

ROZMYWANIE REGULATORÓW LINIOWYCH

Wprowadzenie

Systemy liniowe stanowią ważną klasę obiektów we współczesnej automatyce. Ich cechy charakterystyczne jak addytywność czy jednorodność sprawiają, że proces projektowania algorytmów mających kontrolować pracę takich układów staje się o wiele prostszy. Dzięki temu na przestrzeni ostatnich dekad rozwinęto się kilka koncepcji, które pozwalają na stosunkowo prostą, a dzięki temu niezawodną, implementację regulatorów dedykowanych procesom tej klasy. Wśród najpopularniejszych z nich możemy wymienić :

- regulatory PID (*Proportional-Integral-Derivative*)
- regulatory predykcyjne, np. DMC, GPC, MPCs
- regulatory ze sprzężeniem od stanu

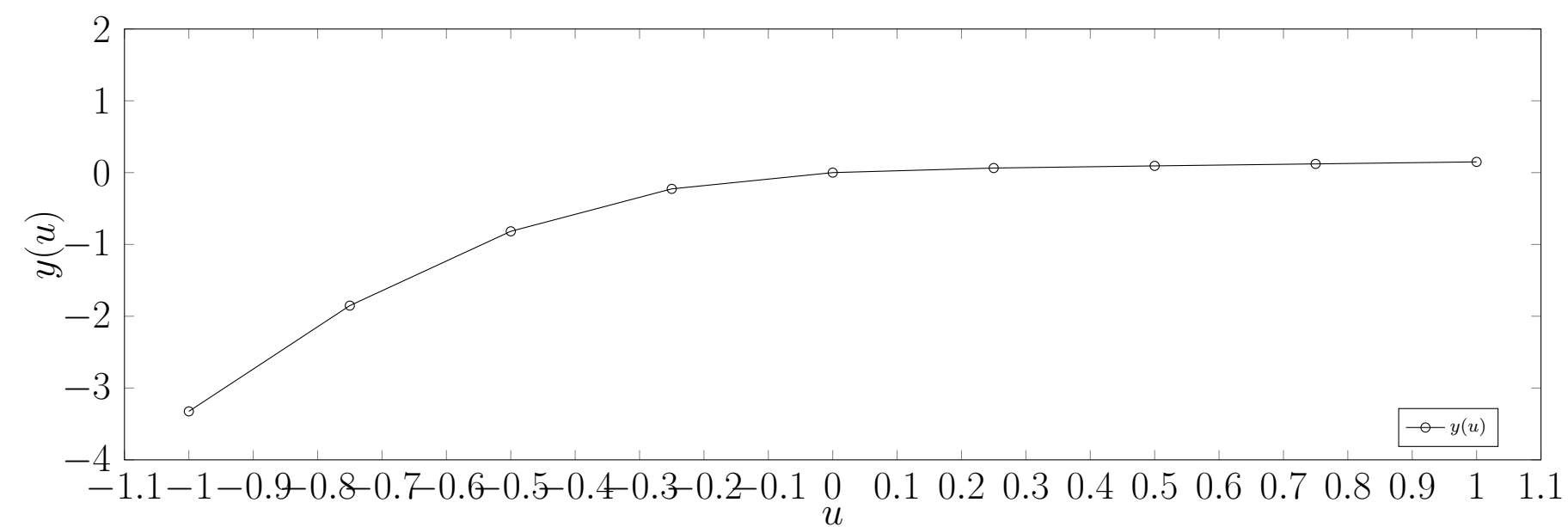
Dzięki popularności tych algorytmów, społeczność inżynierów wypracowała standardowe metody postępowania, które znacznie przyspieszają proces kalibracji bazujących na nich regulatorów, a tym samym skracają czas potrzebny na włączenie ich w rytm produkcyjny przedsiębiorstw.

Obiekty nieliniowe

Niestety znaczna część rzeczywistych obiektów regulacji wykazuje różnego rodzaju nieliniowości. Czasami nieliniowość obiektu można pominąć w pewnym niewielkim przedziale jej charakterystyki. Innym razem możliwe jest zastosowanie pewnej transformacji wartości wejściowych lub wyjściowych tak, aby sumaryczny układ był liniowy. Wszędzie tam, gdzie zabiegi te nie są możliwe, zachodzi potrzeba skonstruowania regulatora, którego charakter pozwoli na bezpośrednią regulację obiektu nieliniowego.

