

# Rozmyta regulacja PID oraz DMC dla obiektu nieliniowego

Radosław Pietkun, Wojciech Rokicki, Jakub Gruszecki

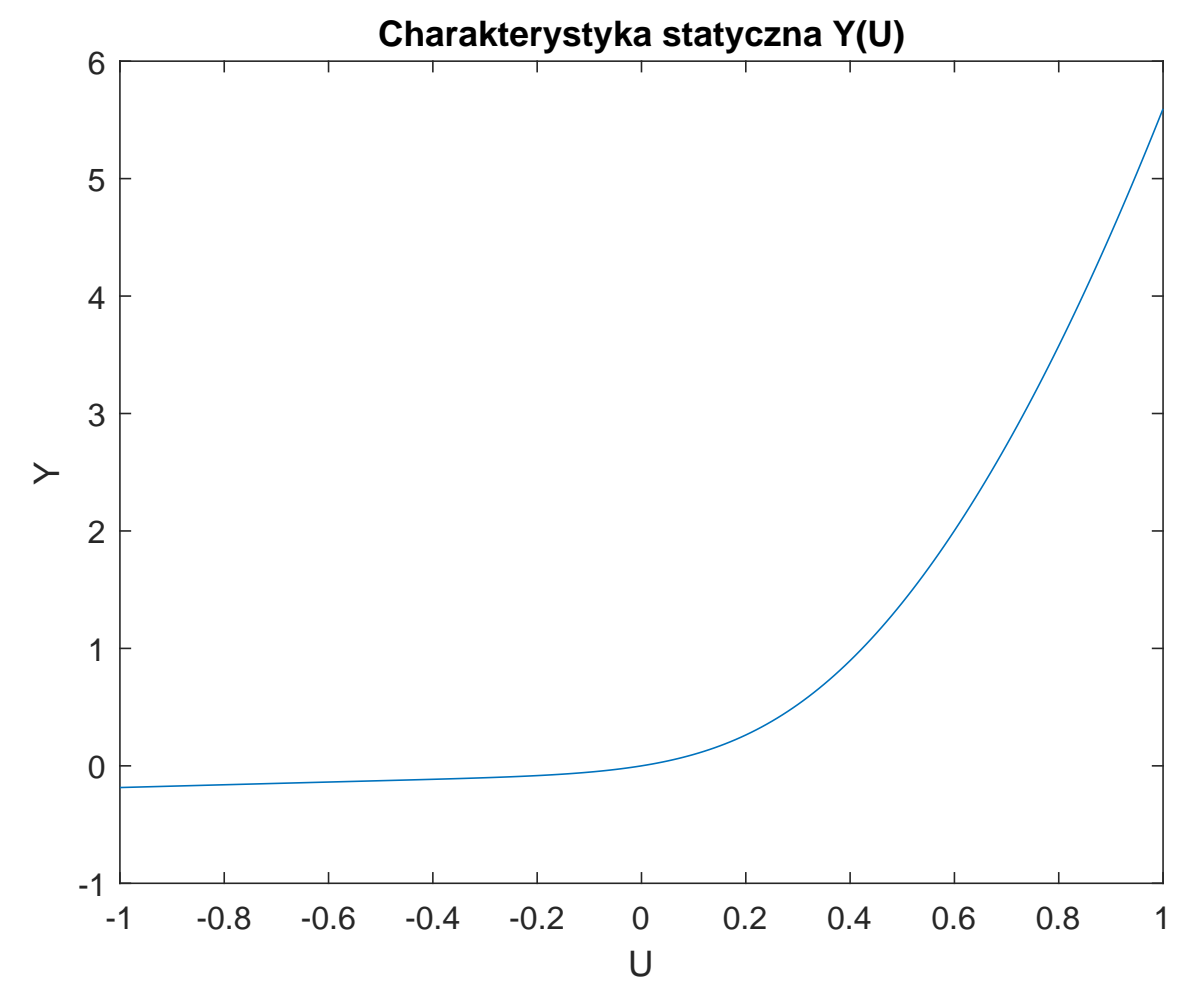
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Linowe algorytmy PID oraz DMC działają bardzo dobrze w przypadku obiektów liniowych. Natomiast w sytuacji, gdy mamy do czynienia z obiektem nieliniowym jakość regulacji przy pomocy takich algorytmów może ulec znacznemu pogorszeniu dla niektórych punktów pracy. Rozwiązaniem w takiej sytuacji może być zastosowanie regulatorów rozmytych. Idea ich działania polega na wykorzystaniu kilku lokalnych regulatorów liniowych zamiast pojedynczego regulatora linowego. Każdy taki regulator lokalny jest dostosowany do działania w wybranym punkcie pracy. Regulacja rozmyta polega na odpowiednim przełączaniu tych regulatorów w zależności od aktualnego punktu pracy obiektu. W taki sposób można zapewnić satysfakcjonującą jakość regulacji dla badanego procesu nieliniowego. Celem naszego projektu było zaimplementowanie i skalibrowanie zarówno tradycyjnych cyfrowych algorytmów PID i DMC, jak i rozmytych regulatorów PID i DMC, a także porównanie jakości regulacji nieliniowego obiektu przy zastosowaniu różnych podejść w zakresie regulacji.

## 2. Charakterystyka statyczna

Badany proces pobudzaliśmy różnymi wartościami sygnału sterującego i mierzyliśmy odpowiedzi układu w stanie ustalonym. W ten sposób wyznaczyliśmy charakterystykę statyczną obiektu.



Na podstawie wykresu można stwierdzić, że właściwości statyczne i dynamiczne procesu są nieliniowe.

