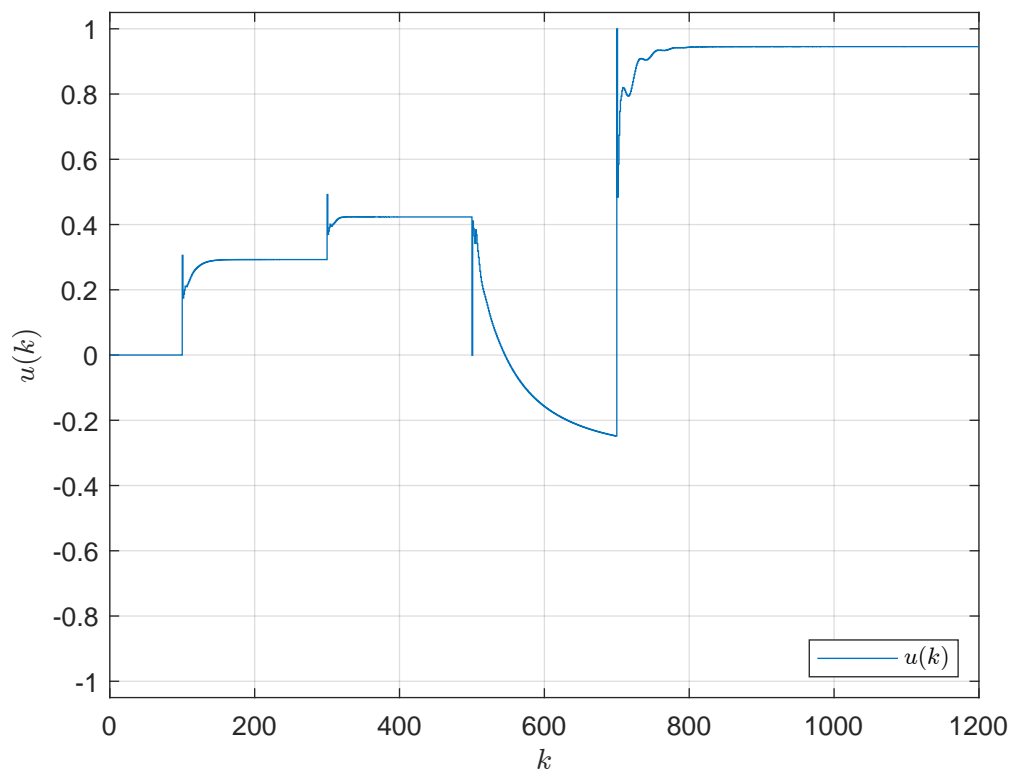
Rys. 6.6. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 3$  - sygnał wyjściowy i zadany



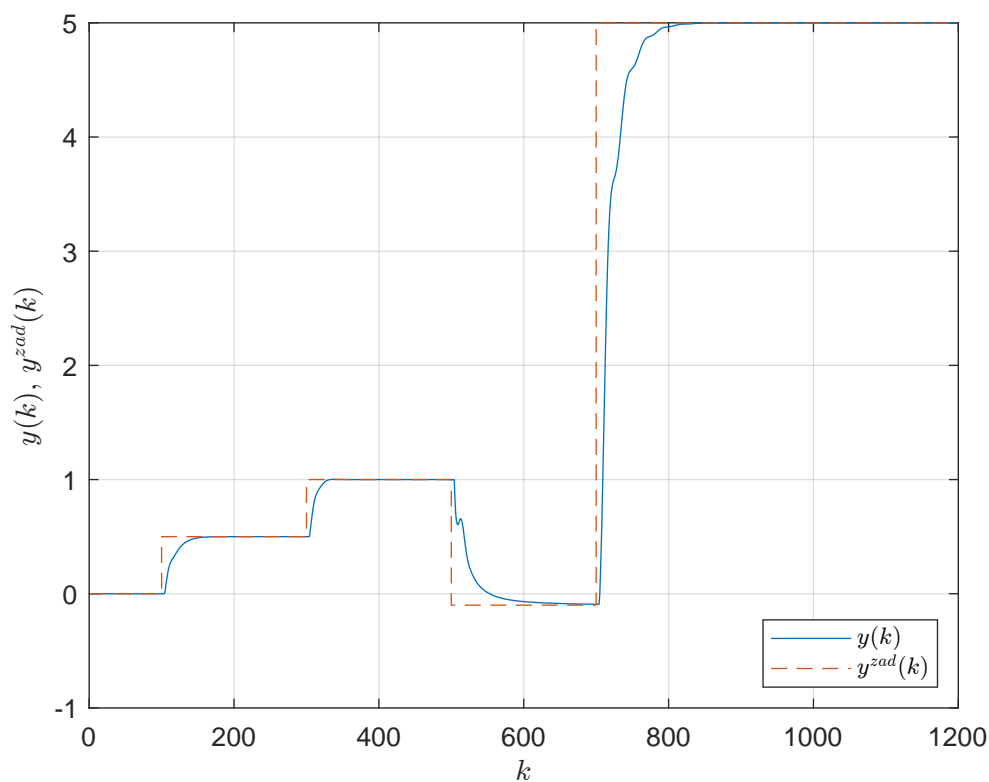
Rys. 6.7. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 4$

leżności są widoczne na rys. 6.13. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.14 oraz 6.15. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 330,9839$ .

Następnie sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 4$ . Funkcje przynależności są widoczne na

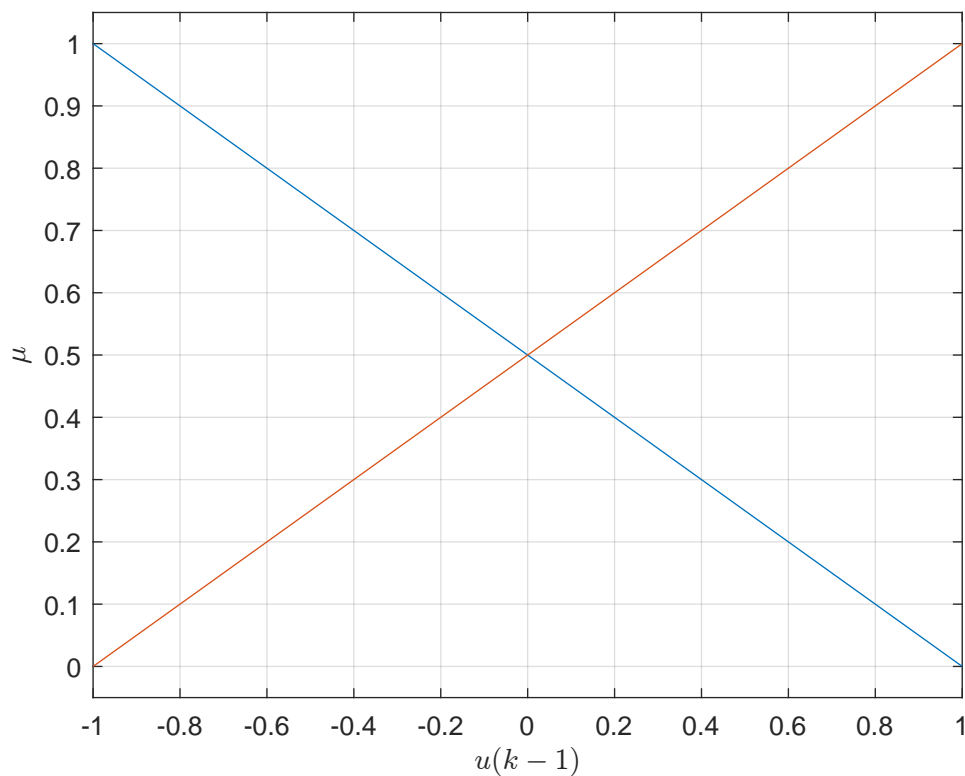


Rys. 6.8. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 4$  - sygnał sterujący

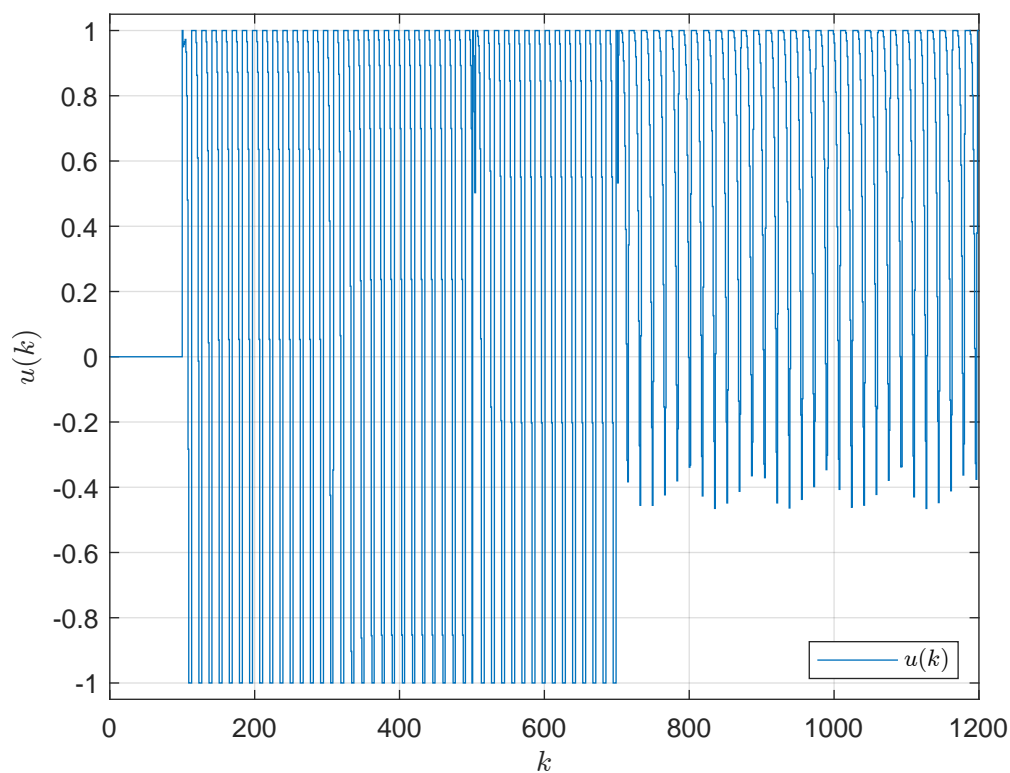


Rys. 6.9. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 4$  - sygnał wyjściowy i zadany

rys. 6.16. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.17 oraz 6.18. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 339,2637$ . Porównując wartości wskaźnika  $E$  można zauważyć, że zwiększenie liczby regulatorów lokalnych wpłynęło na nieznaczne pogorszenie jakości



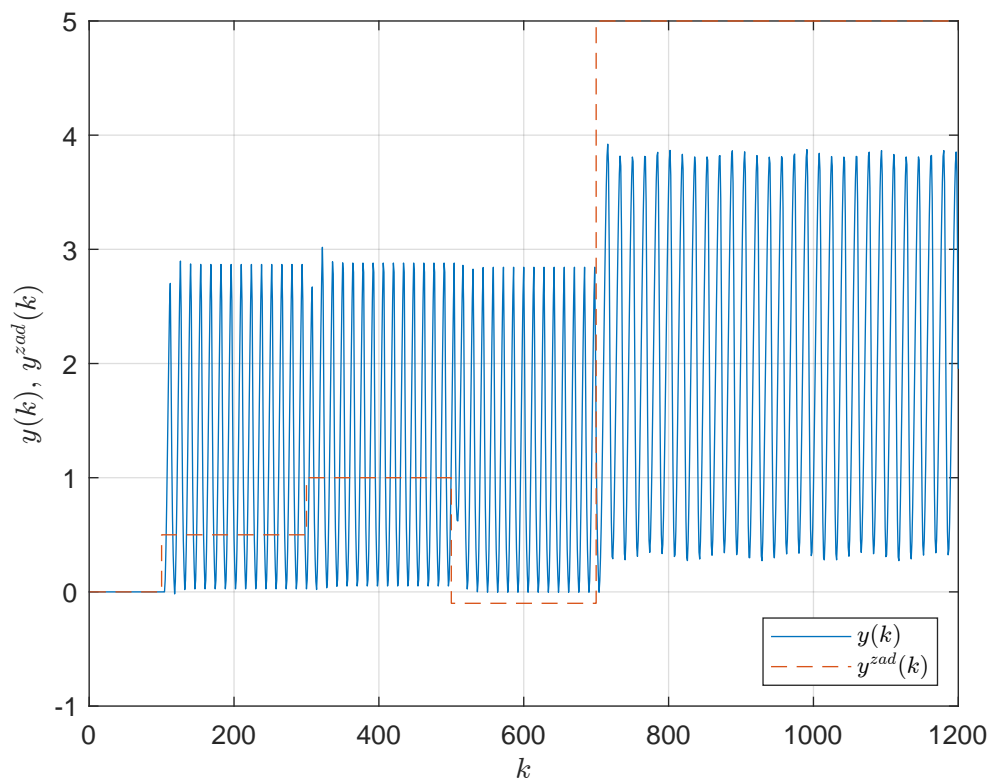
Rys. 6.10. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 2$



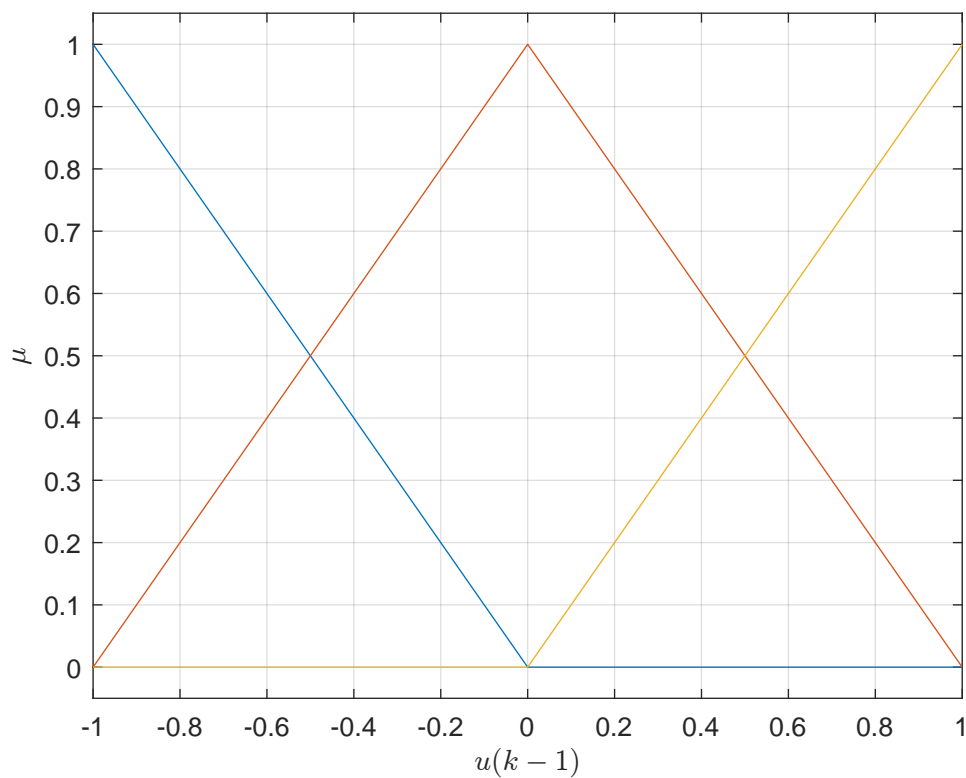
Rys. 6.11. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 2$  - sygnał sterujący



regulacji. W obu przypadkach wartość zadana jest osiągana dla różnych punktów pracy i nie

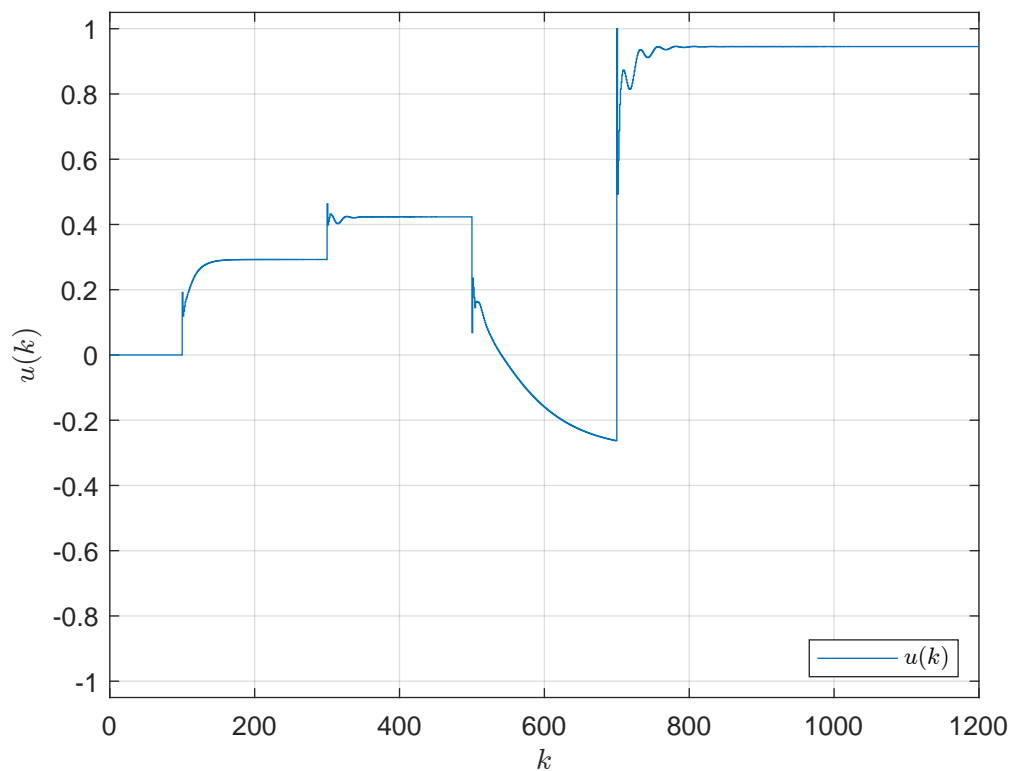


Rys. 6.12. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 2$  - sygnał wyjściowy i zadany