Cele i założenia projektu

Celem przeprowadzonych przez nas badań było pokazanie zalet płynących z zastosowania regulatorów dedykowanych pracy z układami nieliniowymi. Operując na modelu obiektu dynamicznego dostarczonego nam w postaci funkcji języka *Matlab*. Pierwszy rzut oka na poniższą charakterystykę statyczną utwierdza w przekonaniu o jego nieliniowości.



W ramach projektu zaimplementowane zostały cztery algorytmy regulacji: PID i DMC oraz ich rozmyte odpowiedniki. Regulacja rozmyta polega na przybliżeniu charakterystyki nieliniowego układu dynamicznego za pomocą lokalnych modeli liniowych, do których możliwe jest zastosowanie regulatorów liniowych. Wartość sterowania wyznaczana przez regulator rozmyty jest ważoną sumą sterowań obliczanych przez regulatory lokalne. Wagi determinowane są przez aktualny punkt pracy układu. Ogólne równanie regulatora rozmytego można przedstawić w postaci:

$$u_k = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ki} \times f_i(y_k)}{\sum_{i=1}^n f_i(y_k)} \vee u_k = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ki} \times f_i(u_{k-1})}{\sum_{i=1}^n f_i(u_{k-1})} \quad (1)$$

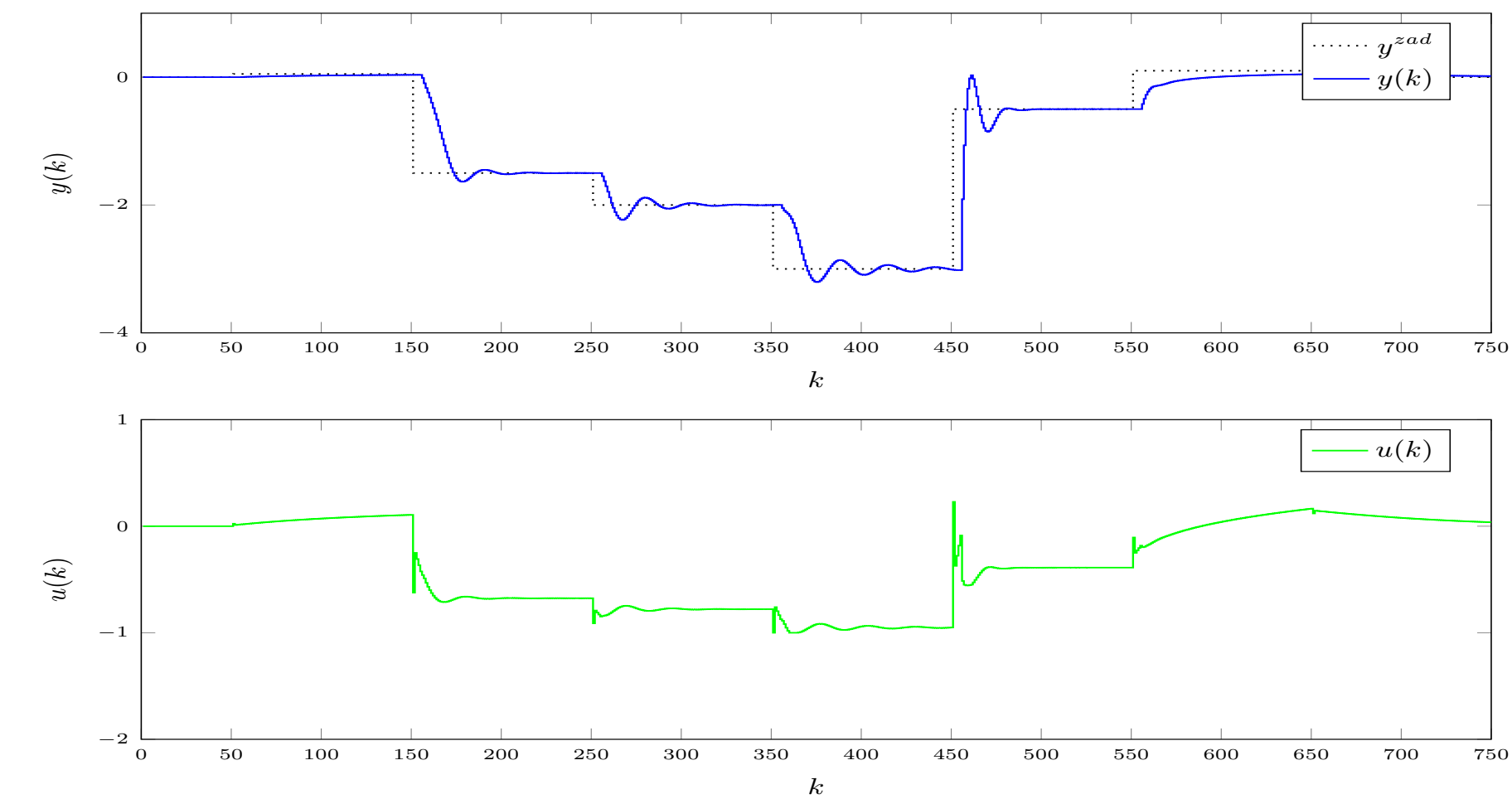
gdzie $f_i(*)$ są wartościami funkcji przynależności (zwanymi także funkcjami rozmywającymi) przypisanych do poszczególnych regulatorów lokalnych. W trakcie badań badań posługiwaliśmy się funkcjami o kształcie gaussowskim danymi wzorami:

$$f(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2 \times \delta^2}\right) \quad (2)$$

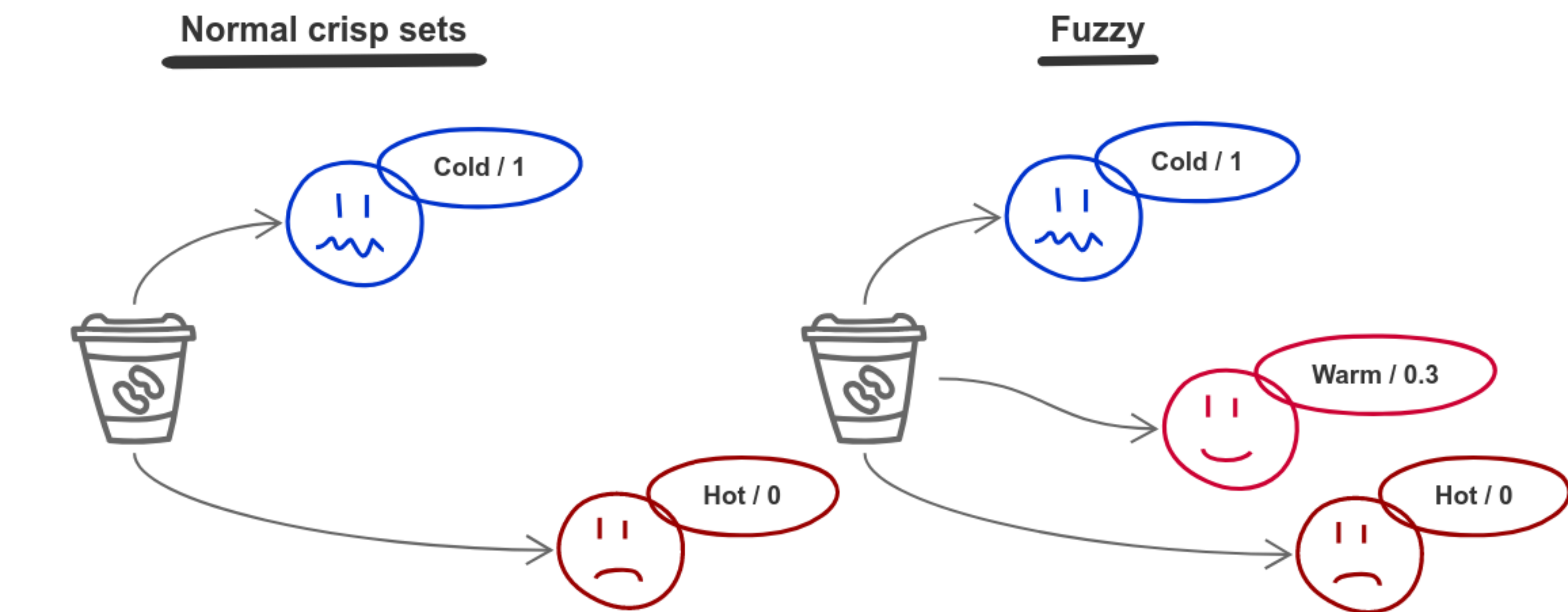
Parametry m oraz δ , które definiują kształt krzywej były dobierane w procesie kalibracji wraz z parametrami lokalnych regulatorów liniowych. Niższa praca przedstawia spójne, systematyczne podejście do strojenia badanych regulatorów rozmytych wraz z zestawieniem i podsumowaniem jego efektów.