## 3. Kryteria oceny regulacji

Jakość regulacji ocenialiśmy jakościowo na podstawie otrzymywanych przebiegów sygnałów sterowania i wyjścia oraz ilościowo na podstawie poniższego wskaźnika jakości

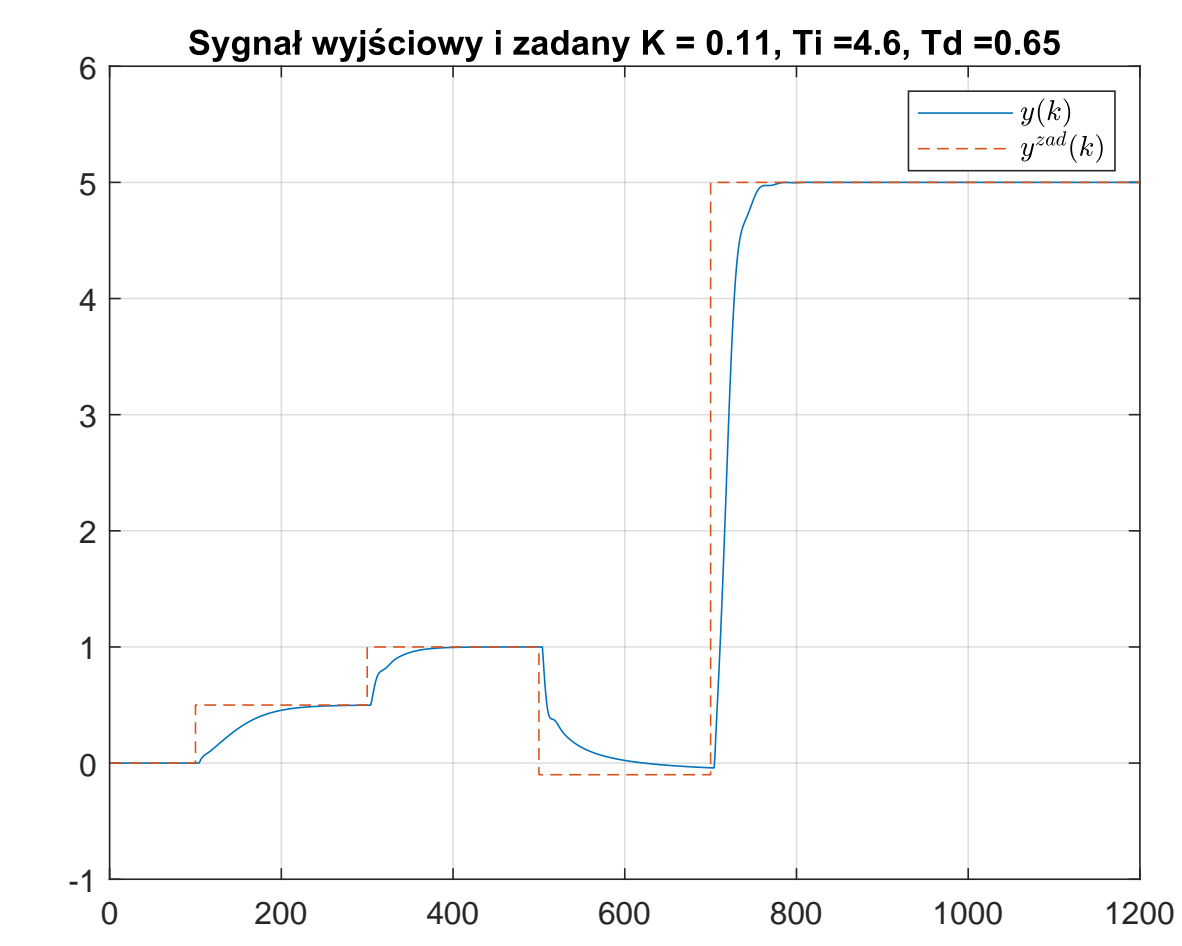
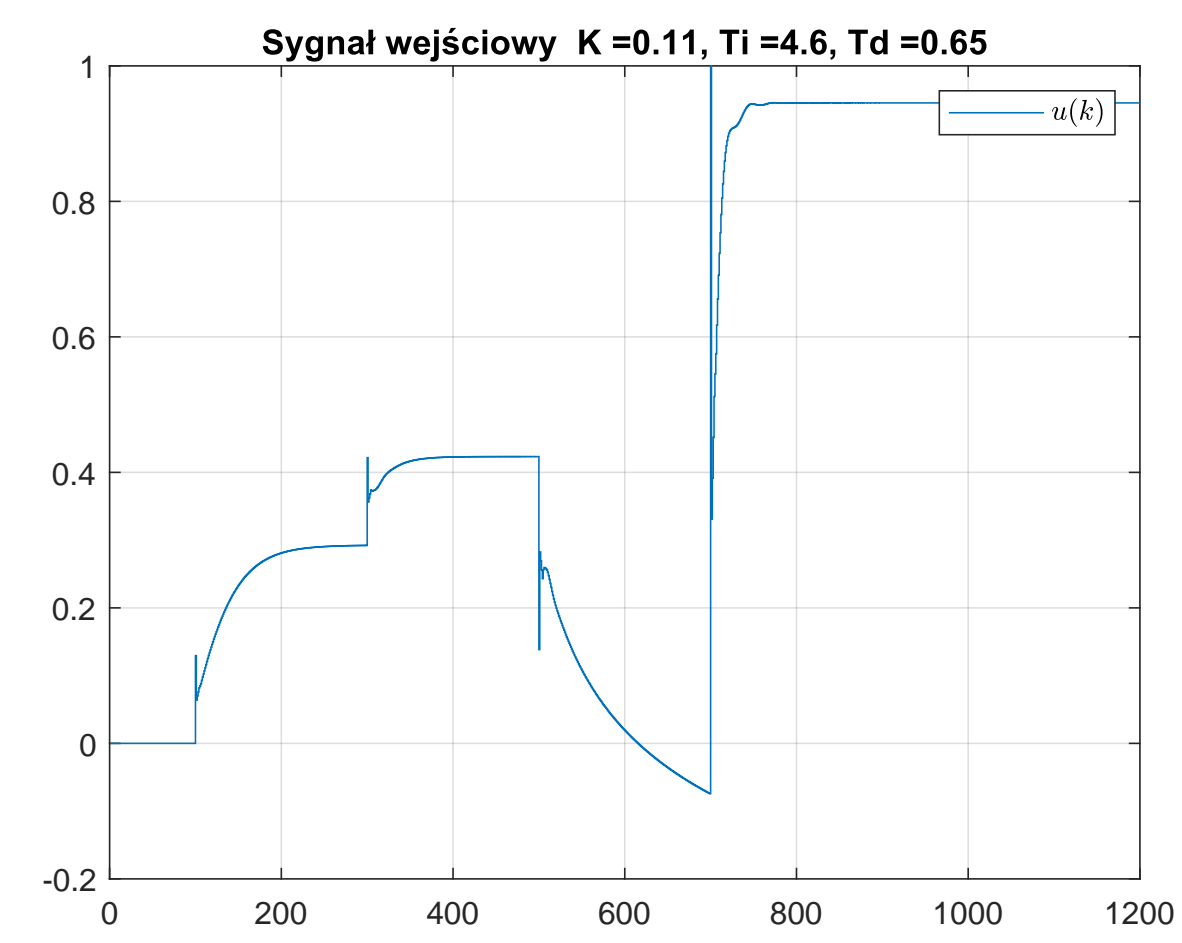
$$E = \sum_{k=1}^{k_{\text{konc}}} (y^{\text{zad}}(k) - y(k))^2 \quad (1)$$