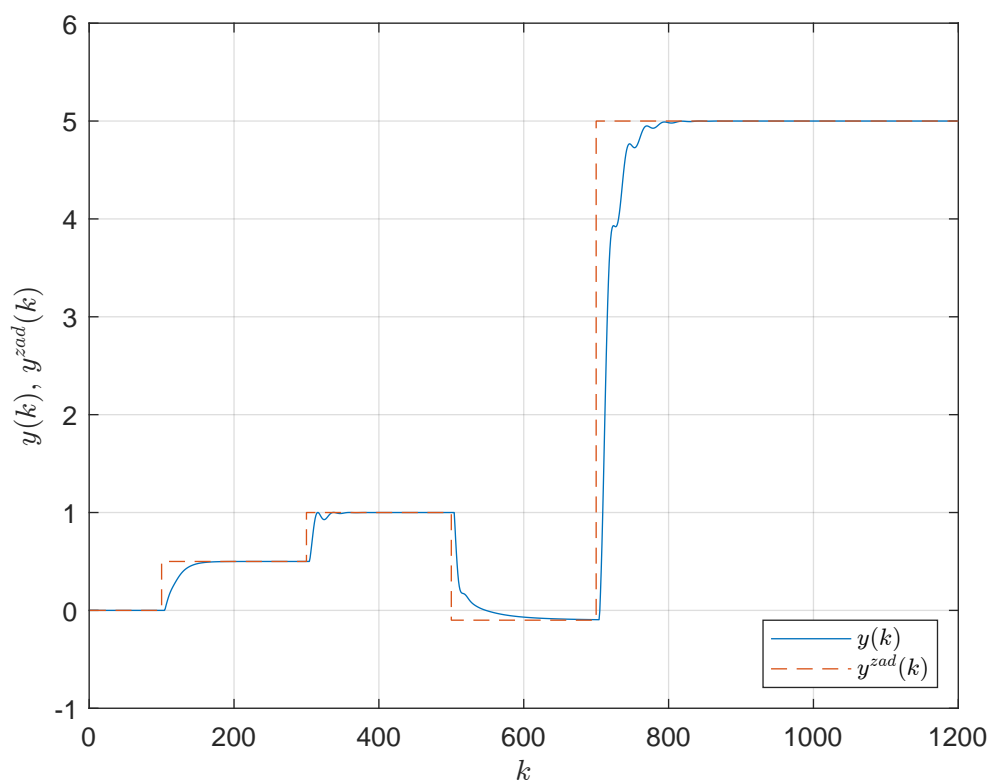


Rys. 6.13. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 3$

występuje przeregulowanie. Można także zaobserwować, że większa wartość  $n_r$  powoduje szybsze działanie całego systemu.



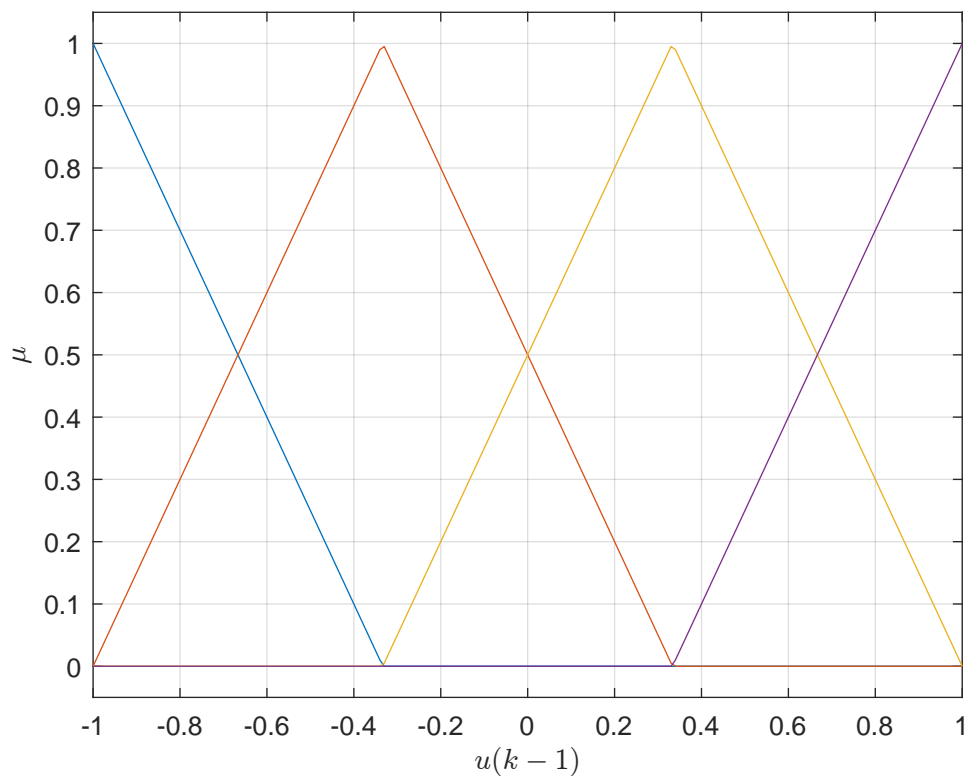
Rys. 6.14. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 3$  - sygnał sterujący



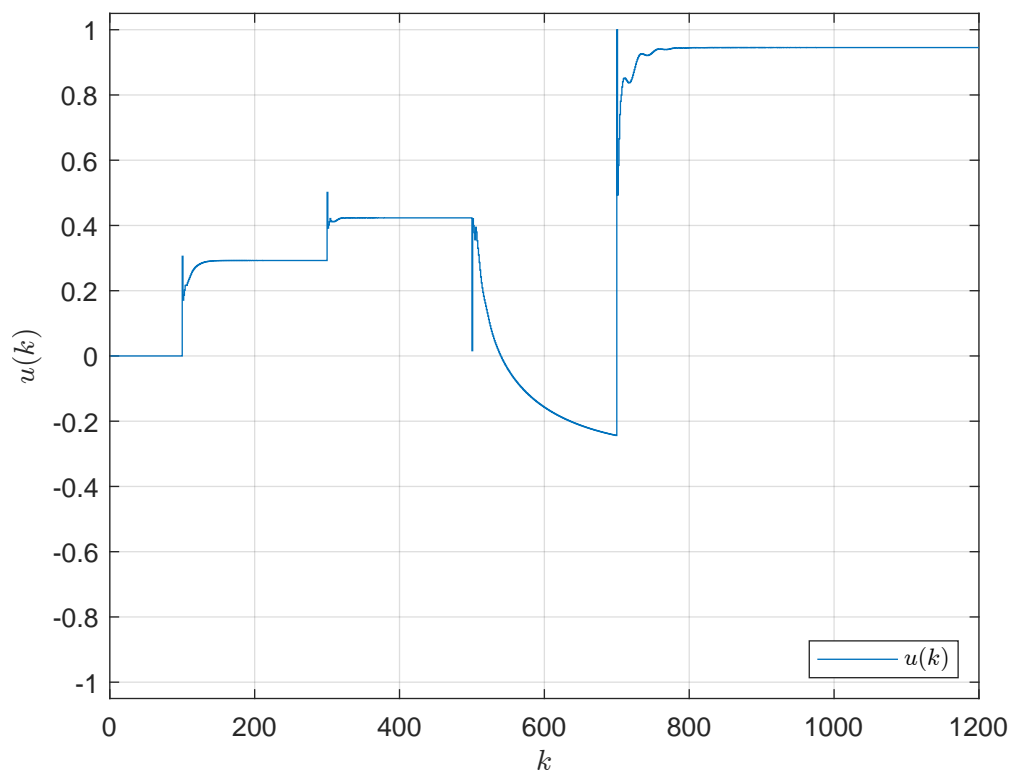
Rys. 6.15. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 3$  - sygnał wyjściowy i zadany

### 6.3. Funkcje przynależności trapezoidalne

Na początku sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 2$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 6.19. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.20 oraz 6.21. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 2,0152 \cdot 10^3$ .

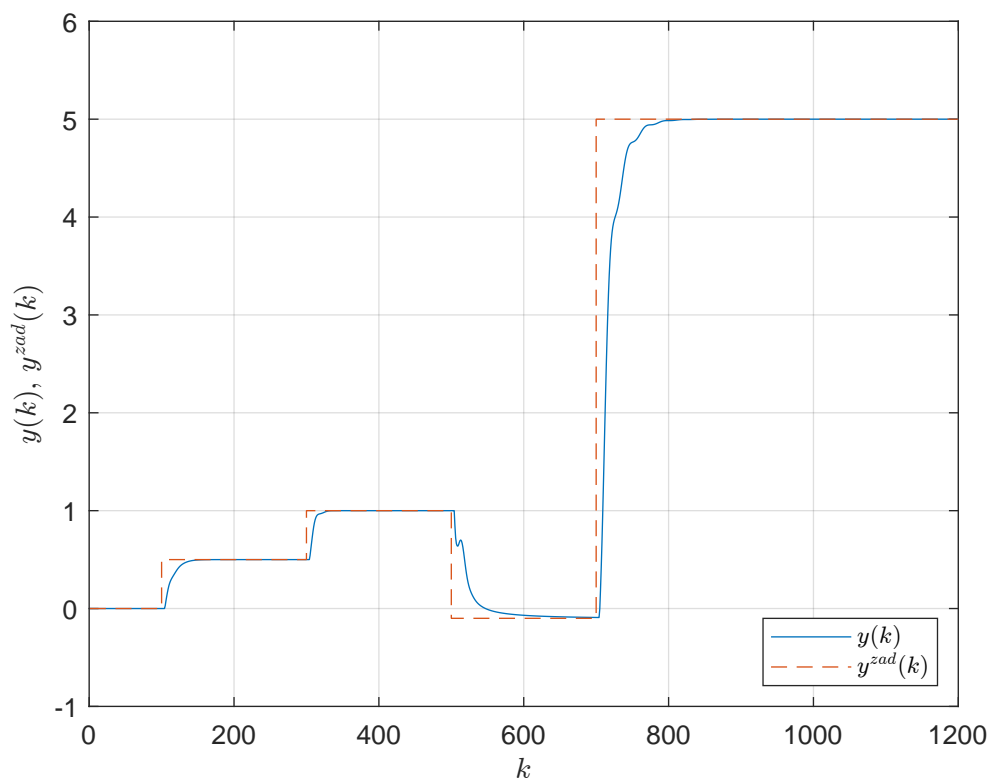


Rys. 6.16. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 4$

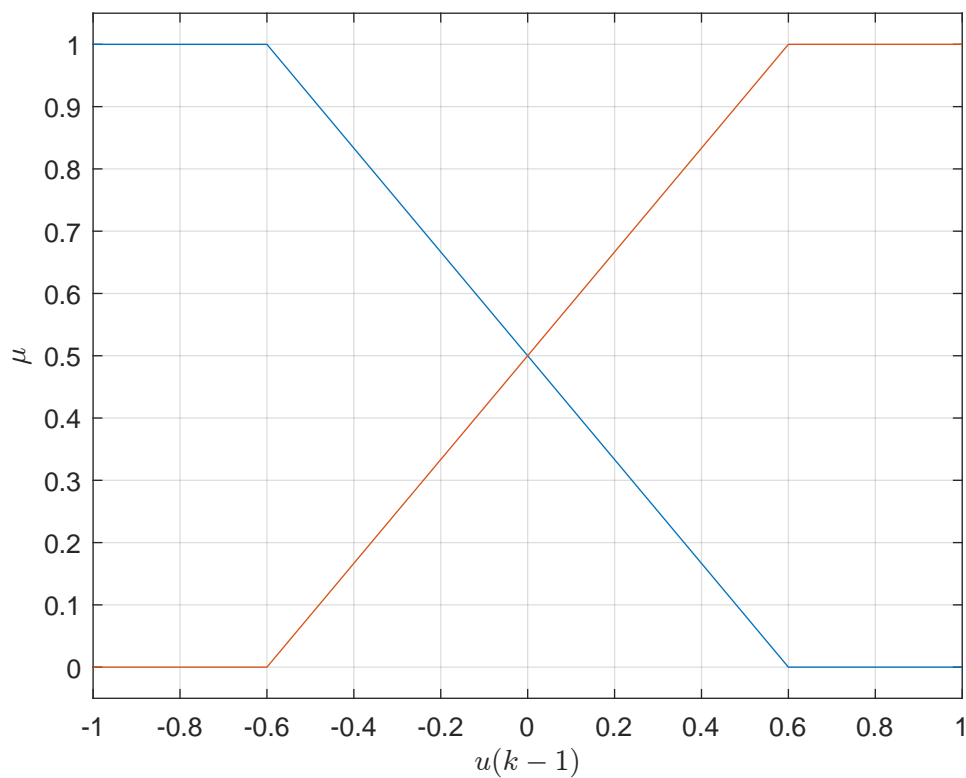


Rys. 6.17. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 4$  - sygnał sterujący

W kolejnym kroku zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 3$ . Funkcje przyna-



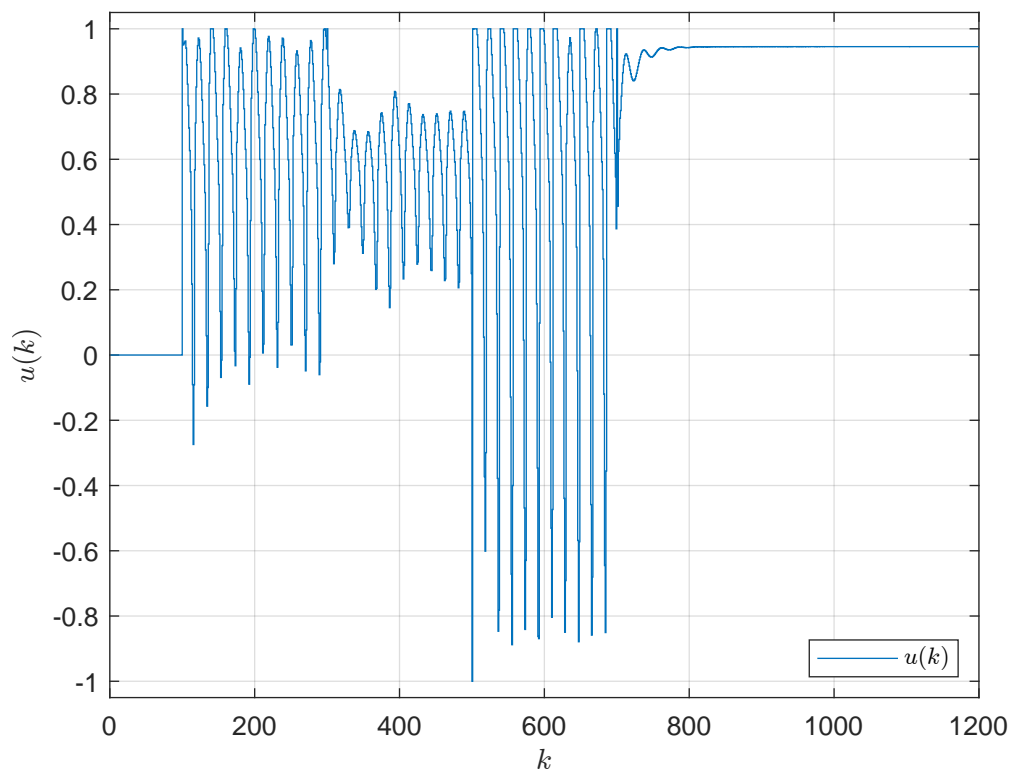
Rys. 6.18. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 4$  - sygnał wyjściowy i zadany



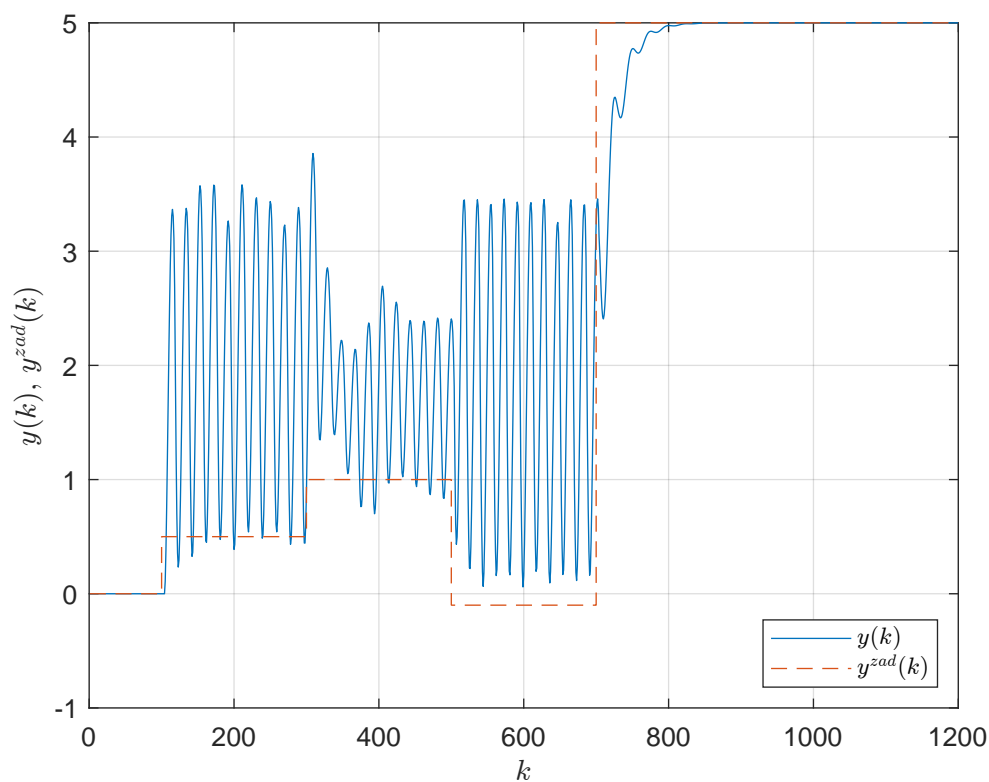
Rys. 6.19. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 2$

leżności są widoczne na rys. 6.22. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.23 oraz 6.24. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 385,6358$ .