Klasyczne regulatory PID i DMC

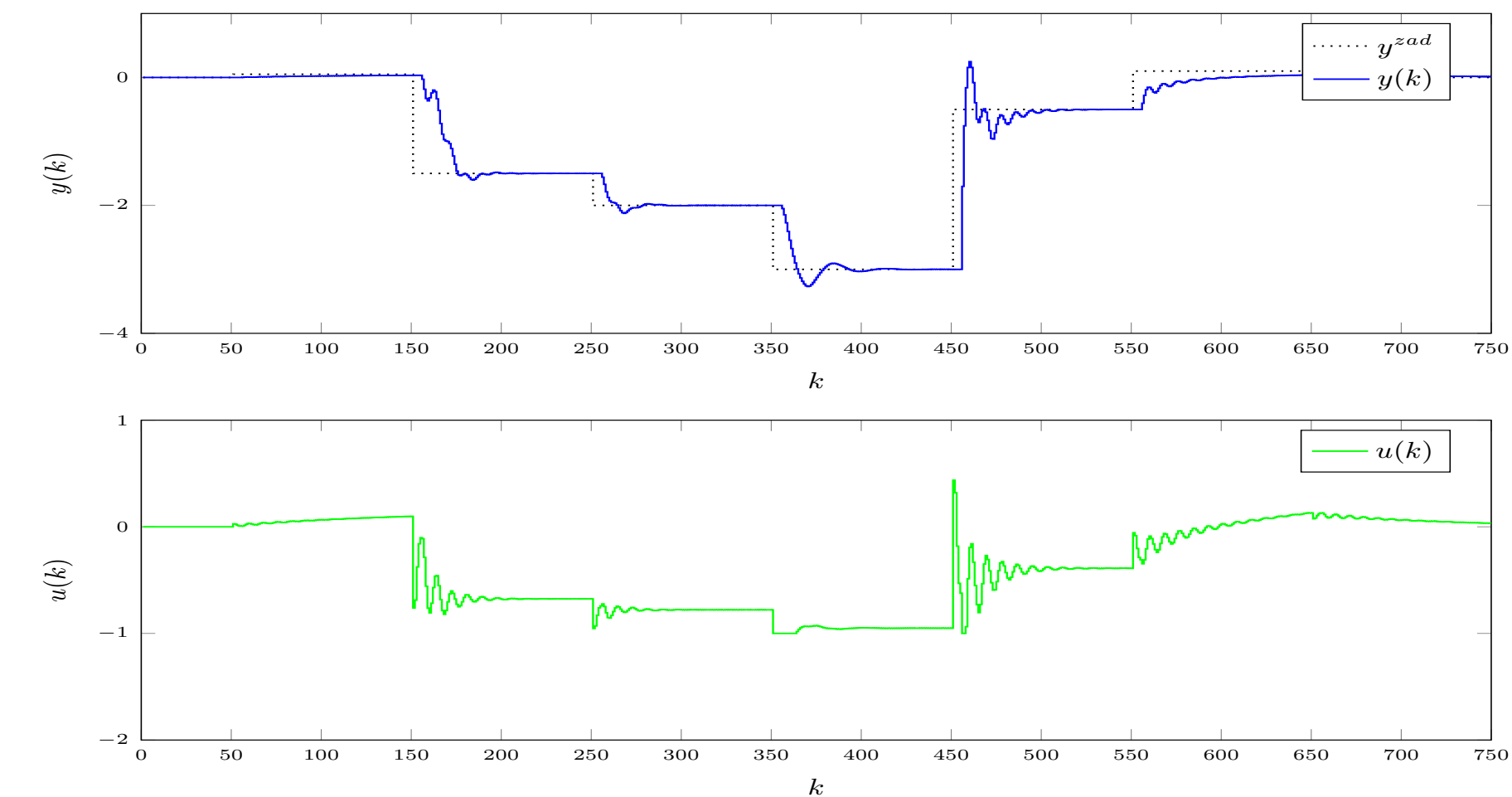
W pierwszej kolejności zajęliśmy się regulatorami liniowymi. Ze względu na bagaż doświadczeń (oraz emocjonalny) nabyty w ciągu dwóch lat regularnego obcowania z obydwoma algorytmami, zdecydowaliśmy się na dostrojenie ich **metodą inżynierską**. Jak pokazały dalsze testy, pozwoliło nam to na uzyskanie lepszych efektów niż w przypadku wykorzystania gotowych algorytmów optymalizacyjnych dostępnych w pakiecie `optimisation toolbox`.