## 4. Pojedynczy regulator PID

Regulator PID stroiliśmy metodą inżynierską ze względu na zawodność metody Zieglera-Nicholsa. W pierwszej kolejności dobraliśmy wartość wzmocnienia. W kolejnych krokach dostrajaliśmy kolejno człony całkujący i różniczkujący. Ostatecznie przyjęliśmy następujące nastawy regulatora PID

$$K = 0,11, \quad T_i = 4,6, \quad T_d = 0,65 \quad (2)$$

Uzyskaliśmy wartość wskaźnika jakości  $E = 403,722$ . Poniżej przedstawiono przebiegi sygnałów sterowania oraz wyjścia i wartości zadanej dla nastaw (2) regulatora.

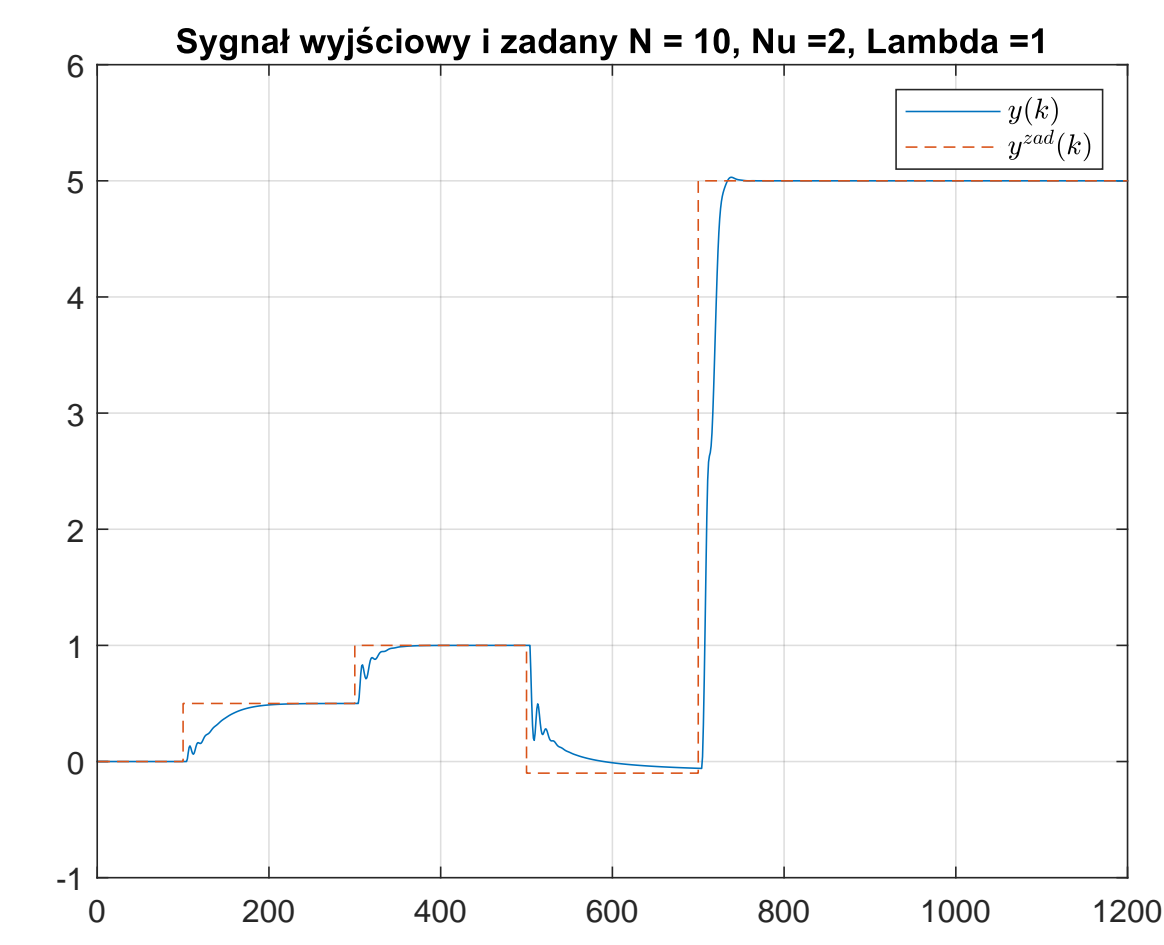
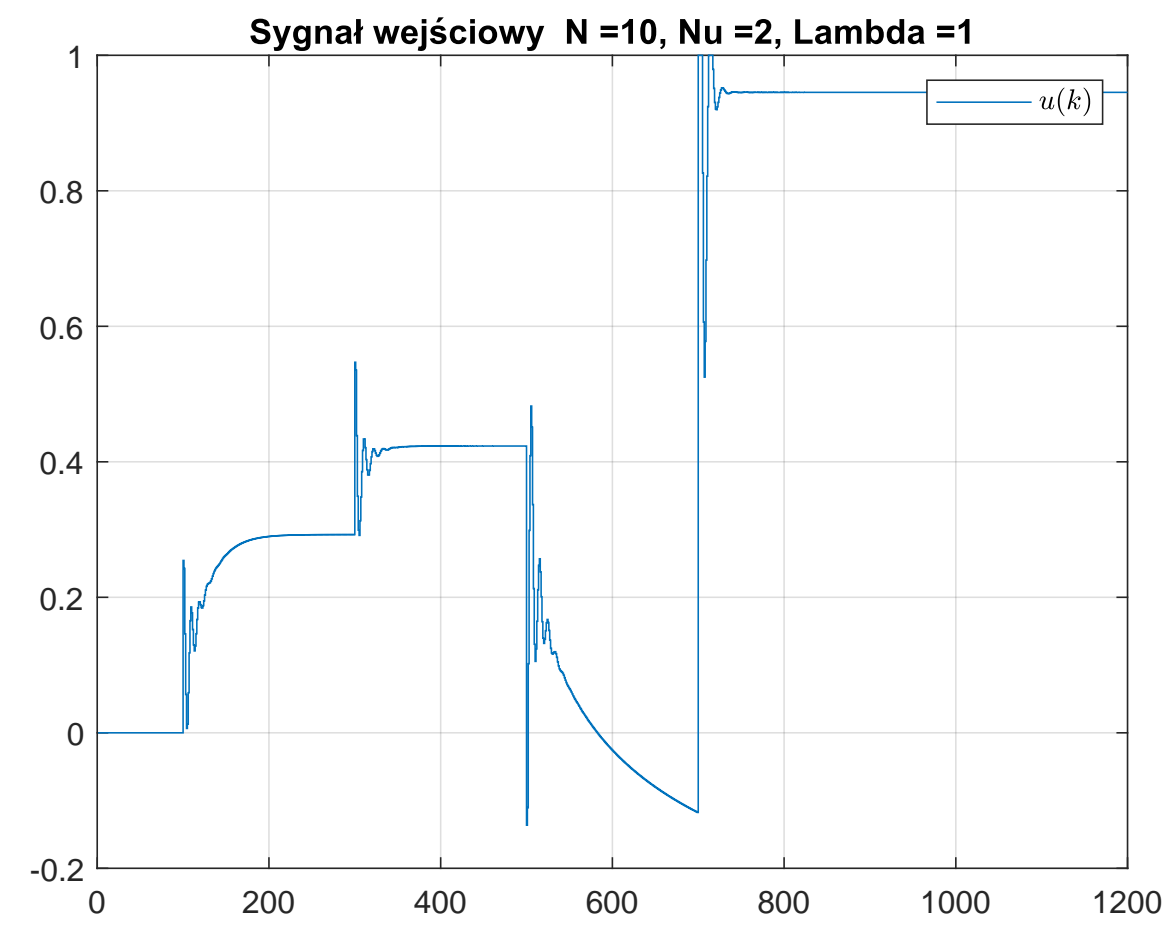