Następnie sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 4$ . Funkcje przynależności są widoczne na

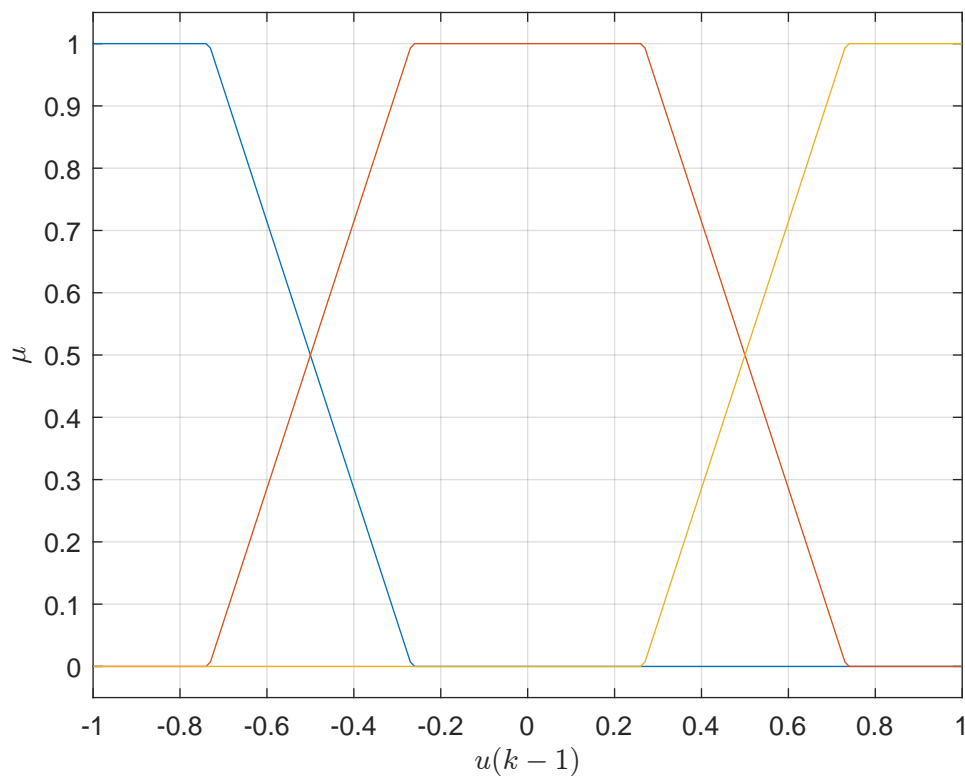


Rys. 6.20. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 2$  - sygnał sterujący

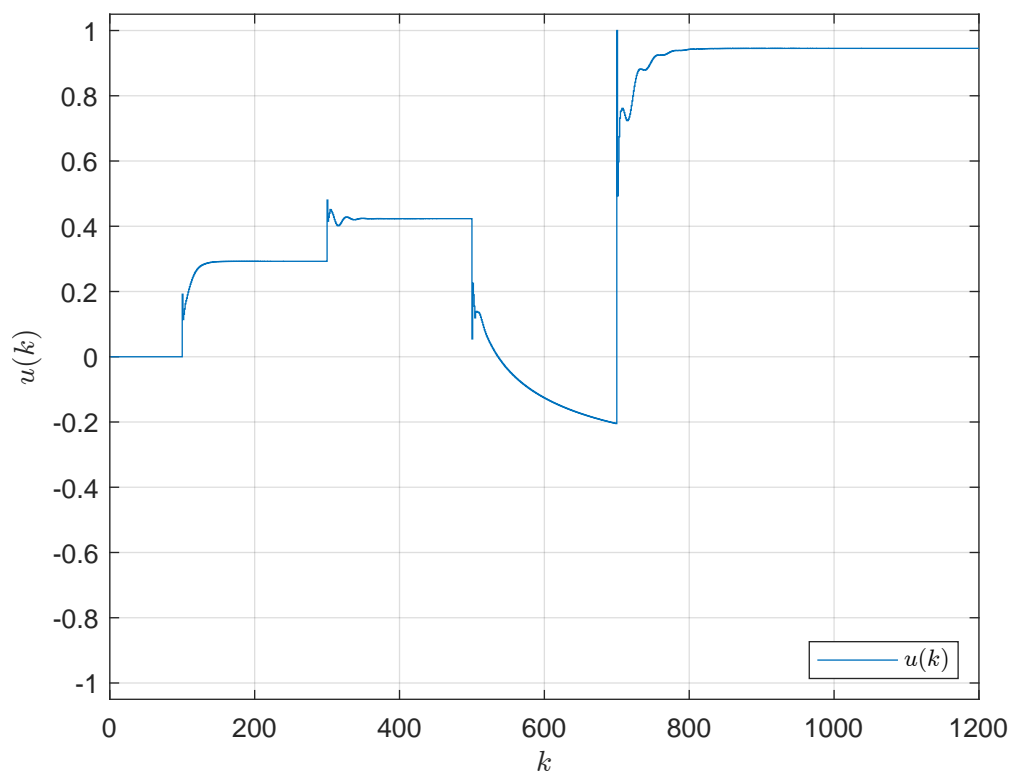


Rys. 6.21. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 2$  - sygnał wyjściowy i zadany

rys. 6.25. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 6.26 oraz 6.27. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 368,7729$ . Porównując wartości wskaźnika  $E$  można zauważyć, że zwiększenie liczby regulatorów lokalnych wpłynęło na poprawę jakości regulacji.



Rys. 6.22. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 3$



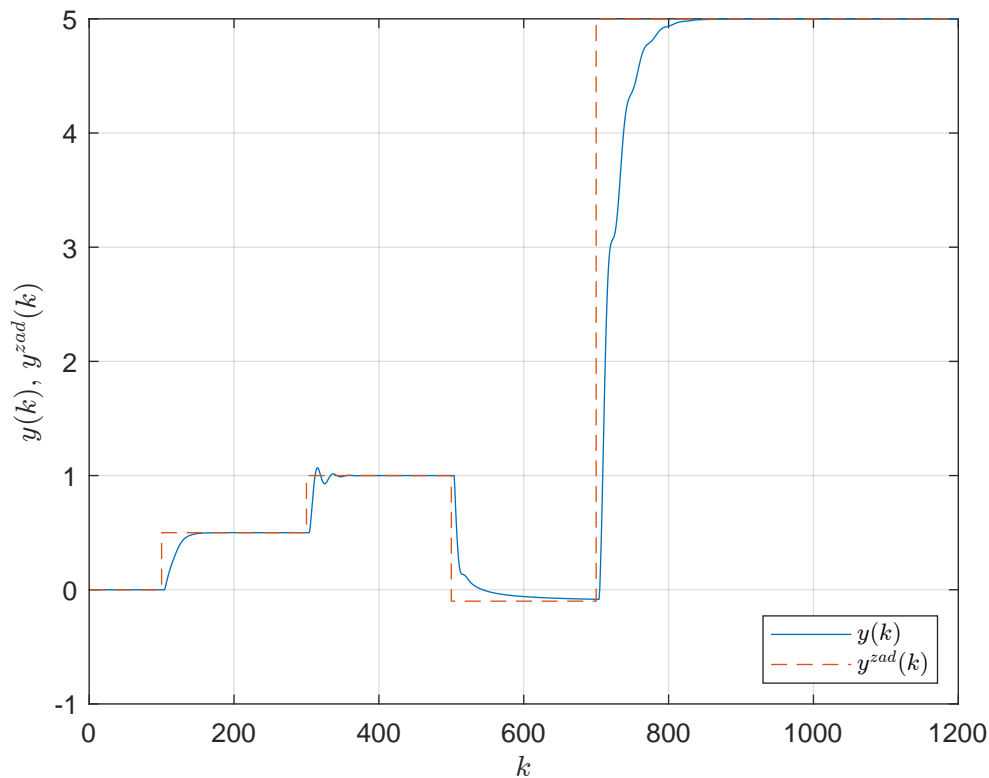
Rys. 6.23. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 3$  - sygnał sterujący

W obu przypadkach wartość zadana jest osiągana dla różnych punktów pracy. Zwiększenie  $n_r$  do wartości 4 pozwoliło na całkowitą eliminację przeregulowania, ale nawet dla mniejszych wartości było ono bardzo niewielkie. Można także zaobserwować, że większa wartość  $n_r$  powoduje szybsze działanie całego systemu.

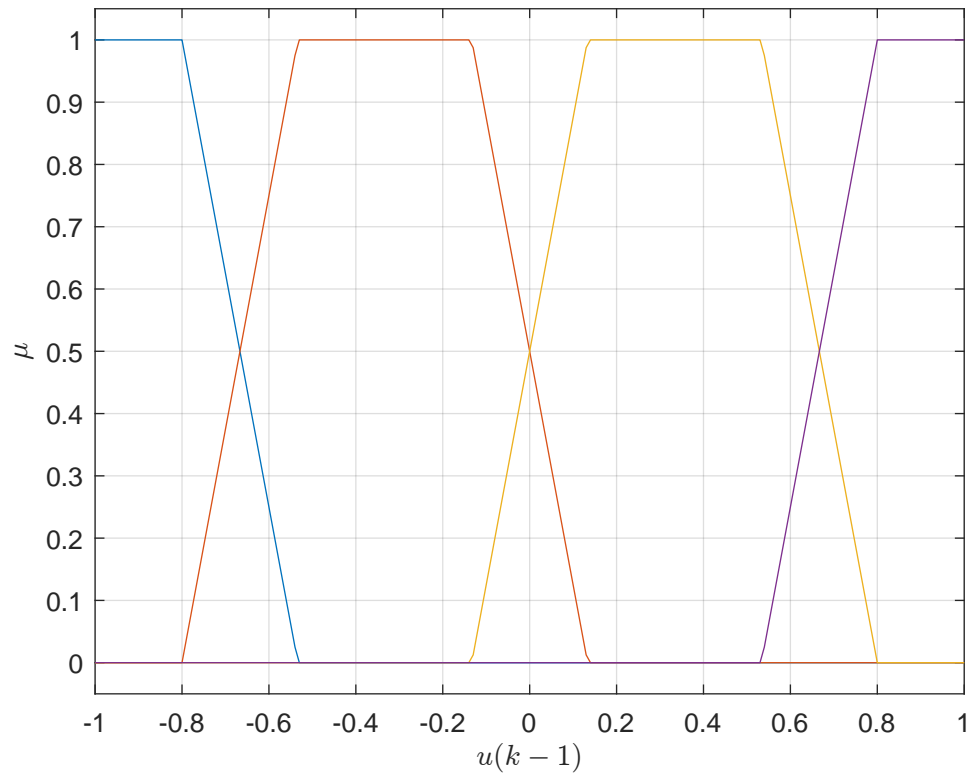
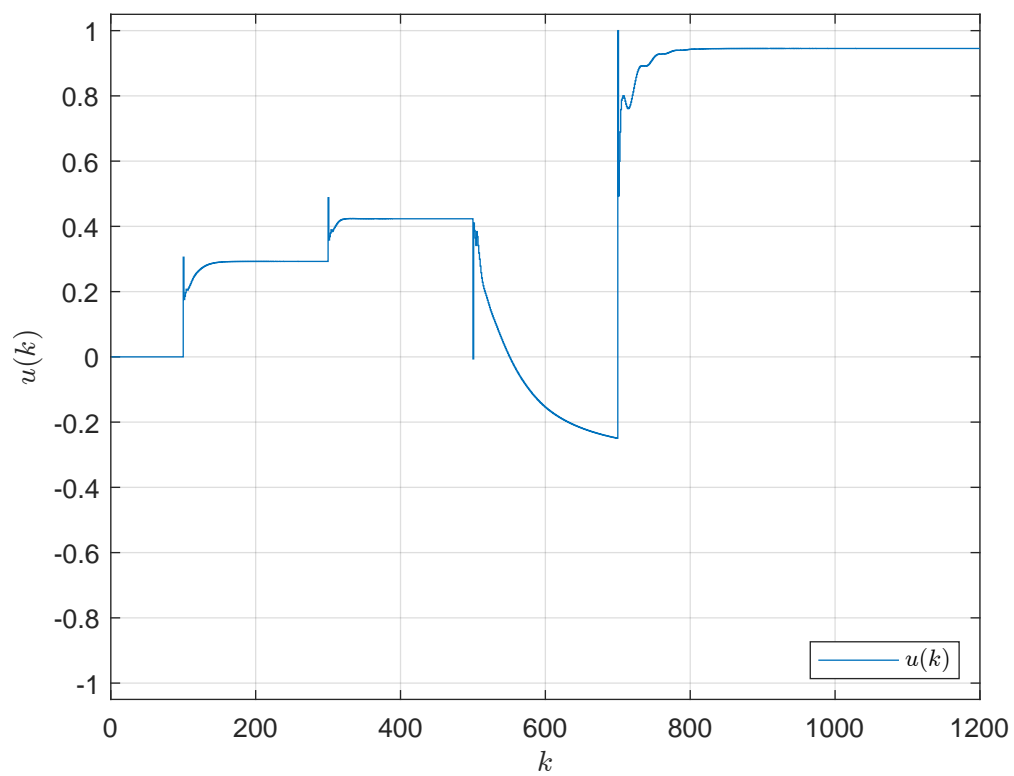
#### 6.4. Wnioski

Pod względem wskaźnika jakości najlepszą regulację zapewniły regulatory, dla których funkcje przynależności miały kształty trójkątne. Porównując regulatory na podstawie samych tylko przebiegów sygnału sterującego oraz wyjściowego, ciężko było by jednoznacznie wskazać, które rozwiązanie jest najlepsze. Po odpowiednim dostrojeniu regulatorów lokalnych wszystkie układy działały satysfakcjonująco - wartości zadane były osiągnięte, przeregulowanie, jeśli występowało, było niewielkie i układ działał szybko. Liczba regulatorów równa  $n_r = 4$  będzie najlepszym kompromisem między złożonością algorytmu a uzyskiwaną dokładnością działania.