Chociaż porównanie przebiegów wartości zadanej i wartości rzeczywistej nie prezentuje się fatalnie, to wyraźnie pokazuje ono mankamenty algorytmów liniowych.



Występują wyraźne przeregulowania, czas regulacji pozostawia sporo do życzeni, a sygnał sterujący, szczególnie w przypadku DMC, ma tendencję do nagłej zmiany wartości.



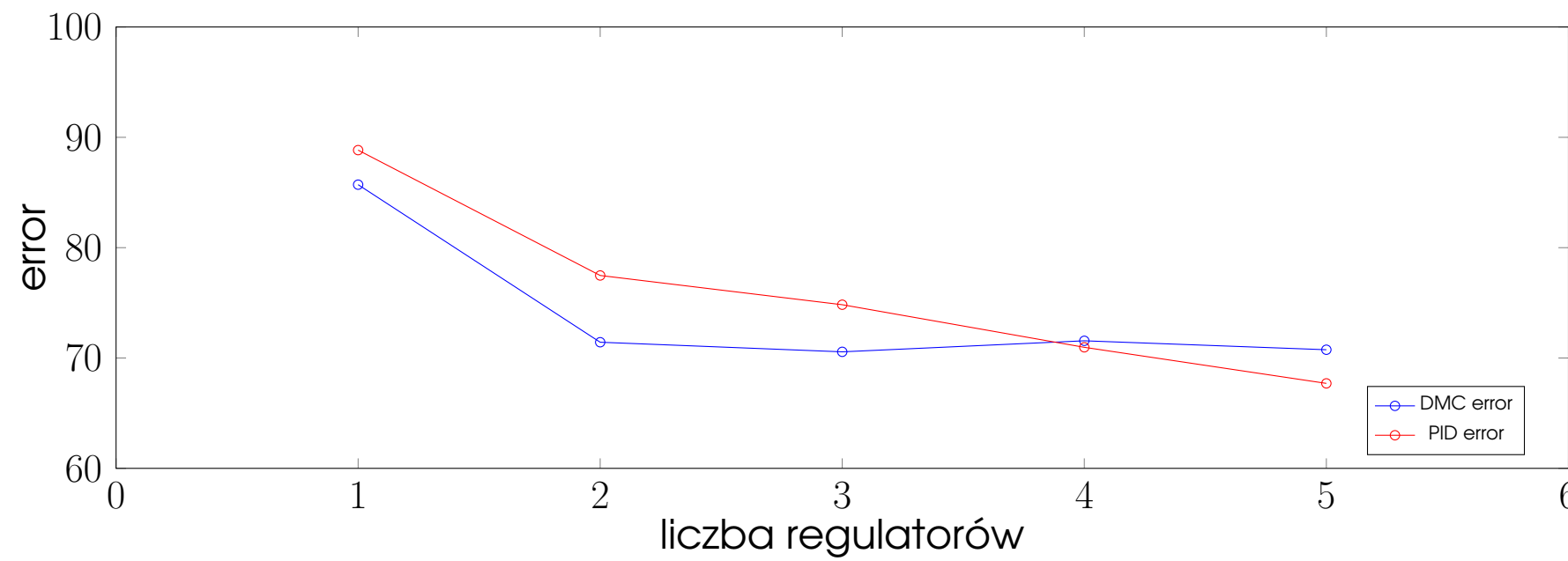
Warto zauważyć, że przedstawiona trajektoria zadana jest dość specyficzna. Ukazuje ona tylko jedną zmianę wartości zadanej o znacznej amplitudzie, co nie pozwala dostrzec zachowania regulatorów przy jej znacznej w przeciwnym kierunku. Najprawdopodobniej przy szerszym spektrum zmian regulatory ukazałyby swoją niedoskonałość w znacznie większym stopniu.