## 5. Pojedynczy regulator DMC

Ważnym elementem strojenia pojedynczego regulatora DMC był dobór odpowiedzi skokowej. Eksperymentalnie wybraliśmy odpowiedź skokową w punkcie pracy dla  $u = 0,6$ , ze skokiem do  $u = 1,0$ . Regulator DMC stroiliśmy począwszy od największych możliwych wartości horyzontów predykcji oraz sterowania, wynikających z długości zebranej odpowiedzi skokowej  $D = 53$ . Następnie stopniowo zmniejszaliśmy horyzonty  $N$  oraz  $N_u$  tak, by z jednej strony zmniejszyć złożoność obliczeniową algorytmu, a z drugiej utrzymać dobrą jakość regulacji. Na końcu manipulowaliśmy współczynnikiem kar za przyrosty sterowania i zauważyliśmy, że jego zwiększanie wpływa niekorzystnie na regulację, więc pozostawiliśmy współczynnik niezmienny. Ostatecznie przyjęliśmy następujące nastawy regulatora DMC

$$D = 53, \quad N = 10, \quad N_u = 2, \quad \lambda = 1 \quad (3)$$

Uzyskaliśmy wartość wskaźnika jakości  $E = 264,7306$ . Poniżej przedstawiono przebiegi sygnałów sterowania oraz wyjścia i wartości zadanej dla nastaw (3) regulatora.