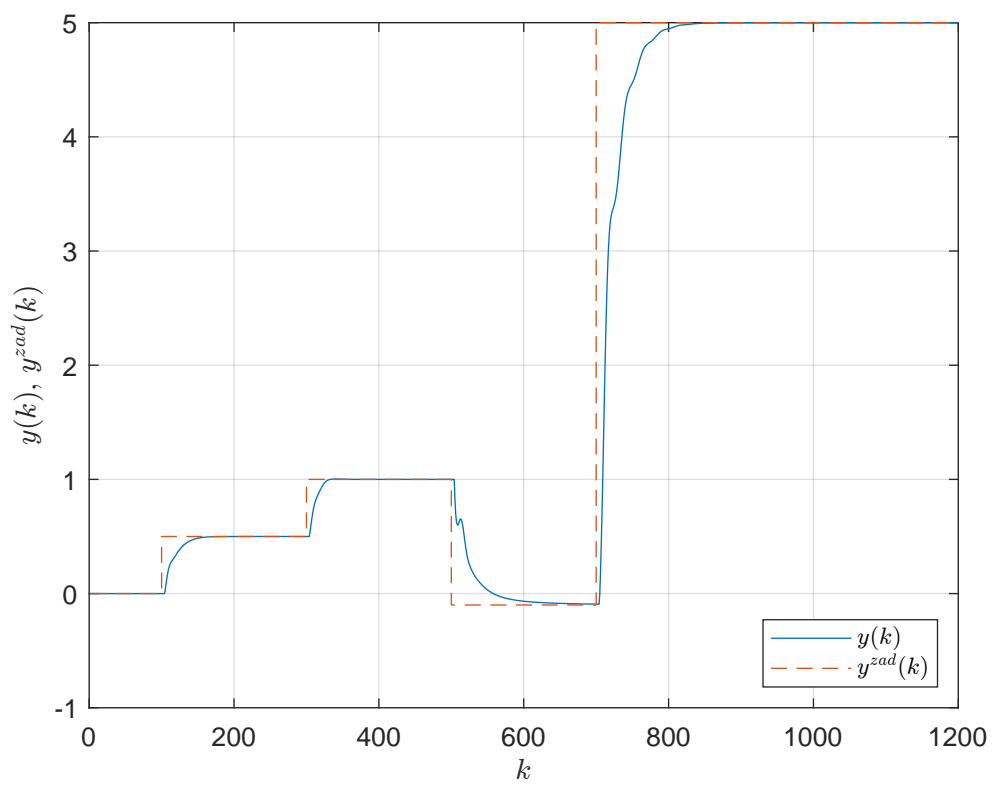
Największym problemem przy implementacji rozmytych regulatorów PID jest konieczność dostrojenia każdego regulatora lokalnego. Wraz ze wzrostem liczby używanych funkcji przynależności, wzrasta również liczba regulatorów PID, które trzeba skalibrować. Dlatego często stosuje się rozmyte regulatory DMC, których w zasadzie nie trzeba stroić, a jedynie wystarczy zebrać lokalne odpowiedzi skokowe.



Rys. 6.24. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 3$  - sygnał wyjściowy i zadany

Rys. 6.25. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 4$ Rys. 6.26. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 4$  - sygnał sterujący





Rys. 6.27. Regulator rozmyty PID dla  $n_r = 4$  - sygnał wyjściowy i zadany

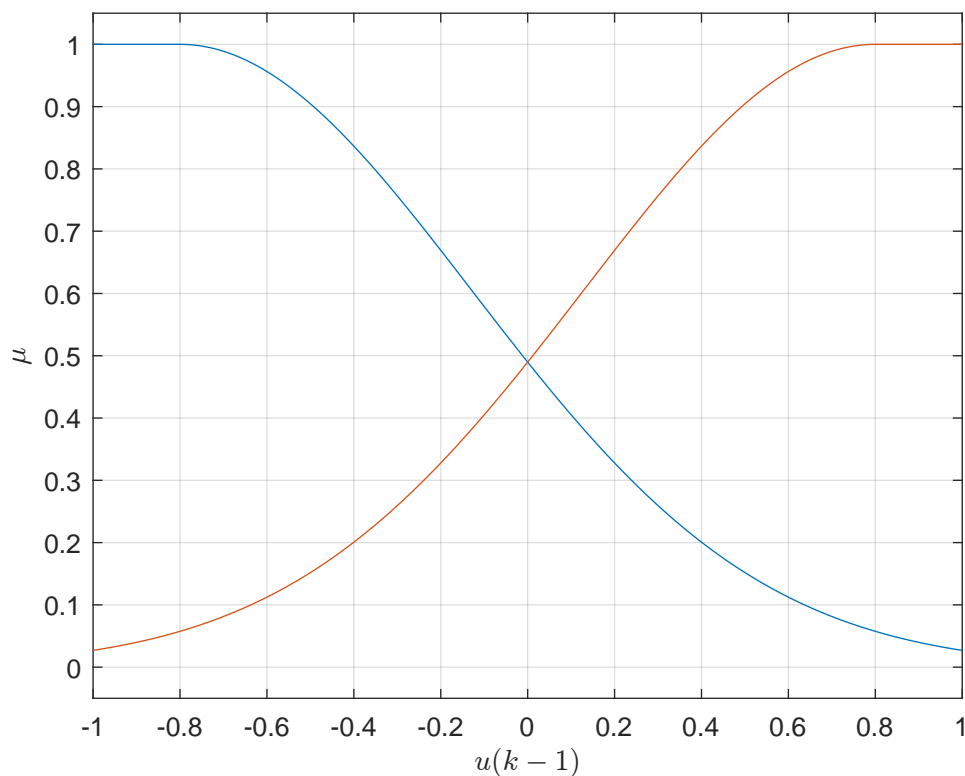
## 7. Regulacja za pomocą rozmytych regulatorów DMC

Przetestowaliśmy działanie rozmytego regulatora DMC dla różnych funkcji przynależności: Gaussa, trójkątnych oraz trapezoidalnych. Ponadto dla każdej z tych grup funkcji przeprowadziliśmy eksperymenty dla różnej liczby regulatorów lokalnych  $n_r = 2, 3, 4$ . Dla funkcji Gaussa sprawdziliśmy także działanie układu dla  $n_r = 5$ .

### 7.1. Funkcje przynależności Gaussa

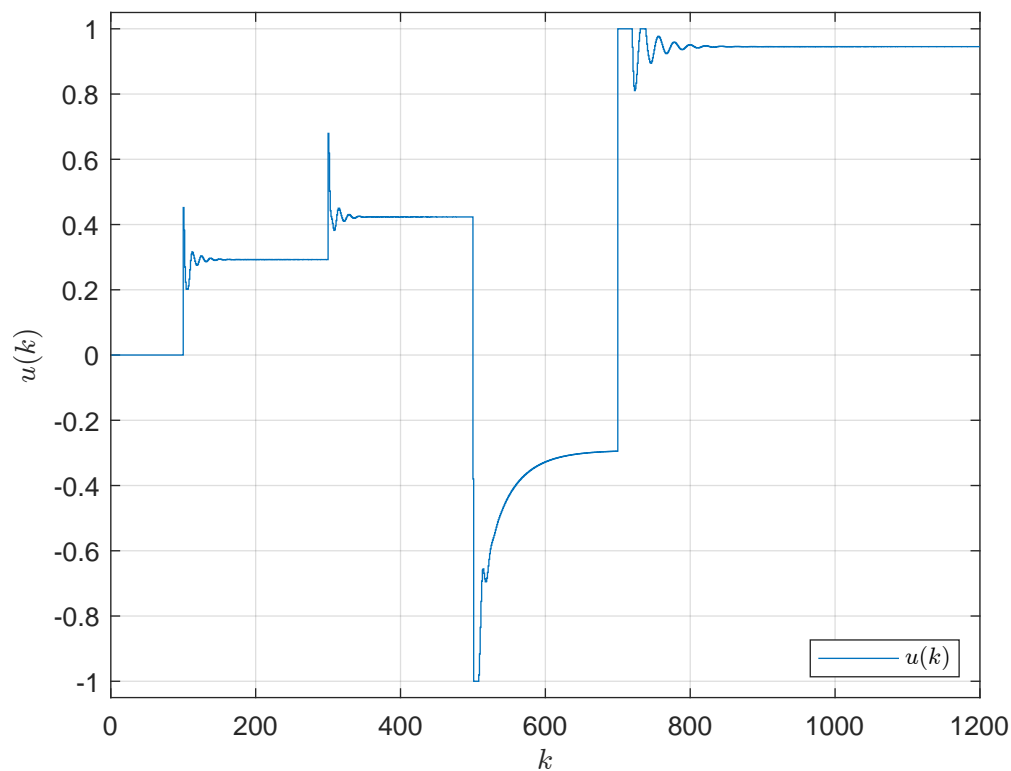
Na początku sprawdziliśmy działanie algorytmu dla  $n_r = 2$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.1. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.2 oraz 7.3. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 261,3388$ . Układ działa dobrze i szybko, wartość zadana jest osiągana na wyjściu dla różnych wartości skoków  $y^{\text{zad}}$ . Jedynie dla ostatniego skoku wartości zadanej do  $y^{\text{zad}} = 5$  występują oscylacje na wyjściu obiektu. Mają one jednak charakter gasnący i nie wpływają na rozregulowanie procesu.

Następnie zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 3$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.4. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.5 oraz 7.6. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 270,7911$ . Na podstawie rys. 7.6 można zaobserwować, że zwiększenie liczby regulatorów spowodowało

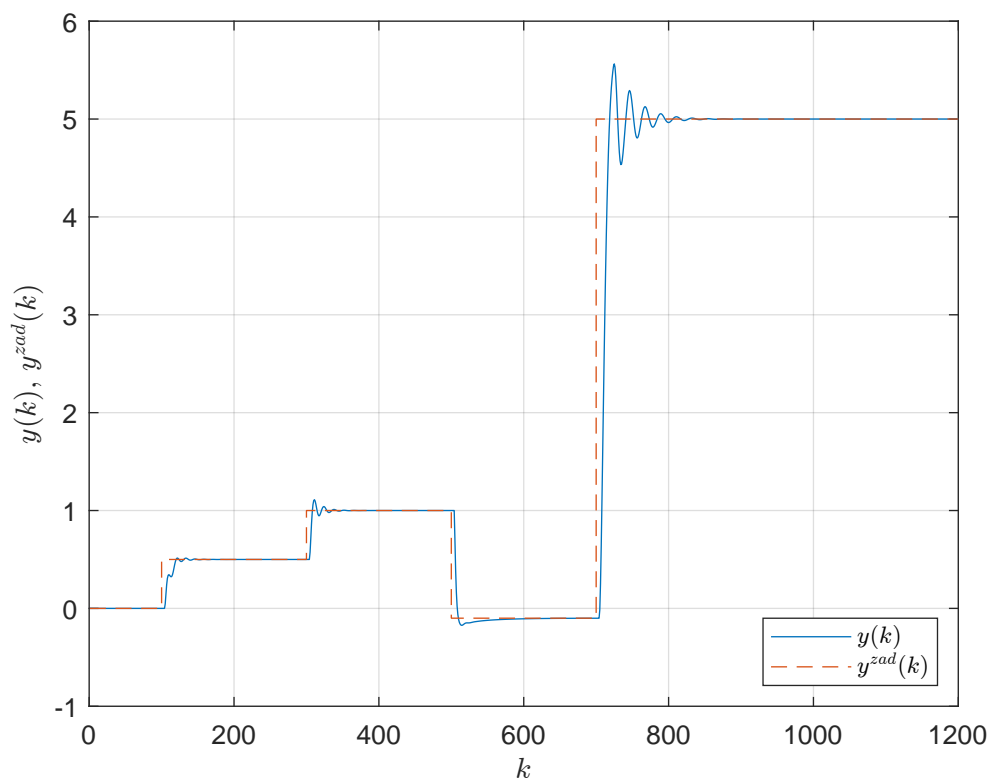


Rys. 7.1. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 2$

nieznaczące pogorszenie jakości regulacji. Zarówno wskaźnik jakości  $E$  uległ pogorszeniu, jak i pojawiły się oscylacje na wyjściu, tym razem przy dwóch pierwszych skokach wartości zadanej. Oscylacje pojawiły się także w przebiegu sygnału sterującego widocznym na rys. 7.5.

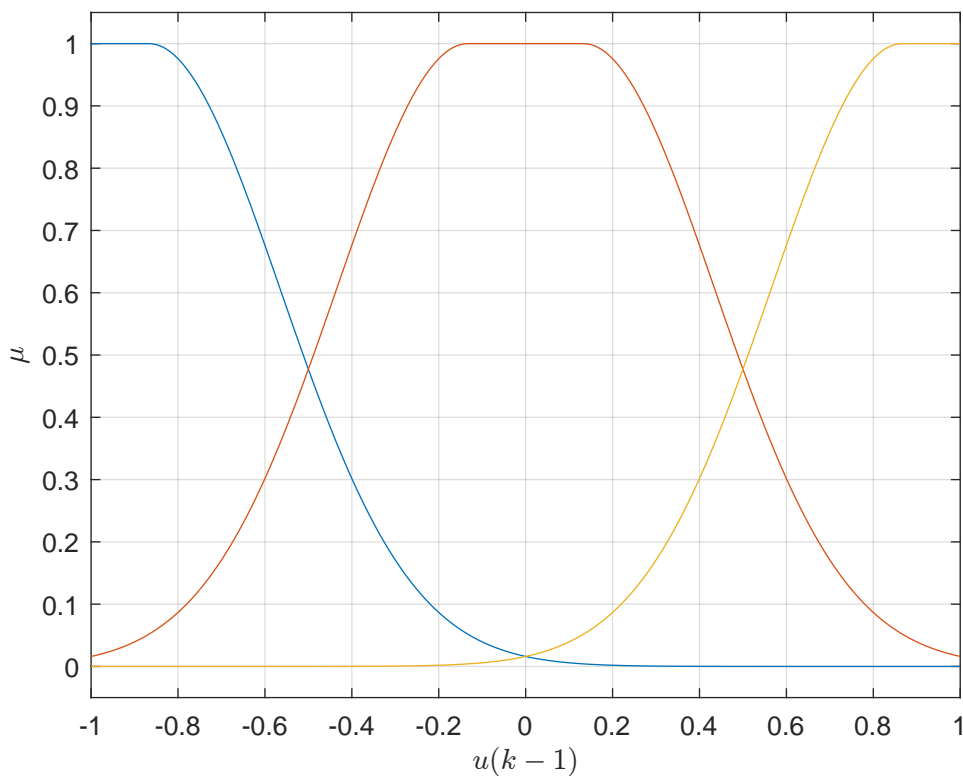


Rys. 7.2. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 2$  - sygnał sterujący

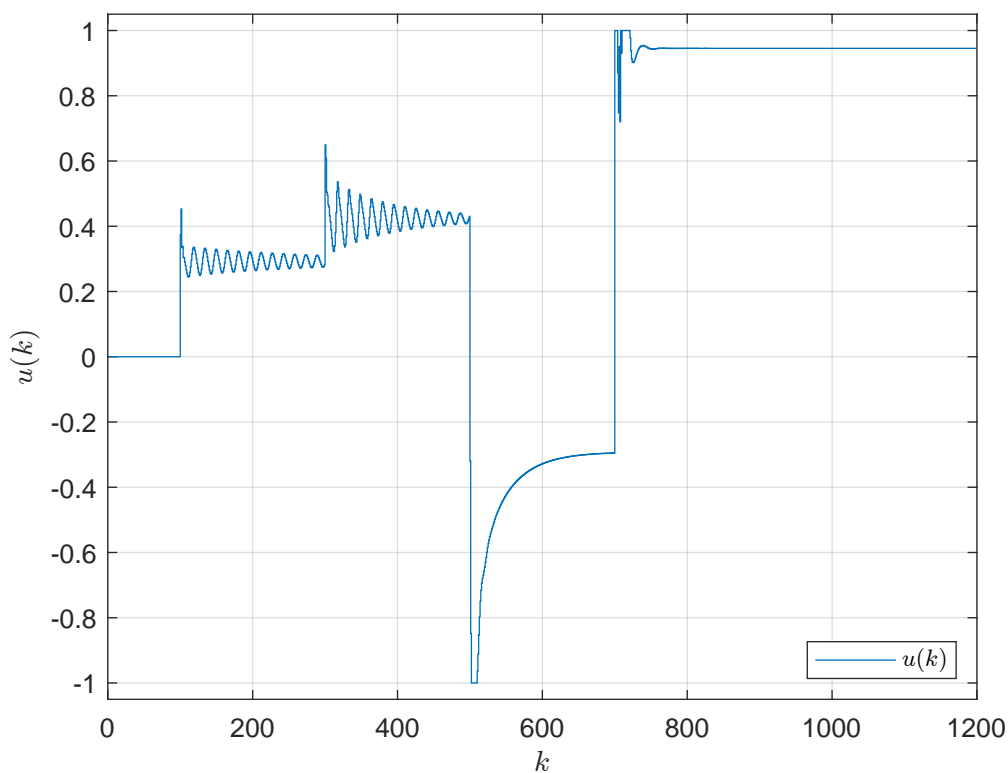


Rys. 7.3. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 2$  - sygnał wyjściowy i zadany

W kolejnym kroku zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 4$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.7. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.8 oraz 7.9. Tym razem otrzymana wartości wskaźnika jakości wyniosła



Rys. 7.4. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 3$



Rys. 7.5. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 3$  - sygnał sterujący