Kalibracja regulatorów rozmytych

Chociaż regulatory rozmyte oferują znacznie większą elastyczność w kontekście procesów możliwych doysterowania, to jednak wprowadzają one znaczne komplikacje w dziedzinie doboru ich nastaw. Wynika to z faktu, że liczba parametrów rości w ich przypadku liniowo wraz ze wzrostem liczby regulatorów lokalnych. Składania to do postawienia tezy, że zwiększanie liczby regulatorów przynosi poprawę jedynie do pewnego momentu. Ich zbyt duża ilość, prowadzi do błędów kalibracji, które kompensują poprawę wynikającą z lepszego dopasowania regulatora do charakterystyki obiektu. W związku z powyższymi spostrzeżeniami procedura doboru parametrów musiała być z góry zaplanowana. Regulatory testowaliśmy rozpoczynając zawsze od jednego regulatora lokalnego. Badanie algorytmu kończyliśmy wówczas, gdy dalsze zwiększanie liczby regulatorów skutkowało pogorszeniem regulacji. Każdy wariant kalibrowany był w pięciu krokach:

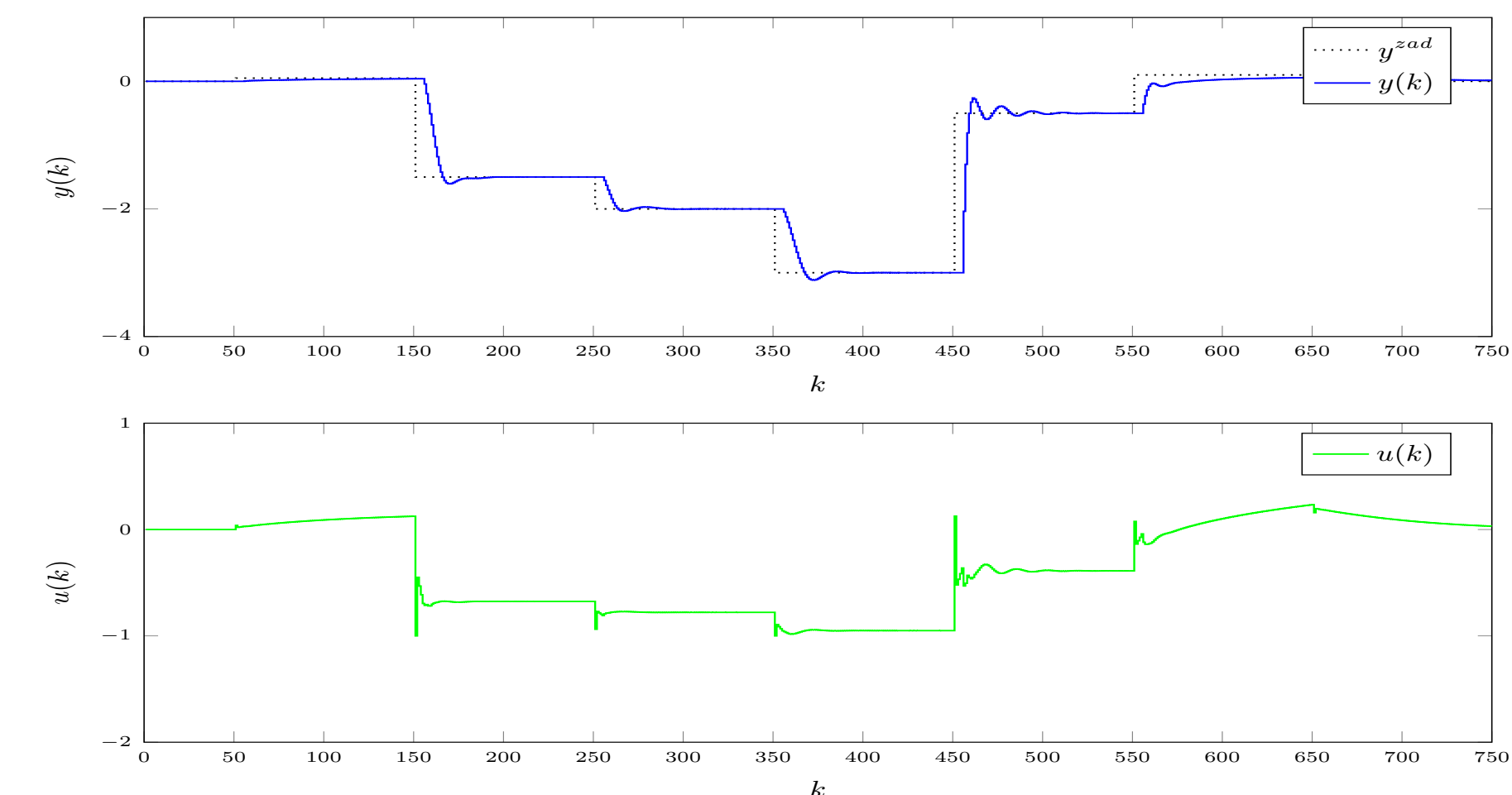
- Równomierne rozłożenie regulatorów lokalnych w obszarze pracy
- Optymalizacja parametrów przy użyciu algorytmu ewolucyjnego (parametry wszystkich regulatorów równe)
- Skonstruowanie dedykowanych przebiegów wartości zadanej pobudzających obszar pracy każdego z lokalnych regulatorów
- Indywidualna optymalizacja regulatorów ze względu na błędy popełniane na skonstruowanych trajektoriach
- Ręczna poprawa parametrów wybranych regulatorów