## 6. Założenia dot. eksperymentów

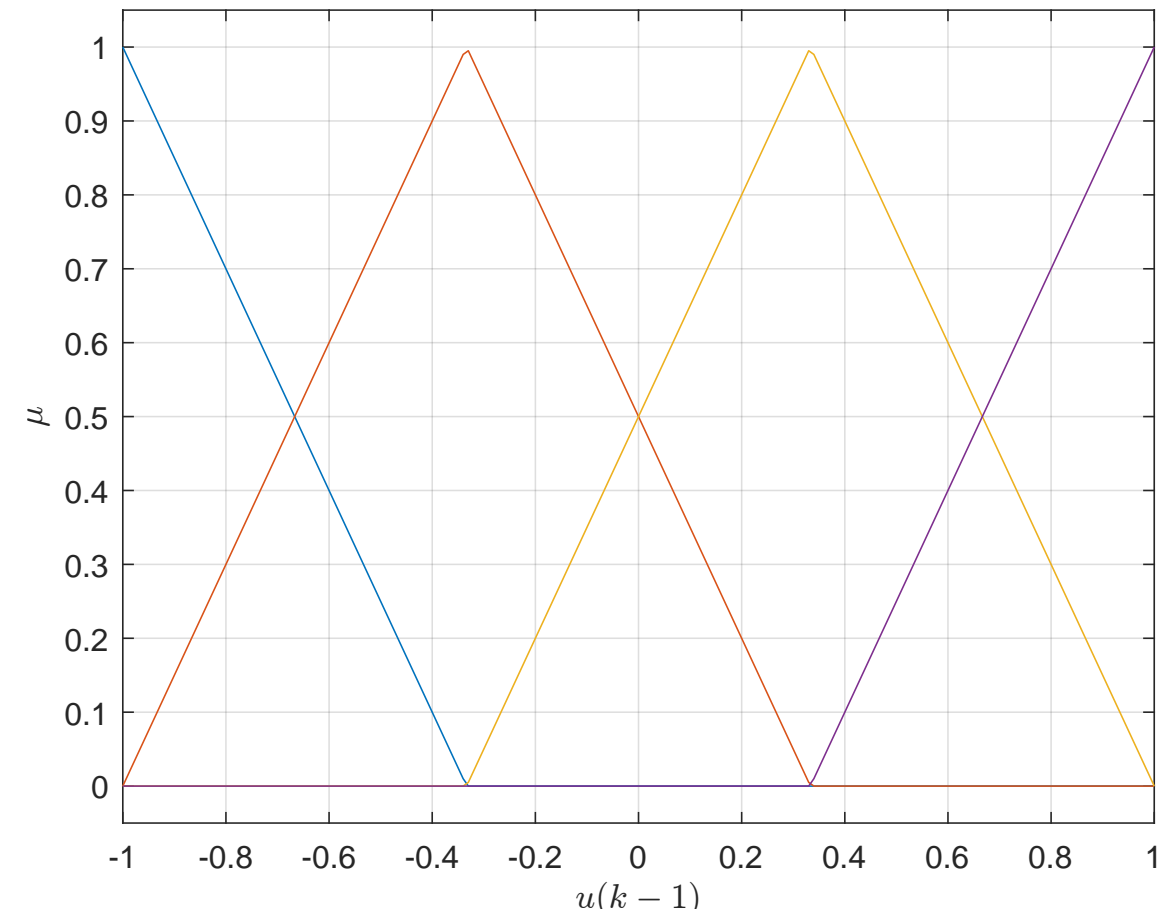
Przetestowaliśmy działanie rozmytych regulatorów PID i DMC dla różnych funkcji przynależności: Gaussa (gaussmf), trójkątnych (trimf) oraz trapezoidalnych (trapmf). Ponadto dla każdej z tych grup funkcji przeprowadziliśmy eksperymenty dla różnej liczby regulatorów lokalnych  $n_r \in \{2, 3, 4\}$ . Za sygnał przełączający regulatory lokalne przyjęliśmy  $u(k-1)$ . Ustaliliśmy, że funkcje przynależności będą symetryczne. Zauważyliśmy, że nie było potrzeby innego dopasowywania ich do nieliniowości obiektu, a symetryczny kształt tych funkcji pozwalał na osiągnięcie satysfakcjonujących wyników.

## 7. Rozmyty regulator PID

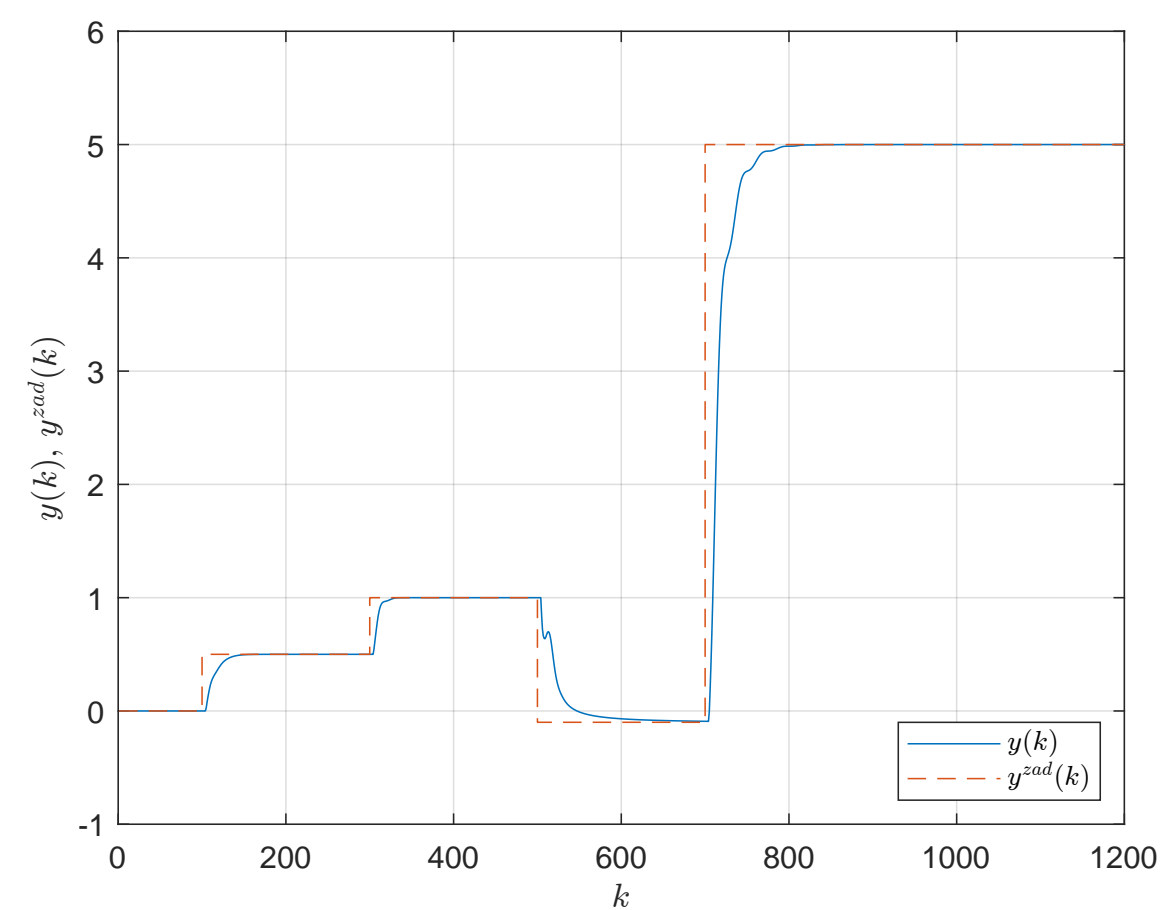
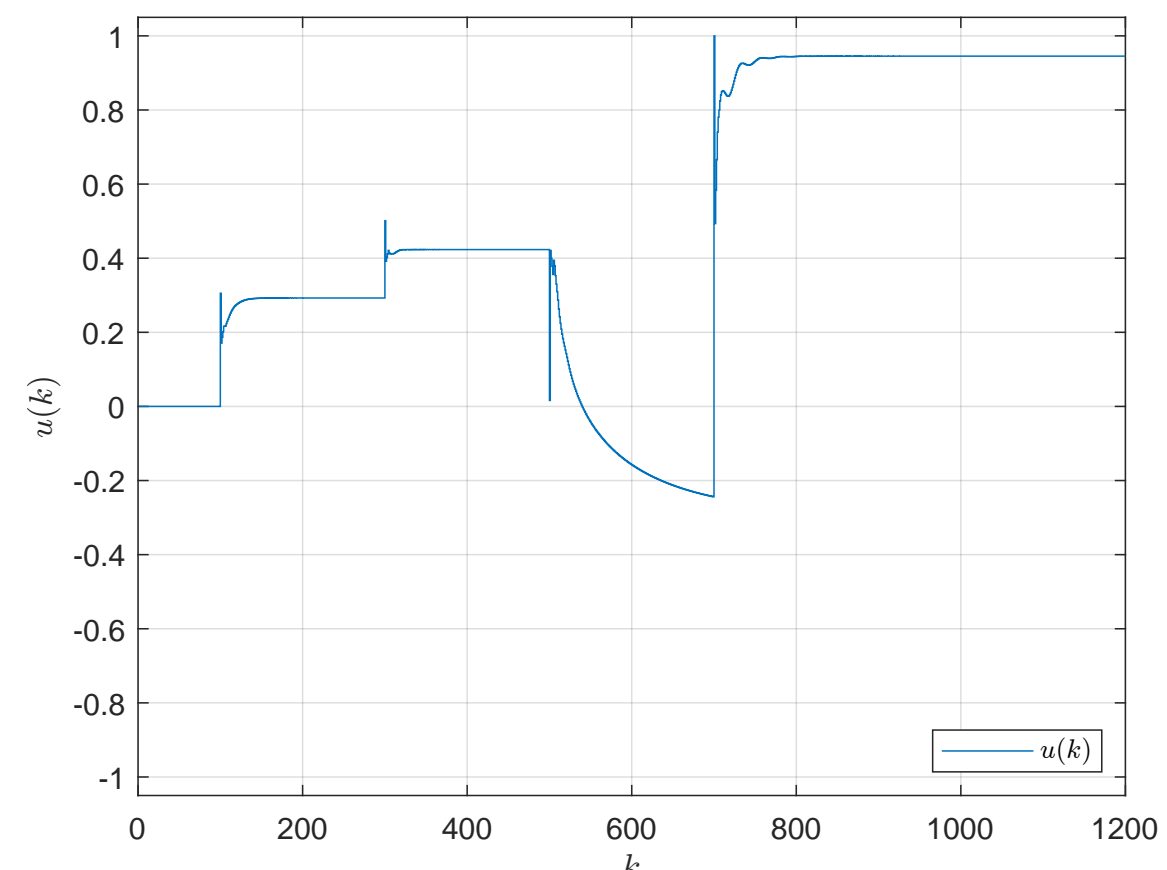
Skalibrowaliśmy i zasymulowaliśmy nasz układ regulacji złożony z lokalnych regulatorów PID. W poniższej tabeli przedstawiono otrzymane wartości wskaźnika jakości dla różnej liczby  $n_r$  oraz różnych kształtów funkcji przynależności.