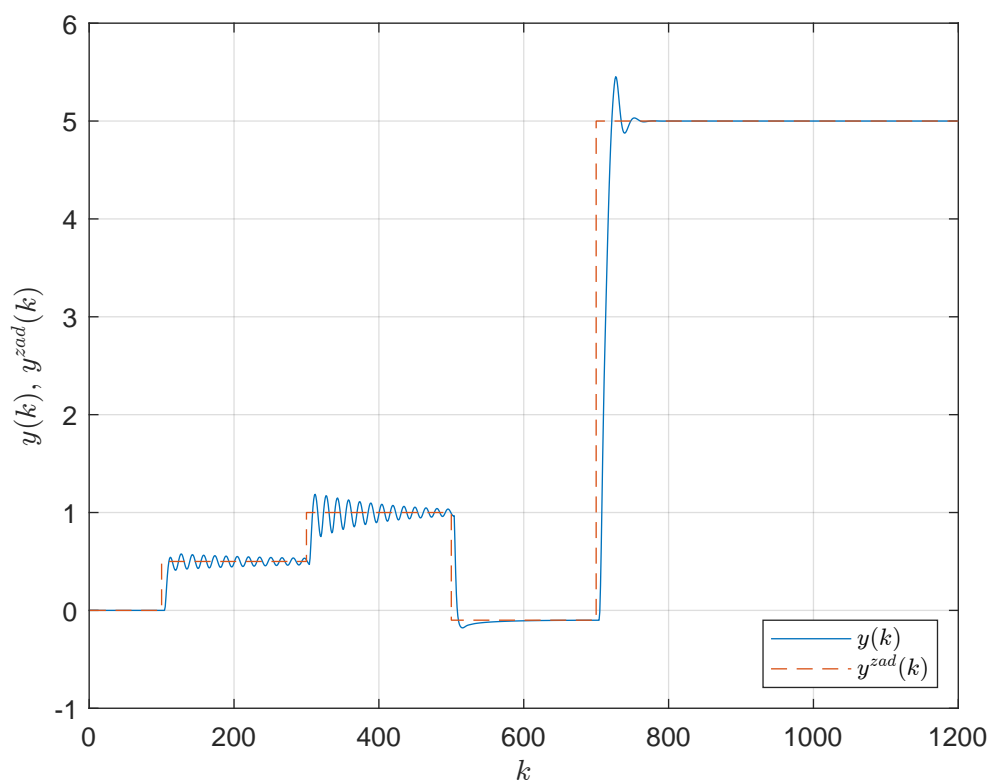
$E = 292,7912$ . Zatem jest to wartość gorsza od tej, jaką uzyskano dla mniejszej liczby  $n_r$ . Jednak tym razem w żadnym przypadku nie występują oscylacje ani na wyjściu obiektu, ani w przebiegu sygnału sterującego. Układ działa jeszcze szybciej niż poprzednio, a przeregulowanie jest jeszcze mniejsze.

Na koniec zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 5$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.10. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.11 oraz 7.12. Otrzymana wartość wskaźnika jakości wyniosła  $E = 313,5469$ . Oznacza to, że ponownie nastąpiło niewielkie pogorszenie jakości regulacji pod kątem oceny wskaźnika  $E$ . Jednak na podstawie przebiegu sygnału wyjściowego widocznego na rys. 7.12 można zauważyć, że dla dwóch pierwszych skoków wartości zadanej przeregulowanie w ogóle nie występuje, a dla kolejnych dwóch jest jeszcze mniejsze niż dla  $n_r = 4$ . Generowany sygnał sterujący jest stabilny, układ działa bardzo szybko.

## 7.2. Funkcje przynależności trójkątne

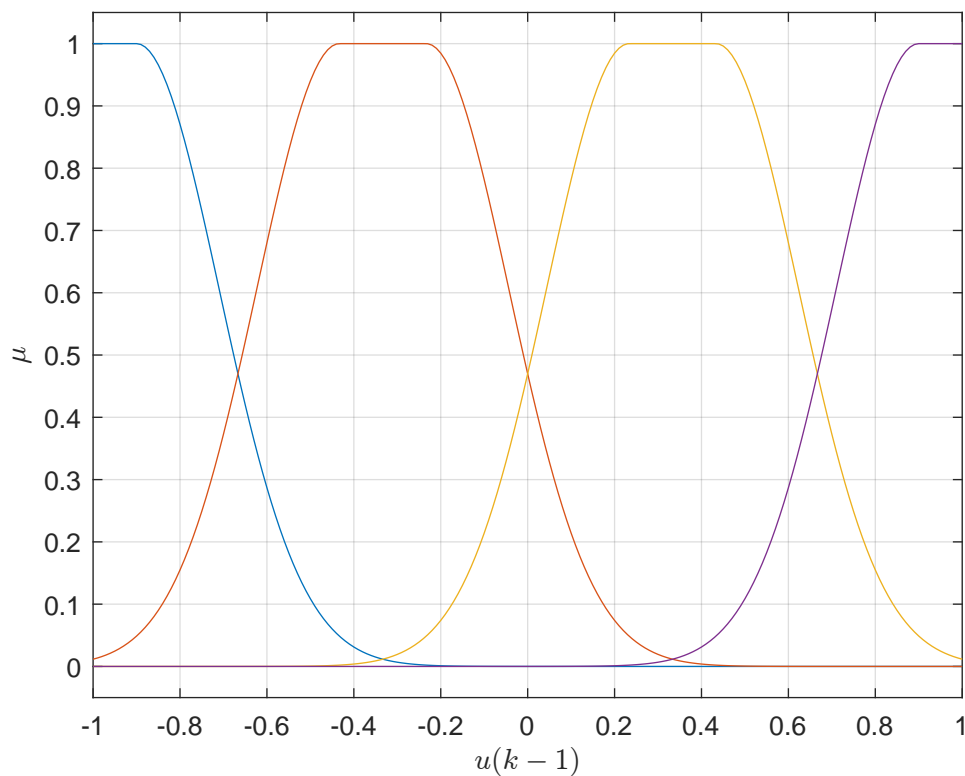
Na początku sprawdziliśmy działanie algorytmu dla  $n_r = 2$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.13. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.14 oraz 7.15. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 262,6995$ , czyli jest nieznacznie większa niż dla funkcji Gaussa zastosowanych dla tej samej liczby  $n_r = 2$ . Dla większości wykonywanych skoków występują oscylacje, zarówno w sygnale wyjściowym jak i wejściowym. Mają one jednak charakter gasnący i ostatecznie wartość zadana jest osiągnięta.

Następnie zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 3$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.16. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.17 oraz 7.18. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 271,5334$ , czyli uległa nieznacznemu pogorszeniu po zwiększeniu liczby zastosowanych funkcji przynależności. Oscylacje jednak są dużo słabsze niż poprzednio, wartość zadana jest osiągnięta szybciej.

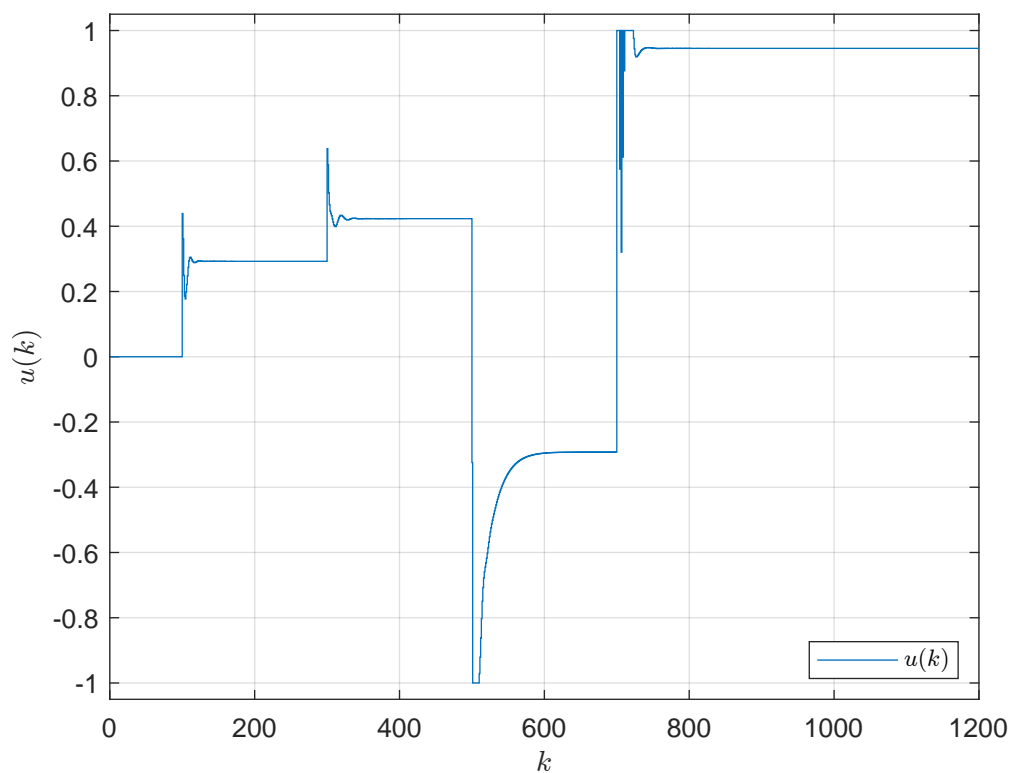


Rys. 7.6. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 3$  - sygnał wyjściowy i zadany

W kolejnym kroku sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 4$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.19. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.20 oraz 7.21. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 294,6215$ ,

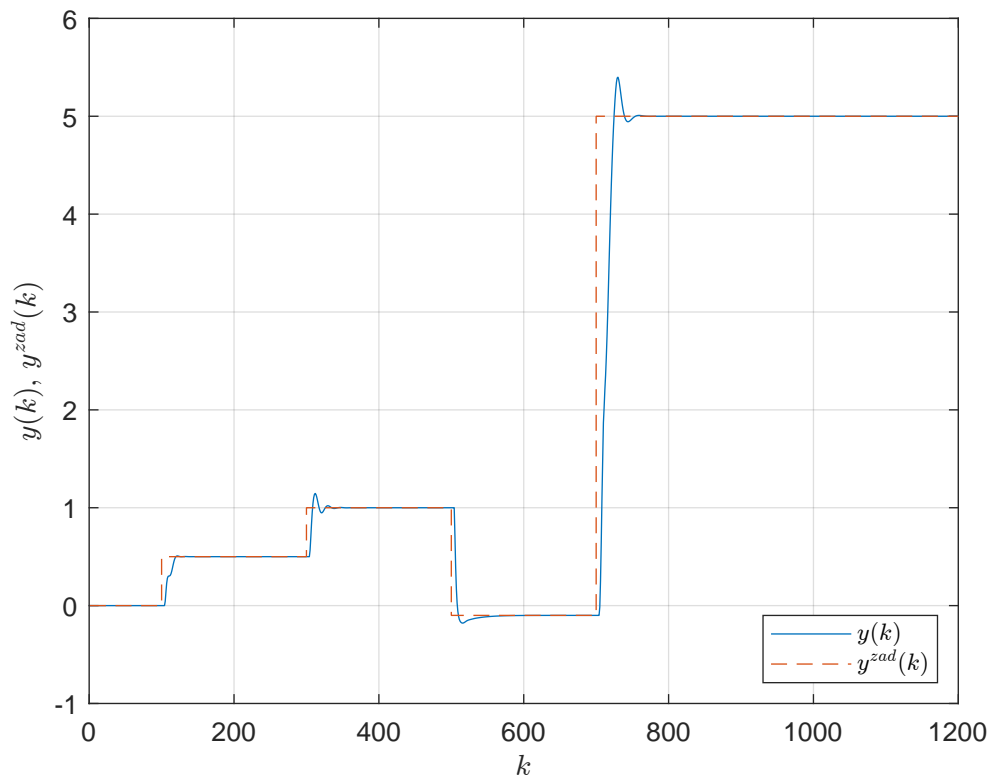


Rys. 7.7. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 4$

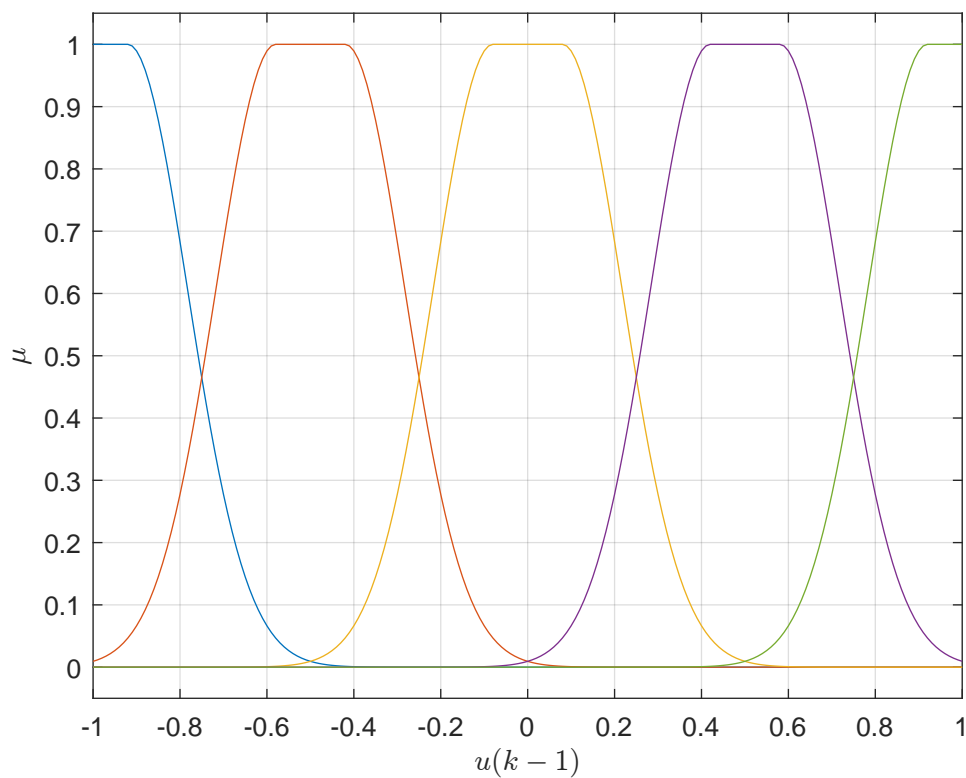


Rys. 7.8. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 4$  - sygnał sterujący

czyli ponownie uległa pogorszeniu. Tym razem jednak oscylacje w ogóle nie występują, a układ działa bardzo sprawnie.



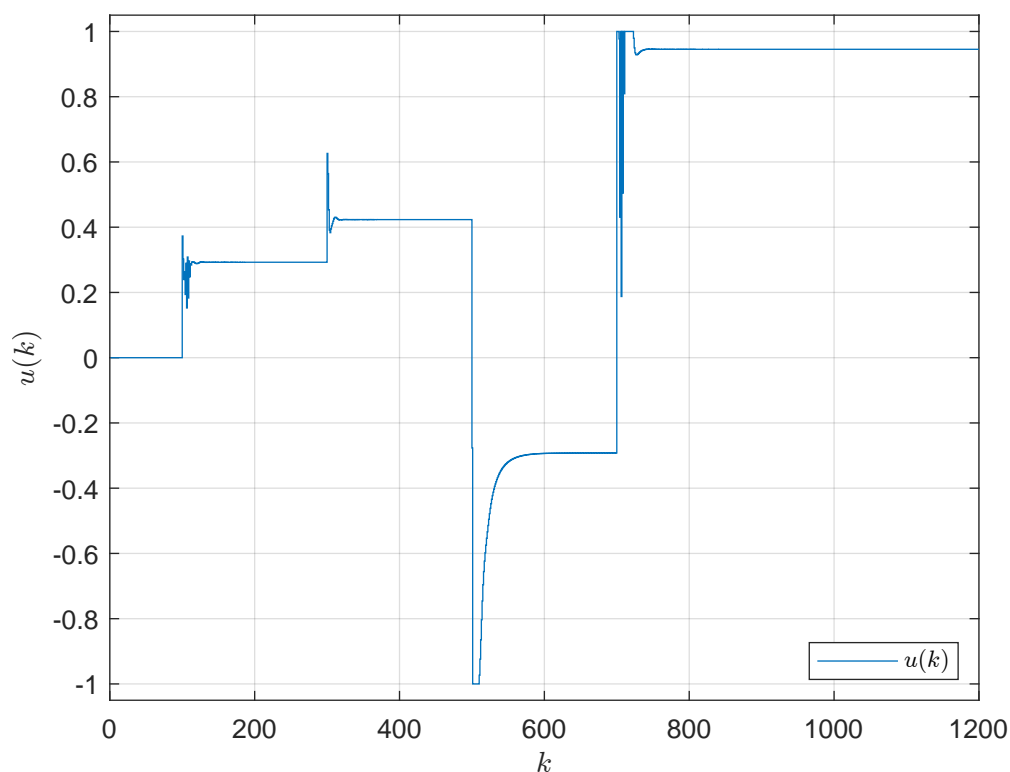
Rys. 7.9. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 4$  - sygnał wyjściowy i zadany