Sprecyzowany schemat postępowania pozwolił nam obiektywnie porównywać poszczególne warianty i znacznie przyspieszył prowadzenie badań. Na tym etapie warto podkreślić, że jako *zmienna rozmywająca* wybrana została wartość wyjściowa obiektu. Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że prowadzi to do poprawienia jakości regulacji, co dało się przewidzieć już na etapie analizy charakterystyki statycznej obiektu. Dalsze badania potwierdziły stawianą tezę, co przedstawia poniższy wykres. Pewien niepokój może powodować fakt zwiększenia błędu przy 4 regulatorach DMC, jednak było to spowodowane nieoptymalnym rozlokowaniem regulatorów na danym zakresie sterowania (regulatory rozlokowane były w równych odstępach).

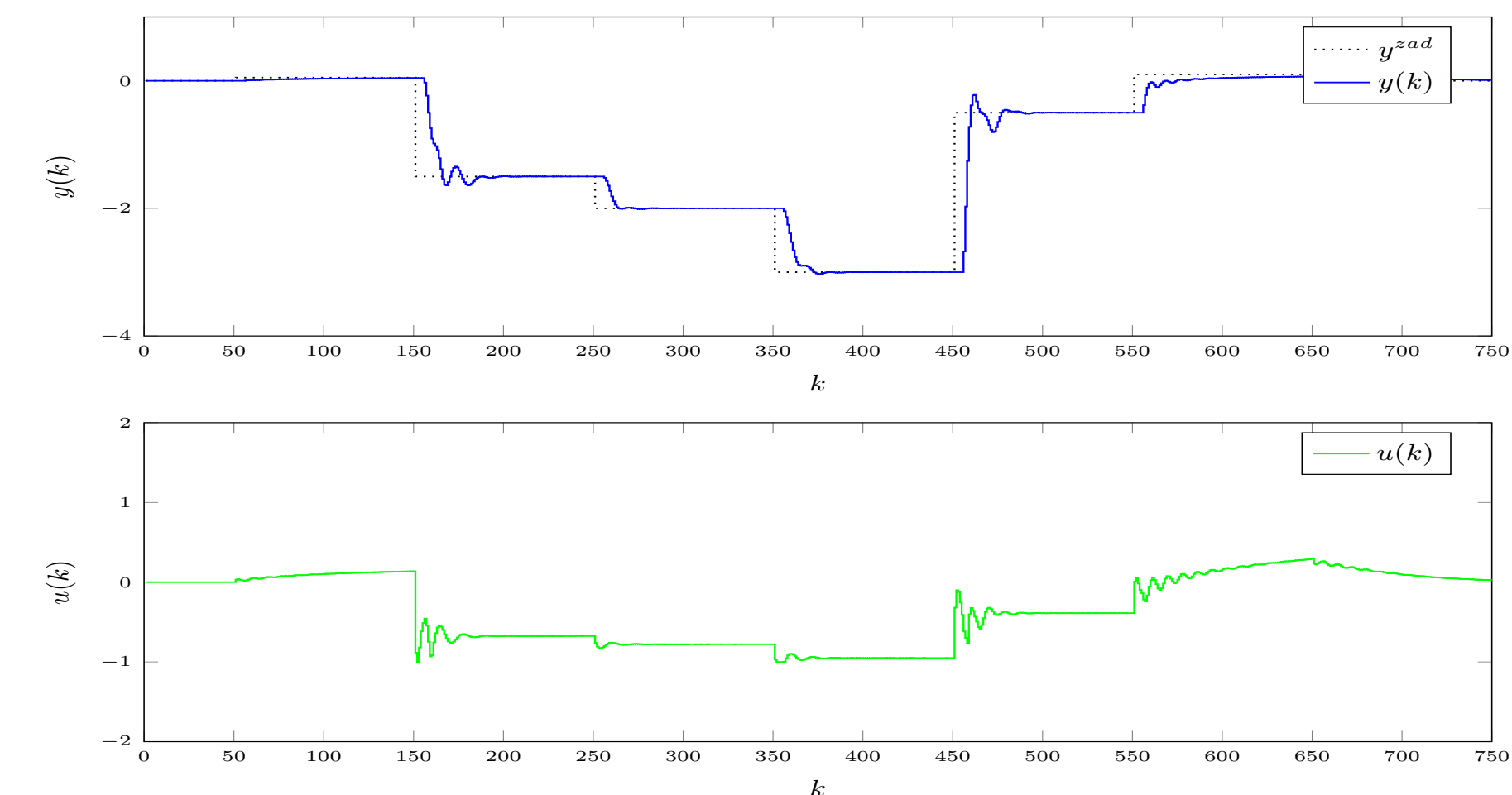


Wyniki regulacji rozmytej

Zgodnie z przewidywaniami, rozmycie regulatorów liniowych pozwoliło uzyskać zauważalnie, chociaż nie nadzwyczajnie lepszą jakość regulacji. Podstawą oceny jakości regulacji był sumaryczny błąd kwadratowy popełniany przez regulator w trakcie symulacji. W mniejszym stopniu brany był także pod uwagę charakter przebiegu wartości sterującej. Rozmywanie regulatora PID zakończyliśmy na **5 regulatorach rozmytych**. W tej konfiguracji uzyskaliśmy najmniejszy błąd regulacji. Przy wszystkich zmianach wartości zadanej wyraźnie zmniejszone zostało przeregulowanie, co jest nierzadko jednym z najważniejszych kryteriów regulacji. Ponadto, w dolnych partiach charakterystyki udało się uzyskać znaczne skrócenie czasu regulacji. Jedynie przy widocznym na wykresie skoku wartości zadanej w kierunku dodatnim, czas regulacji wydłużył się.