| $n_r$ | $E_{\text{gaussmf}}$ | $E_{\text{trimf}}$   | $E_{\text{trapmf}}$ |
|-------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 2     | 1415,2               | $6,24 \cdot 10^{33}$ | 2015,2              |
| 3     | 354,58               | 330,98               | 385,64              |
| 4     | 355,20               | 339,26               | 368,77              |

Porównując regulatory pod względem jakościowym (czyli na podstawie rysunków przebiegów sygnałów) ciężko było jednoznacznie wskazać, które rozwiązanie jest najlepsze, gdyż po odpowiednim dostrojeniu regulatorów lokalnych prawie wszystkie układy działały bardzo dobrze - wartości zadane były osiągane, przeregulowanie, jeśli występowało, było niewielkie i układy działały szybko. Dlatego do wyboru najlepszego regulatora kluczowa była ocena ilościowa związana z wskaźnikiem  $E$ . Okazało się, że najlepszą regulację zapewniły regulatory, dla których funkcje przynależności miały kształty trójkątne. Liczba regulatorów równa  $n_r = 4$  okazała się najlepszym kompromisem między złożonością algorytmu a uzyskiwaną dokładnością działania. Ostatecznie wybrane funkcje przynależności przedstawiono poniżej.



A tak prezentowały się otrzymane przebiegi sygnałów sterowania oraz wyjścia i wartości zadanej:

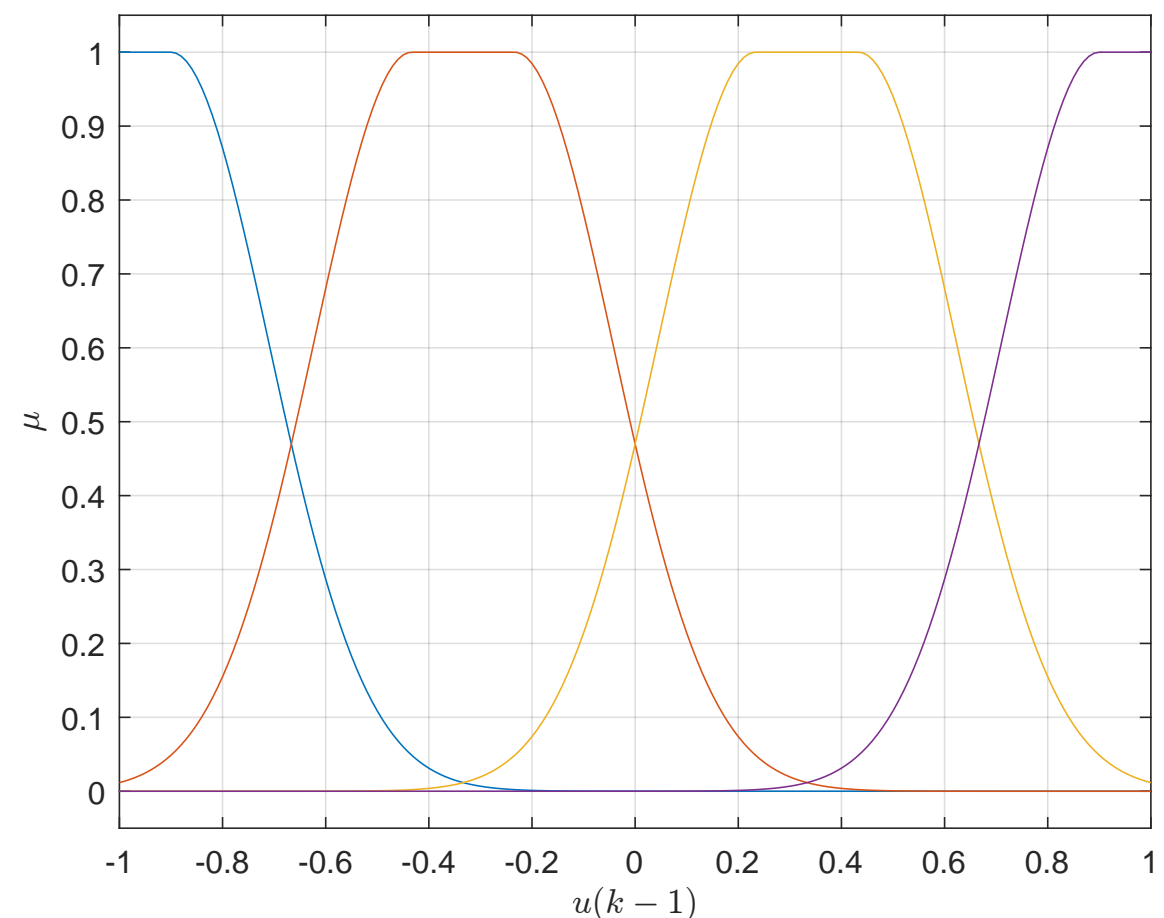


## 8. Rozmyty regulator DMC

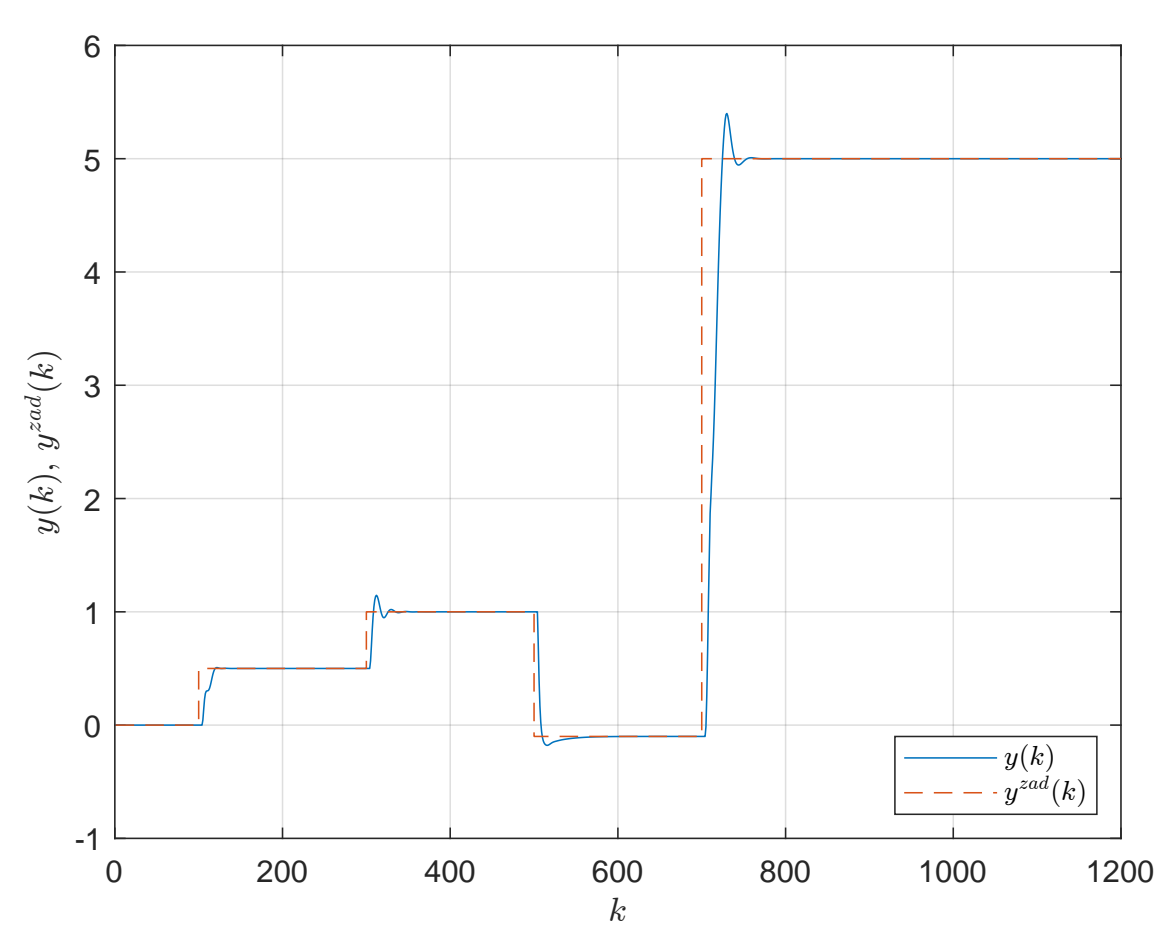
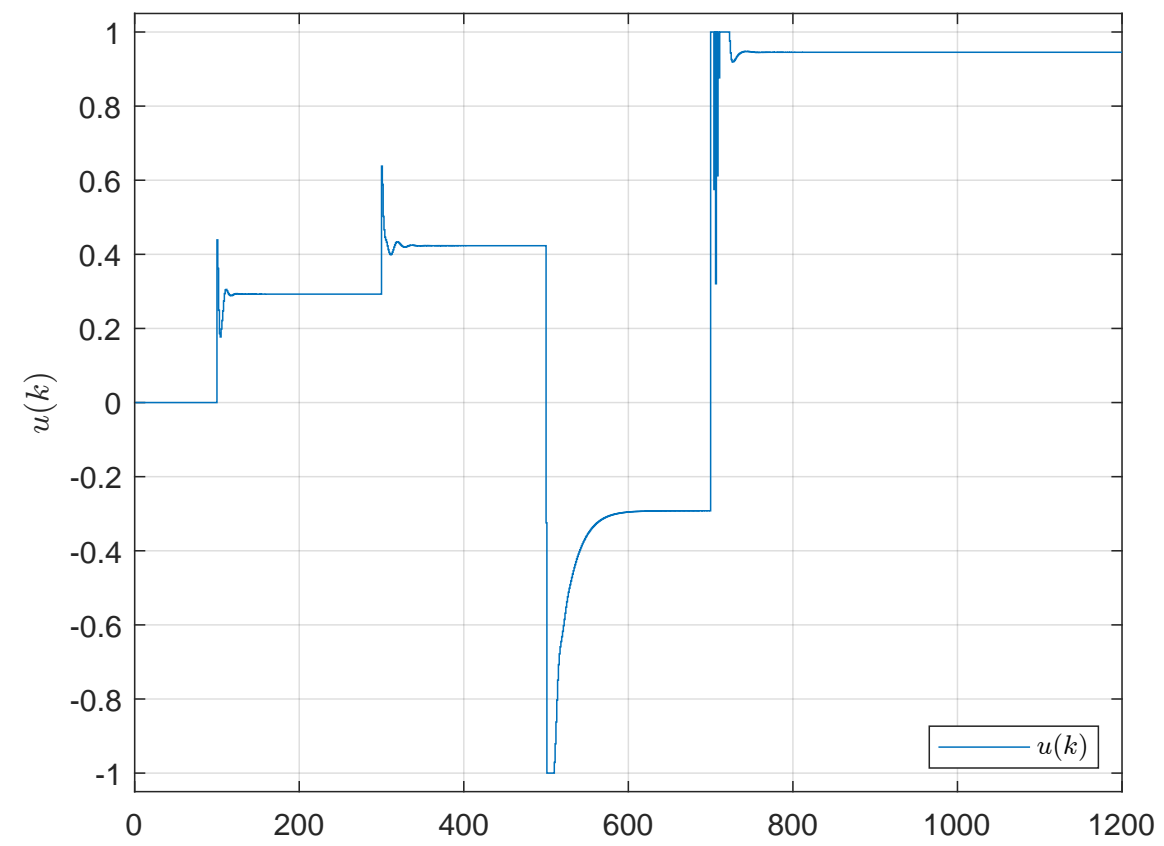
Zebraliśmy lokalne odpowiedzi skokowe i zasymulowaliśmy nasz układ regulacji złożony z lokalnych regulatorów DMC. W poniższej tabeli przedstawiono otrzymane wartości wskaźnika jakości dla różnej liczby  $n_r$  oraz różnych kształtów funkcji przynależności.