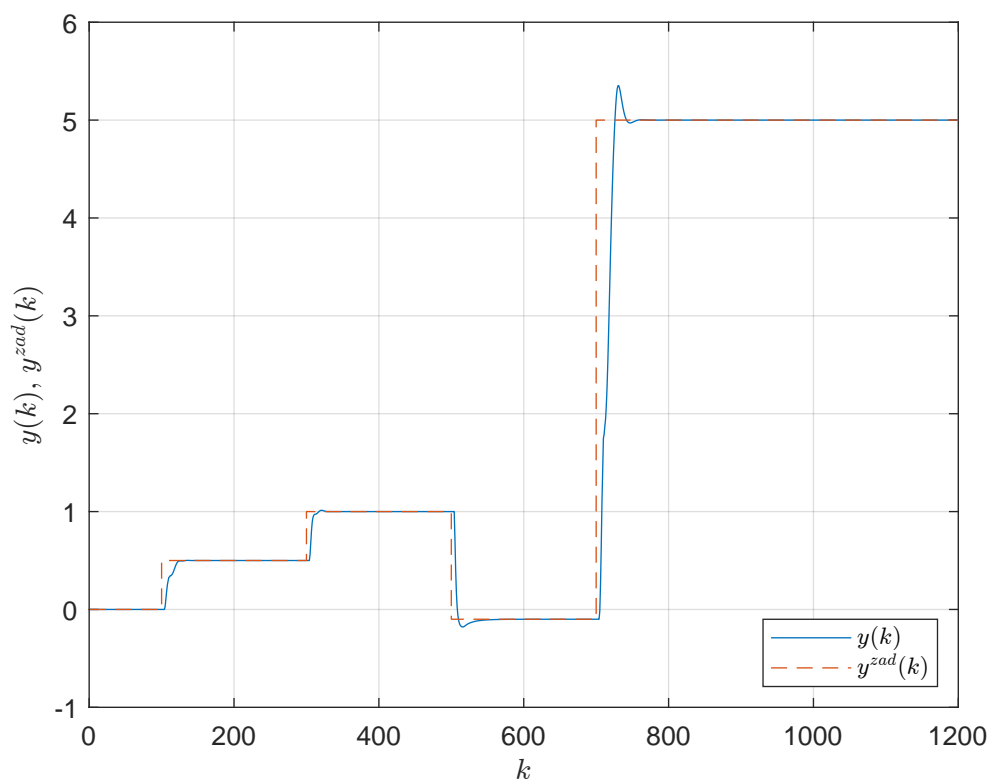
Rys. 7.10. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 5$

### 7.3. Funkcje przynależności trapezoidalne

Na początku sprawdziliśmy działanie algorytmu dla  $n_r = 2$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.22. Wyniki symulacji są przedstawione na ry-



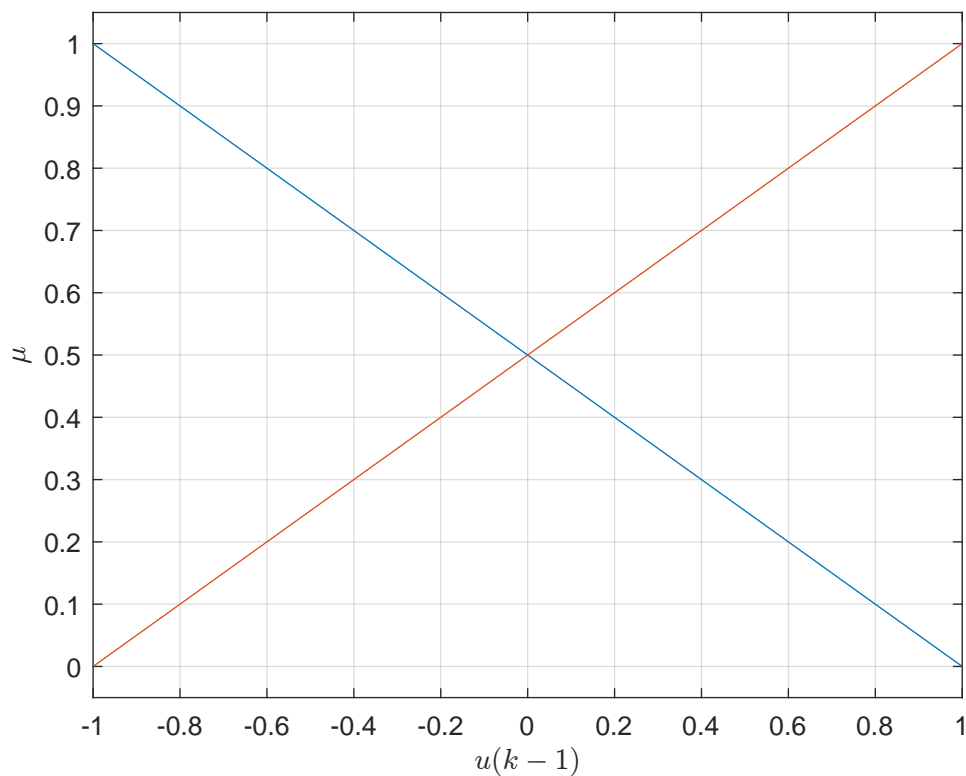
Rys. 7.11. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 5$  - sygnał sterujący



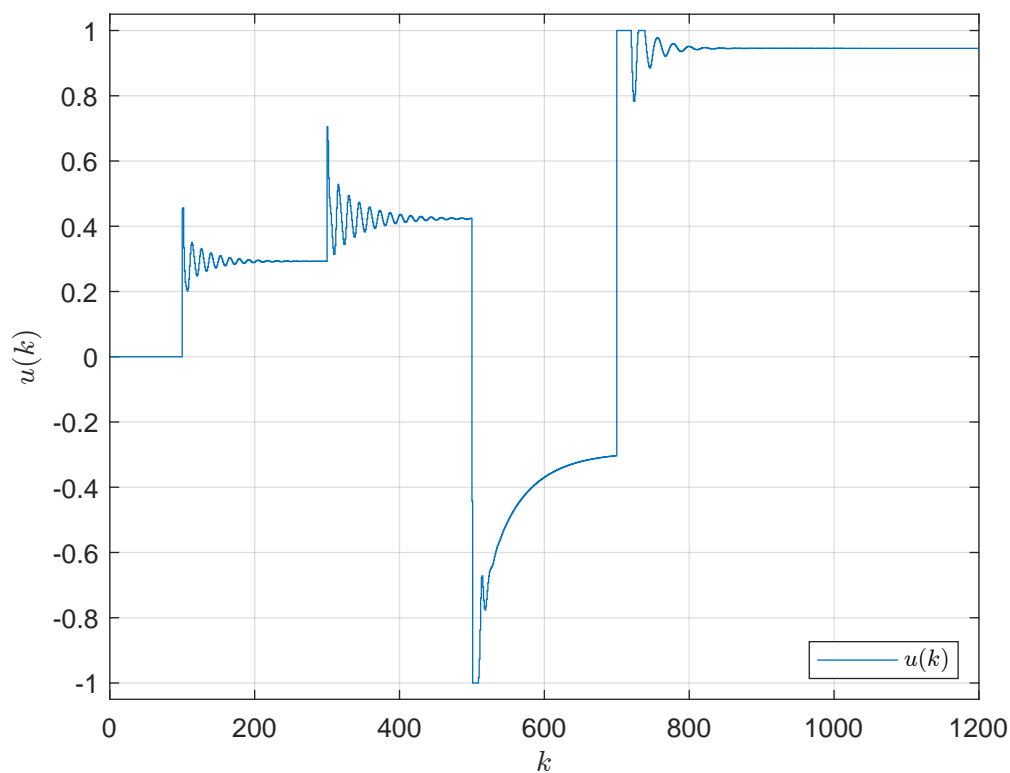
Rys. 7.12. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 5$  - sygnał wyjściowy i zadany



sunkach 7.23 oraz 7.24. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 260,8879$ , co świadczy o tym, że zastosowanie funkcji trapezoidalnych zapewnia najlepszą jakość regulacji pod kątem oceny wskaźnika  $E$  dla tej samej liczby  $n_r = 2$  w porównaniu z innymi funkcjami.

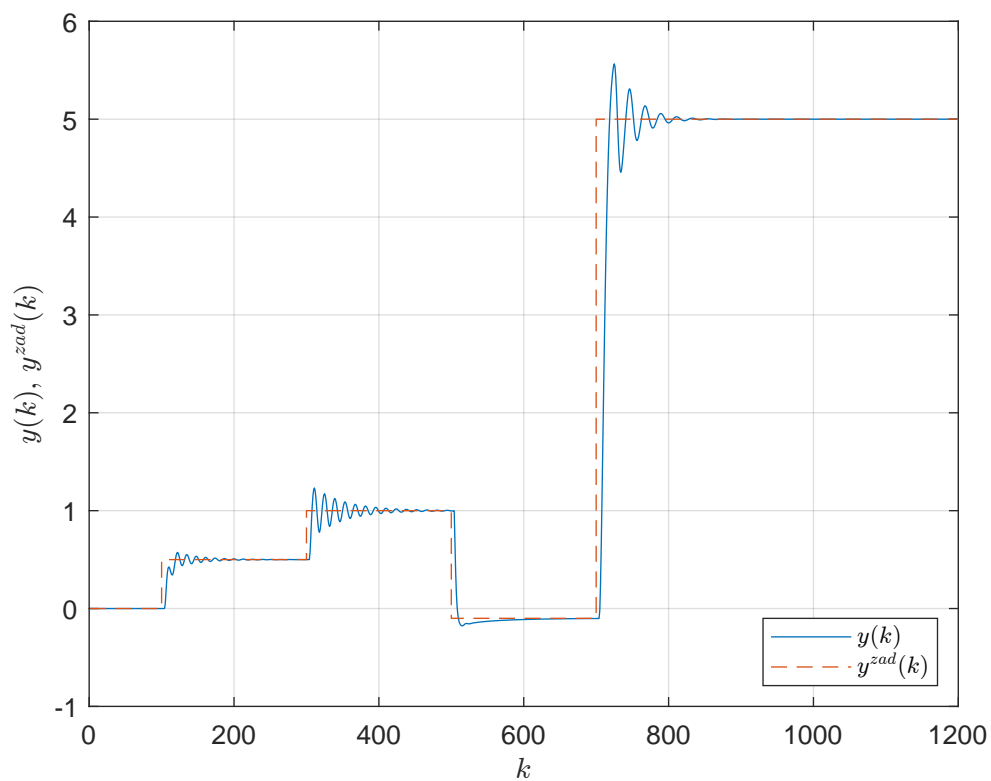


Rys. 7.13. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 2$

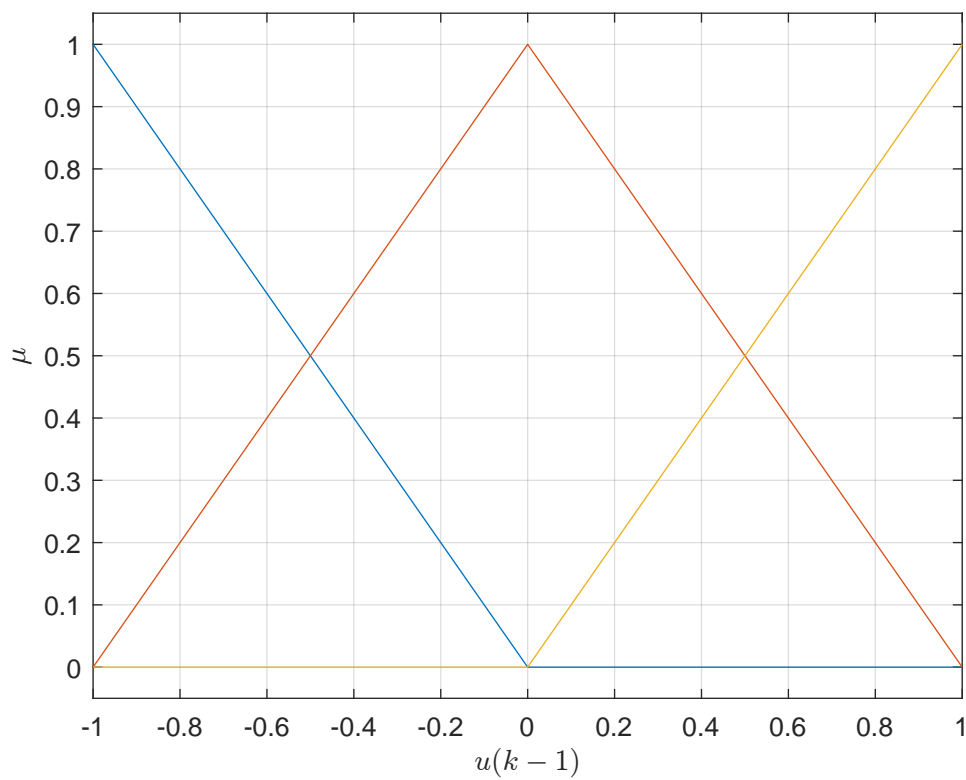


Rys. 7.14. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 2$  - sygnał sterujący

Układ działa dobrze i szybko, wartość zadana jest osiągana na wyjściu dla różnych wartości



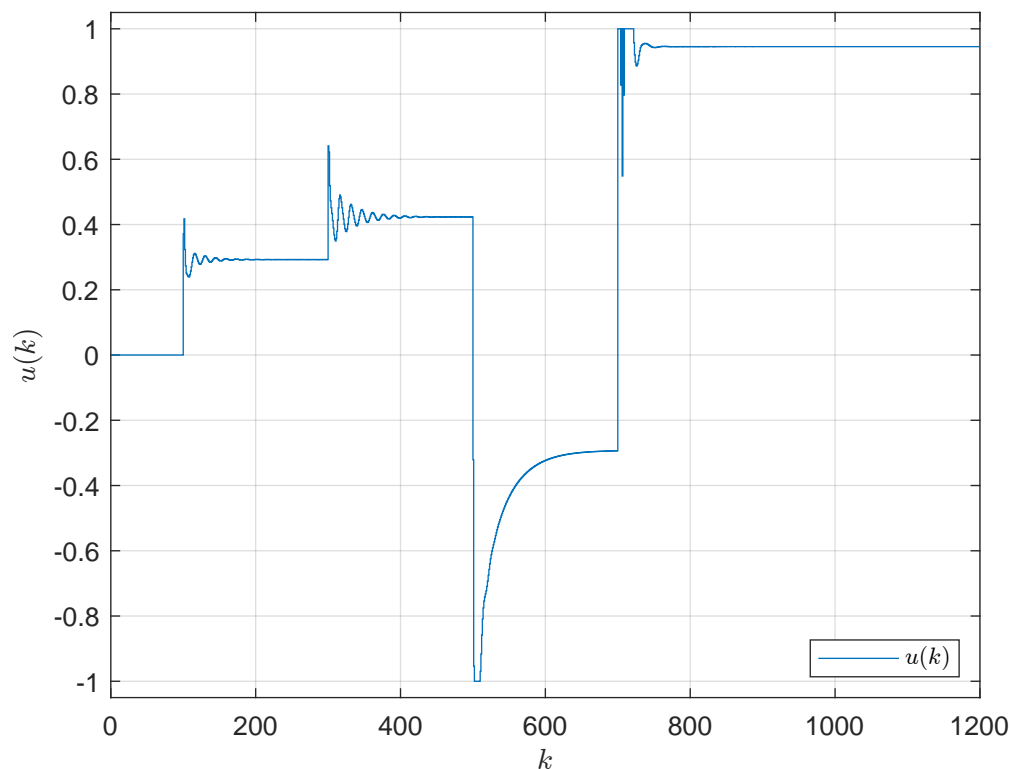
Rys. 7.15. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 2$  - sygnał wyjściowy i zadany



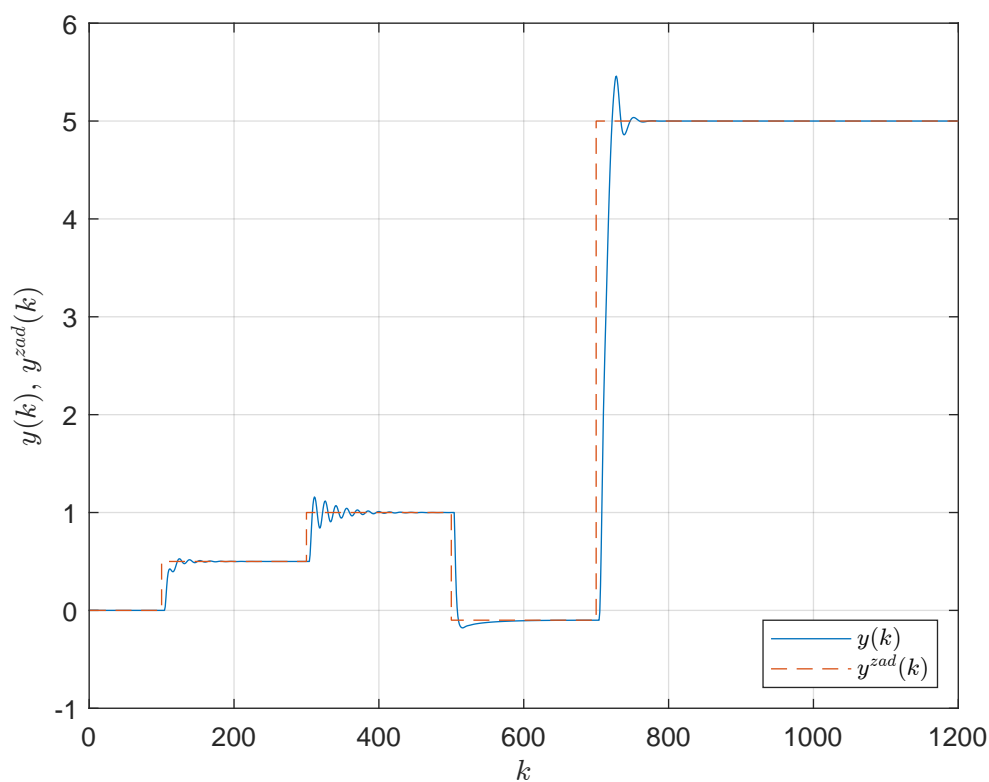
Rys. 7.16. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 3$

skoków  $y^{\text{zad}}$ . Jedynie dla ostatniego skoku wartości zadanej do  $y^{\text{zad}} = 5$  występują oscylacje na wyjściu obiektu. Mają one jednak charakter gasnący i nie wpływają na rozregulowanie procesu.