Większą poprawę zauważyć można przy porównaniu klasycznej i rozmytej wersji regulatora DMC. Dzięki **zwiększeniu liczby regulatorów lokalnych do 3** uzyskaliśmy znaczne zmniejszenie przeregulowania oraz skrócenie czasu regulacji przy każdym ze skoków wartości zadanej. Również przebieg sygnału sterującego charakteryzuje się zmniejszonymi oscylacjami oraz szybszym czasem stabilizacji.



Uzyskane przez nas wyniki jednoznacznie pokazują zastosowanie teorii zbiorów rozmytych w zadaniu regulacji obiektów nieliniowych przyczynić się może do poprawy jakości sterowania. Jednocześnie zabieg ten nie jest okupiony dużym wzrostem skomplikowania idei sterowania, ponieważ inżynier wciąż ma do czynienia ze standardowymi regulatorami liniowymi tylko, że w większej liczbie.

Podsumowanie

Logika rozmyta została wprowadzona do powszechnego obiegu w latach 60' ubiegłego wieku, chociaż wcześniej zajmowali się nią takie osobistości jak prof. Jan Łukasiewicz czy prof. Alfred Tarski. Od tamtej pory znalazła ona zastosowania w szeregu różnych dziedzin poczynając od analizy mowy, przez podejmowanie decyzji medycznych czy biznesowych, na autonomicznych systemach obronnych kończąc. Swoje miejsce zajęła także w dziedzinie szeroko pojętego sterowania. Wykorzystanie logiki rozmytej pozwala nie tylko modelować procesy nieliniowe z pomocą kilku dobrze znanych, liniowych modeli, ale umożliwia także matematyczne ujęcie nieprecyzyjnej ("rozmytej") wiedzy eksperckiej. Połączona z innymi, dobrze przeanalizowanymi na przestrzeni dekad, metodami regulacji stanowi ona potężne narzędzie w rękach współczesnych inżynierów. Jej przykład pokazuje, że na równi z postępującym rozwojem technologii, ważne jest rozwijanie solidnych podstaw matematycznych, ponieważ to one zapewniają nam wydajne wykorzystanie posiadanych zasobów obliczeniowych.