| $n_r$ | $E_{\text{gaussmf}}$ | $E_{\text{trimf}}$ | $E_{\text{trapmf}}$ |
|-------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 2     | 261,34               | 262,70             | 260,89              |
| 3     | 270,79               | 271,53             | 286,28              |
| 4     | 292,79               | 294,62             | 295,04              |

Na podstawie zebranych przebiegów można zauważyć, że zwiększanie liczby regulatorów lokalnych  $n_r$  powoduje pogorszenie wskaźnika jakości  $E$ . Jednak prawie dla wszystkich przypadków zwiększanie  $n_r$  sprawiało, że uzyskane przebiegi były spokojniejsze, oscylacje były redukowane, a wartość zadana była szybciej osiągana. Biorąc pod uwagę zarówno kształty przebiegów jak i otrzymane wartości wskaźnika  $E$ , stwierdziliśmy, że najbardziej korzystne jest wykorzystanie funkcji przynależności postaci funkcji Gaussa dla  $n_r = 4$ . Poniżej przedstawiono ostatecznie wybrane funkcje przynależności.



A tak prezentowały się otrzymane przebiegi sygnałów sterowania oraz wyjścia i wartości zadanej:



Zbadaliśmy także wpływ parametru  $\lambda$  na jakość regulacji dla  $n_r \in \{2, 3, 4\}$  i z funkcjami przynależności postaci funkcji Gaussa. Dobranie różnych wartości parametru  $\lambda$  dla każdego regulatora lokalnego sprawiło, że jakość regulacji ulegała nieznacznej poprawie. Ostatecznie przyjęliśmy parametry regulatorów:  $\lambda^1 = 0,2$ ,  $\lambda^2 = 0,6$ ,  $\lambda^3 = 0,1$ ,  $\lambda^4 = 10$ .

## 9. Podsumowanie i wnioski

W przypadku pojedynczych regulatorów układ działał w sposób zadowalający tylko w niektórych punktach pracy. Tymczasem po zastosowaniu regulatorów rozmytych ogólna jakość regulacji uległa poprawie. Udało się zapewnić szybsze działanie układu, a także wyeliminować wszelkie oscylacje. Dla regulacji PID udało się uzyskać lepsze wartości współczynnika  $E$  dla regulacji rozmytej w porównaniu do regulacji tradycyjnej z pojedynczym regulatorem. W przypadku DMC ten wskaźnik wprawdzie się pogorszył po wprowadzeniu regulacji rozmytej, jednak poprawiła się szybkość i dokładność osiągania wartości zadanej. Przeprowadzone przez nas eksperymenty pokazały jak ważne jest odpowiednie dobranie liczby regulatorów lokalnych. Zwiększenie  $n_r$  przyczyni się do ogólnej poprawy jakości regulacji, jednak kosztem złożoności obliczeniowej algorytmu. Dla badanego obiektu wartość  $n_r = 4$  okazała się satysfakcjonująca zarówno dla regulatora PID jak i DMC.

Ważnym zagadnieniem było także wybranie kształtu funkcji przynależności. Okazało się, że ich wybór jest zależny od rodzaju algorytmu. Dla PID najlepsze działanie zapewniły funkcje trójkątne, a dla DMC funkcje Gaussa.