Następnie zwiększyliśmy liczbę regulatorów lokalnych do  $n_r = 3$ . Odpowiadające tej sytu-

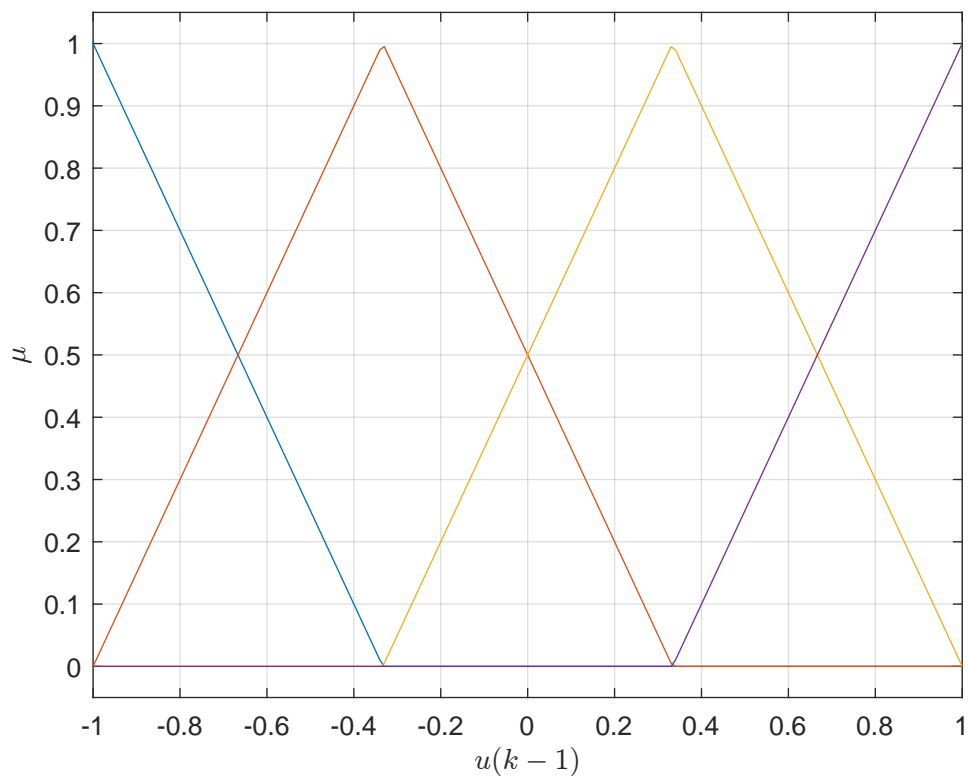


Rys. 7.17. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 3$  - sygnał sterujący

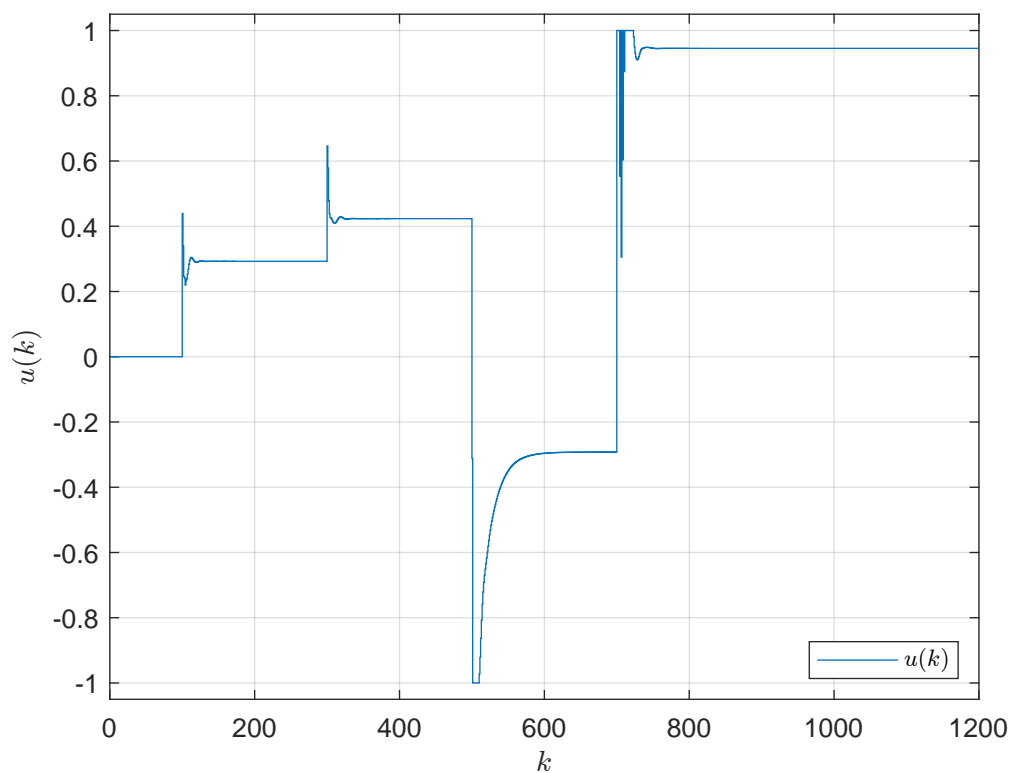


Rys. 7.18. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 3$  - sygnał wyjściowy i zadany

acji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.25. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.26 oraz 7.27. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 286,2821$ ,

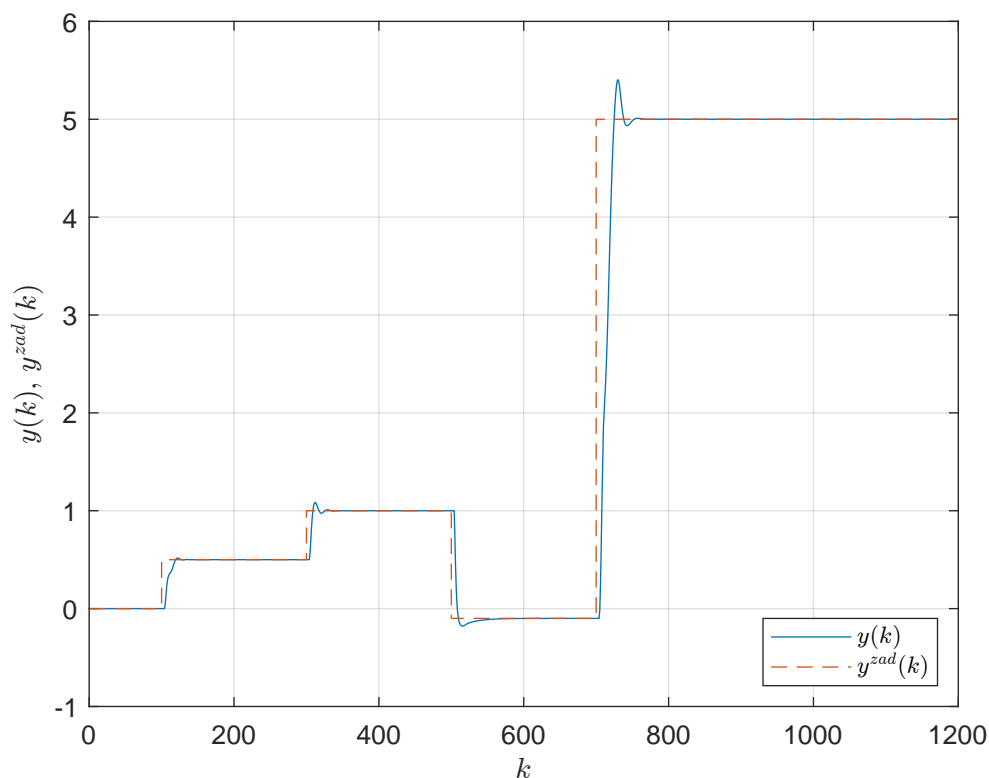


Rys. 7.19. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 4$

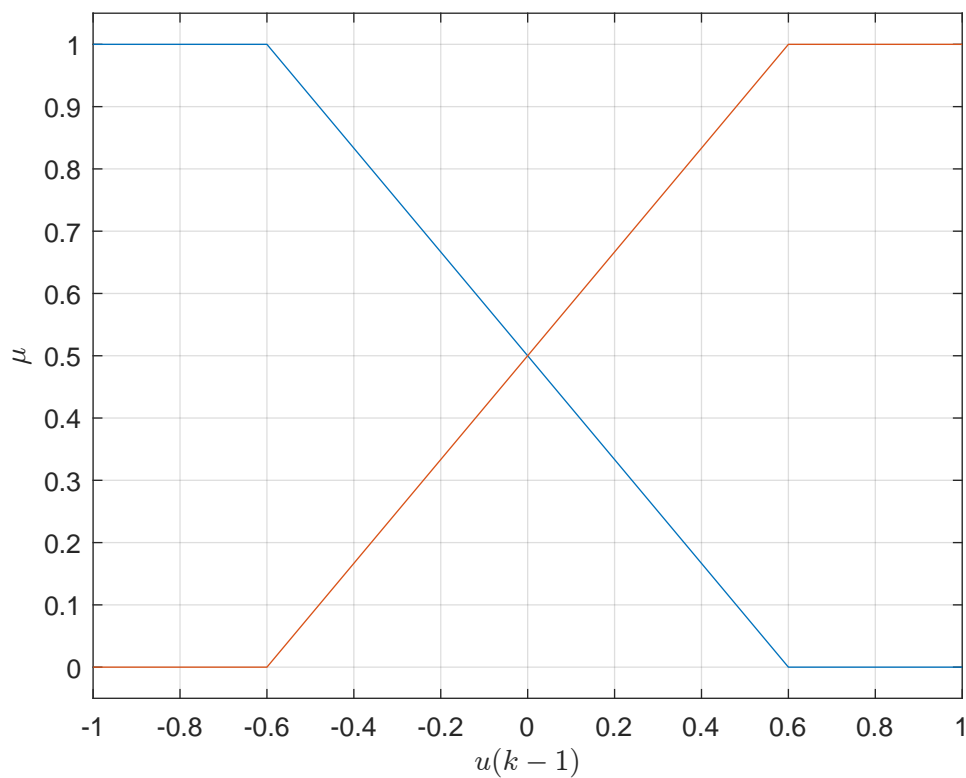


Rys. 7.20. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 4$  - sygnał sterujący

czyli uległa pogorszeniu po zwiększeniu liczby zastosowanych funkcji przynależności. Pojawiły się także oscylacje zarówno w sygnale wyjściowym jak i wejściowym.

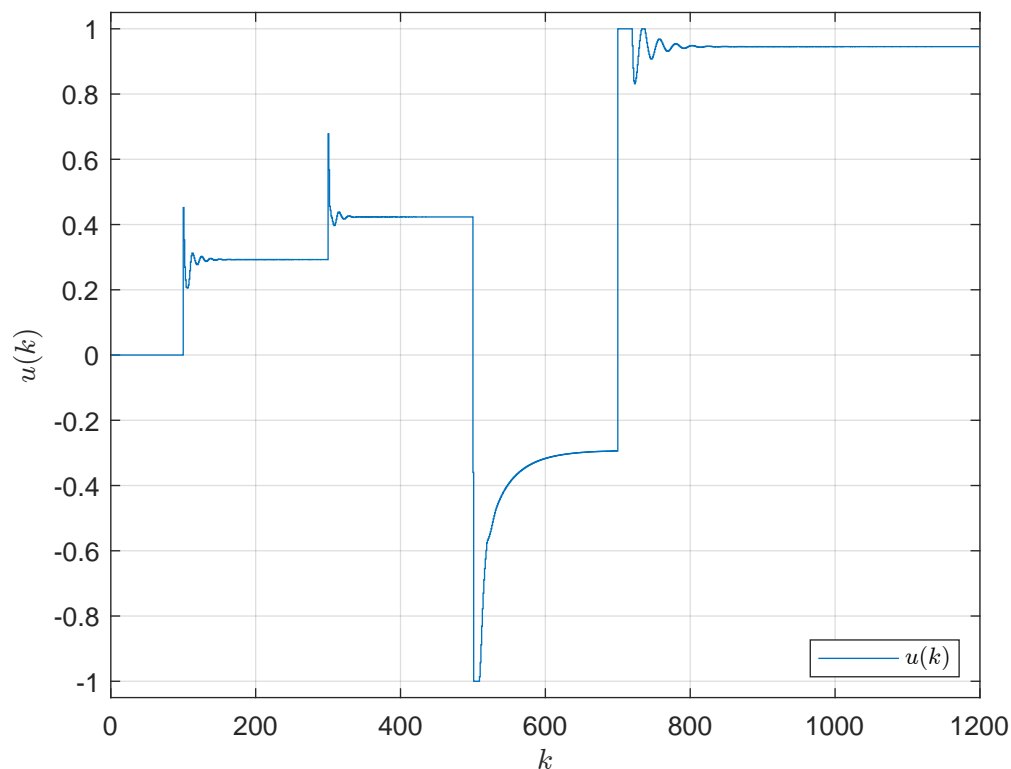


Rys. 7.21. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 4$  - sygnał wyjściowy i zadany

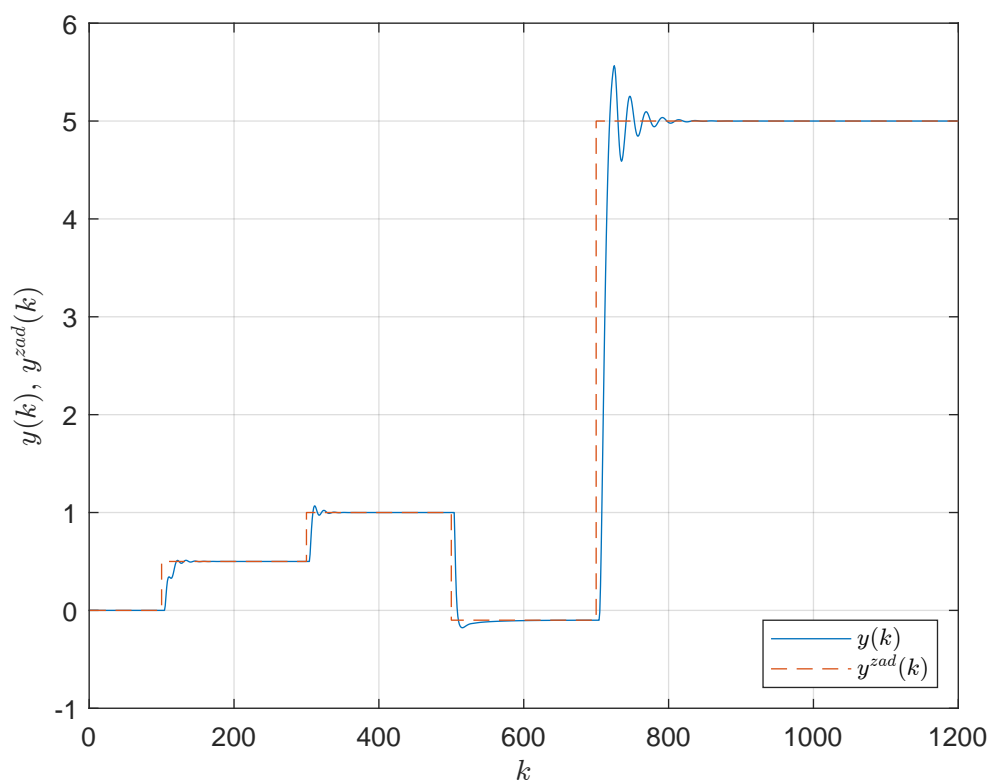


Rys. 7.22. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 2$

W kolejnym kroku sprawdziliśmy działanie układu dla  $n_r = 4$ . Odpowiadające tej sytuacji funkcje przynależności przedstawiono na rys. 7.28. Wyniki symulacji są przedstawione na rysunkach 7.29 oraz 7.30. Otrzymana wartość wskaźnika jakości regulacji wynosi  $E = 295,0414$ , czyli

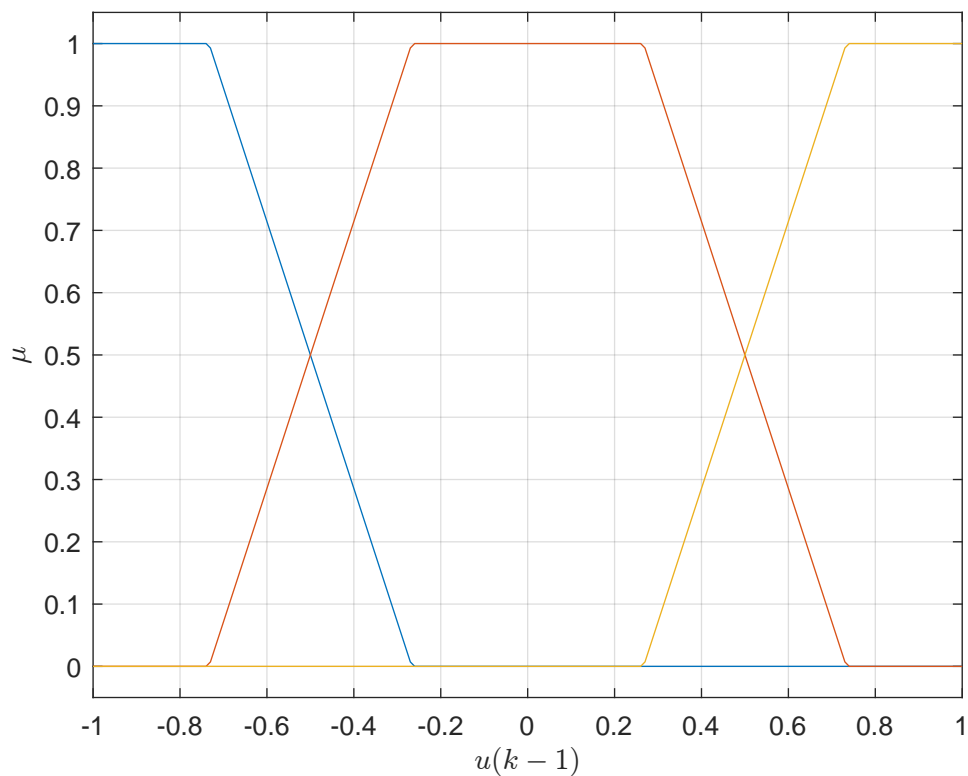


Rys. 7.23. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 2$  - sygnał sterujący

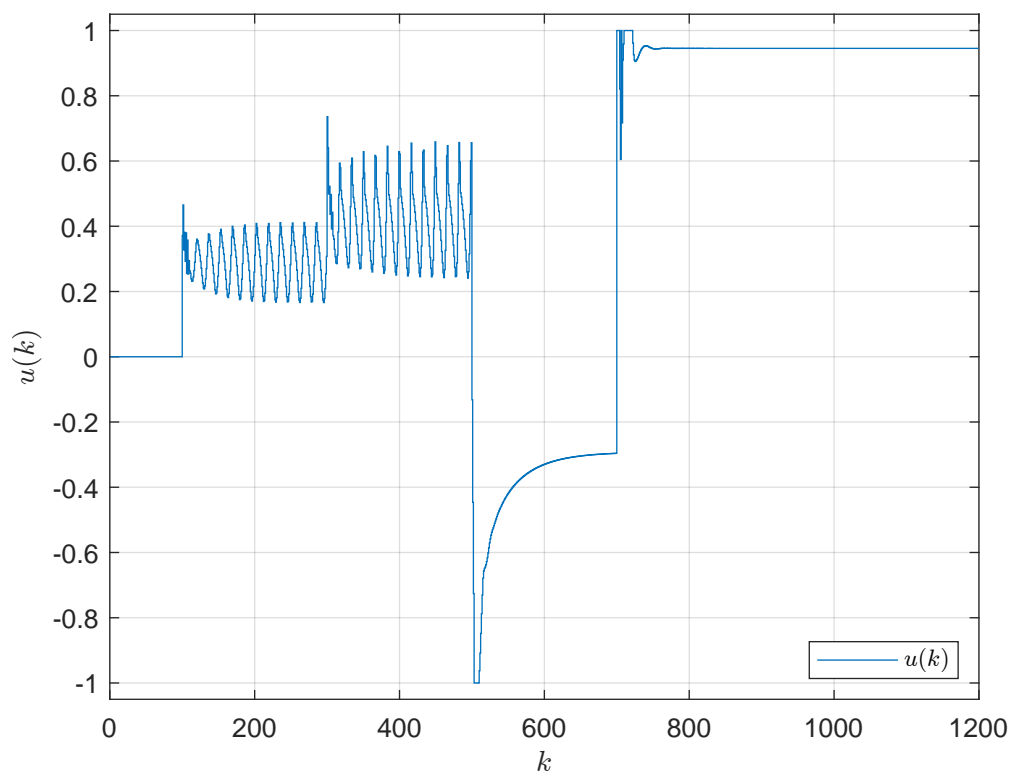


Rys. 7.24. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 2$  - sygnał wyjściowy i zadany

ponownie uległa pogorszeniu. Tym razem jednak oscylacje w ogóle nie występują. Pojawiają się jednak niewielkie przeregulowania, lecz mimo tego układ działa sprawnie.



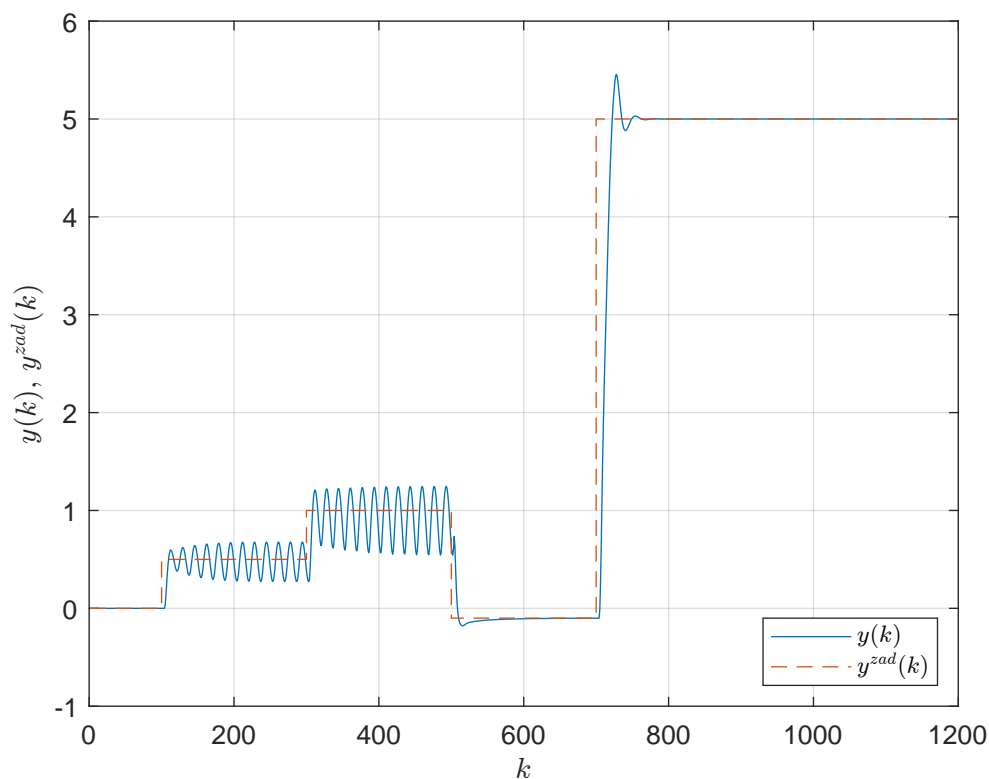
Rys. 7.25. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 3$



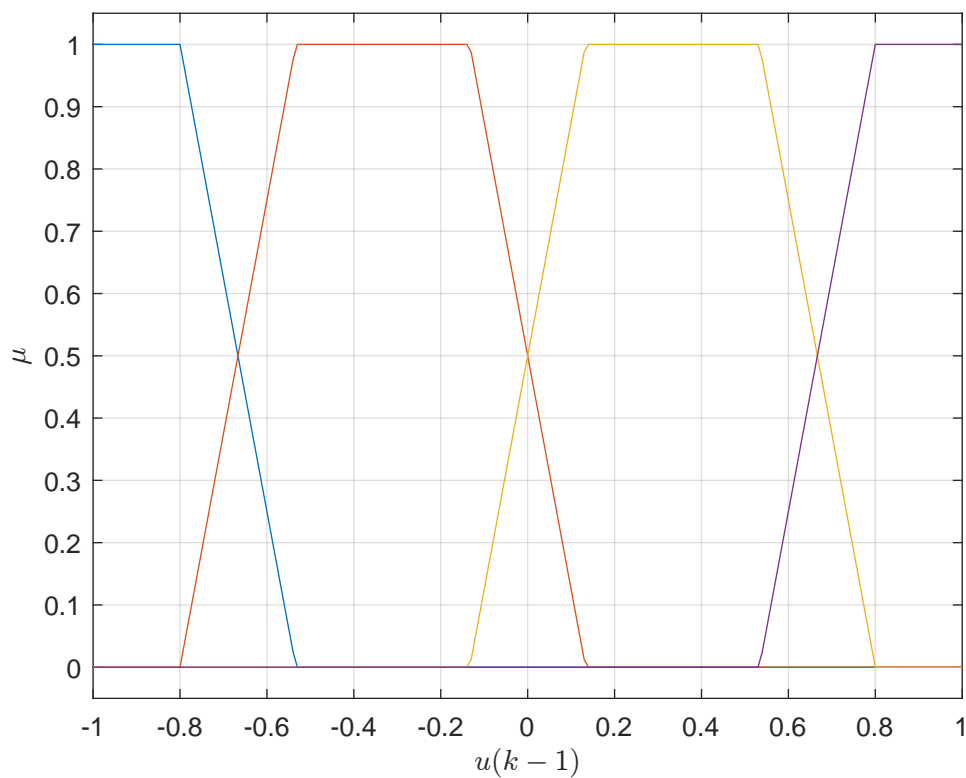
Rys. 7.26. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 3$  - sygnał sterujący

### 7.4. Wnioski

Na podstawie zebranych przebiegów można zauważyć, że zwiększanie liczby regulatorów lokalnych  $n_r$  powoduje pogorszenie wskaźnika jakości  $E$ . Jednak prawie dla wszystkich przypadków



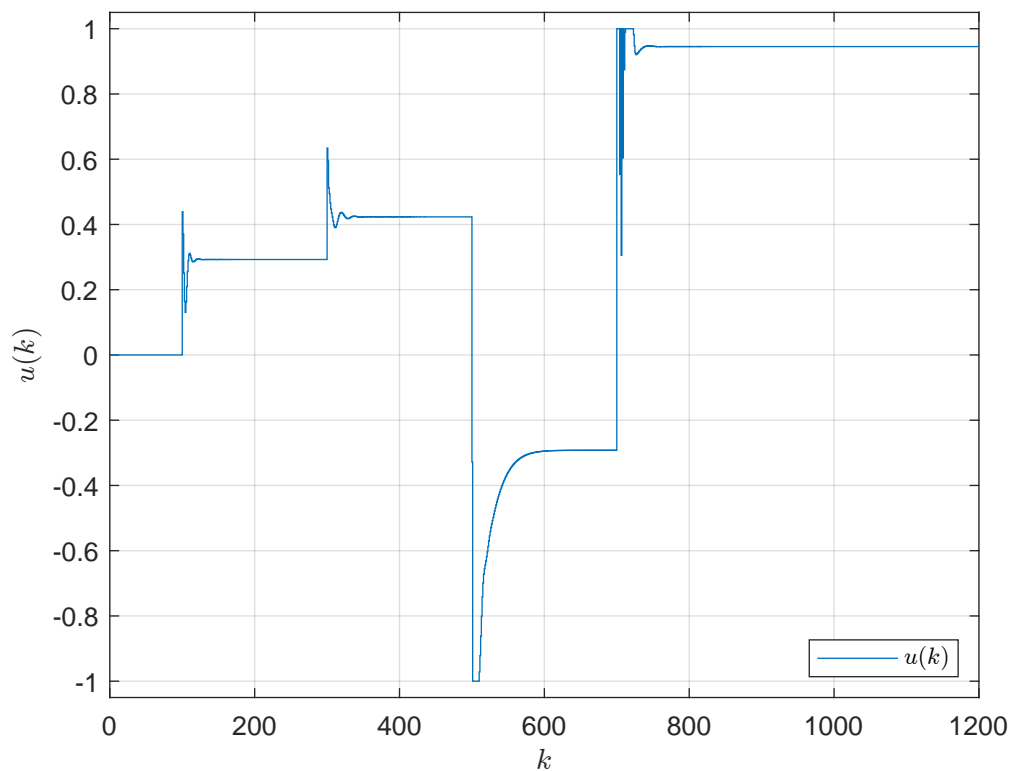
Rys. 7.27. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 3$  - sygnał wyjściowy i zadany



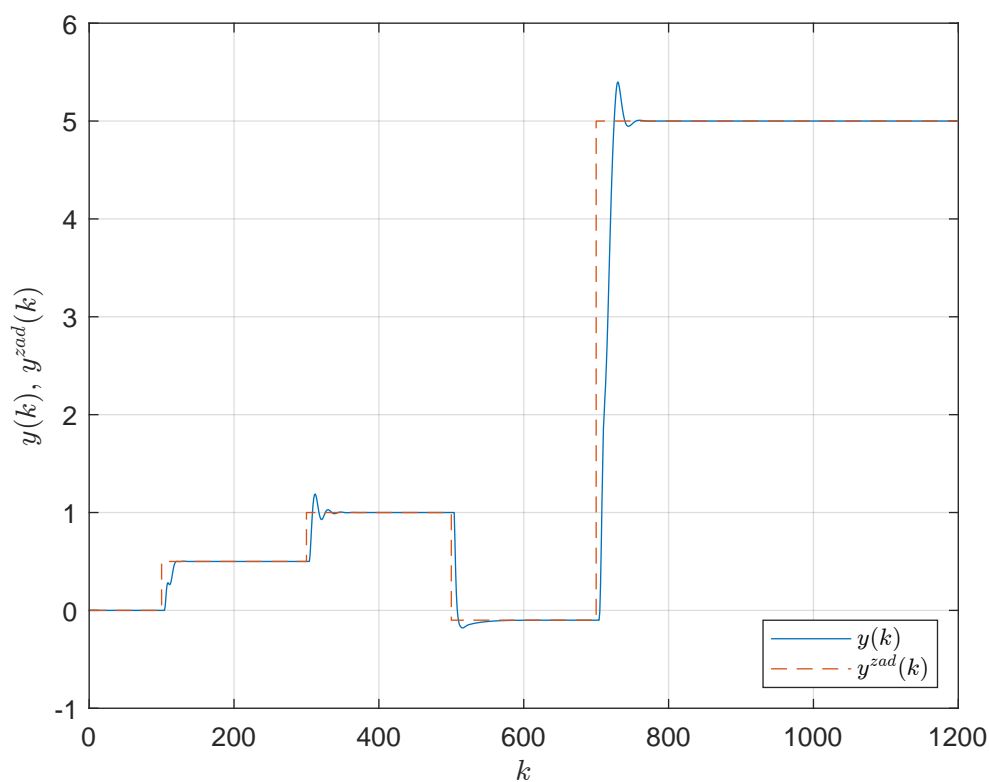
Rys. 7.28. Zastosowane funkcje przynależności dla  $n_r = 4$



zwiększanie  $n_r$  sprawiało, że uzyskane przebiegi były spokojniejsze, oscylacje były redukowane, a wartość zadana była szybciej osiągnęta. Na tej podstawie można stwierdzić, że warto zwiększyć



Rys. 7.29. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 4$  - sygnał sterujący



Rys. 7.30. Regulator rozmyty DMC dla  $n_r = 4$  - sygnał wyjściowy i zadany

liczbę zastosowanych funkcji przynależności, gdyż w ten sposób można wyeliminować niekorzystne z punktu widzenia regulacji zjawiska (takie jak występowanie oscylacji).

Biorąc pod uwagę zarówno kształty przebiegów jak i otrzymane wartości wskaźnika  $E$ , można stwierdzić, że najbardziej korzystne jest wykorzystanie funkcji przynależności postaci funkcji Gaussa. Liczba regulatorów równa  $n_r = 5$  będzie najlepszym kompromisem między złożonością algorytmu a uzyskiwaną dokładnością działania.