

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

**Sprawozdanie z projektu nr 3
zespół nr 9**

Paweł Bugyi, Marcin Michalski, Krzysztof Pierczyk

Warszawa, 2020

Spis treści

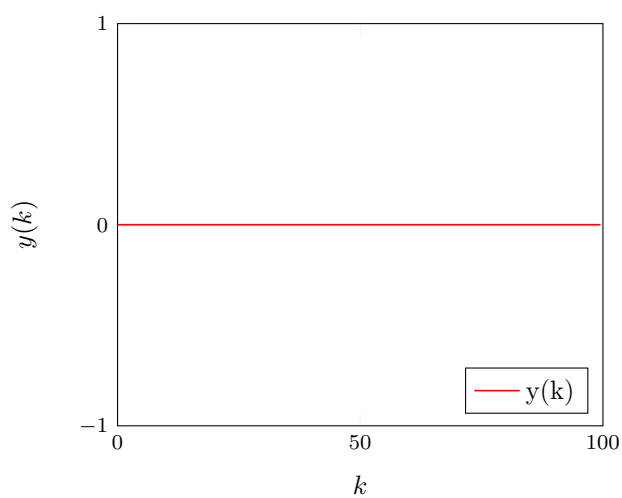
1. Wstęp	2
2. Badanie poprawności punktu pracy	3
3. Badanie odpowiedzi skokowej	4
4. Implementacja regulatorów liniowych	6
4.1. Regulator PID	6
4.2. Regulator DMC	7
5. Strojenie regulatorów klasycznych	10
6. Rozmyte algorytmy PID i DMC	13
7. Kalibracja regulatorów rozmytych	15
7.1. Kalibracja rozmytych regulatorów PID	15
7.2. Kalibracja rozmytych regulatorów PID	21
8. Analiza wyników kalibracji rozmytego regulatora PID	25
9. Analiza wyników kalibracji rozmytego regulatora DMC	31
9.1. Kalibracja parametru λ	36
10. Podsumowanie	41

1. Wstęp

Zagadnienia związane z obiektami liniowymi oraz metodami ich regulacji stanowią ważną klasę problemów w teorii układów dynamicznych. Jednakowe wzmocnienie obiektu w całym przedziale pracy pozwala w dużym stopniu zredukować moc obliczeniową potrzebną do implementowania algorytmów regulacji, a i same algorytmy mogą zachować stosunkowo prostą strukturę. Powoduje to, że liniowość obiektów regulacji jest jedną z ich najbardziej porządkanych cech. Jednak wiele układów rzeczywistych wykazuje nieliniowość w pełnym, lub częściowym zakresie punktów pracy co sprawia, że wymagane jest znalezienie bardziej złożonych metod ich regulacji. 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 o charakterze nieliniowym. Jednym z podejść, jakie stosuje się w takich sytuacjach jest wykorzystanie kilku regulatorów liniowych, pracujących w różnych punktach charakterystyki obiektu regulacji, których wkłady do ostatecznej wartości sterującej zależą od aktualnego położenia punktu pracy. Regulatory tego typu nazywają się **regulatorami rozmytymi**. Poniższy projekt ma na celu pokazać zalety regulacji rozmytej na przykładzie algorytmu DMC.

2. Badanie poprawności punktu pracy

Zgodnie z tradycją pierwsze z zadań polegało na zweryfikowaniu podanego w treści zadania punktu pracy obiektu regulacji. Punkt ten powinien mieć współrzędne $u = y = 0$, gdzie kolejne symbole oznaczają wartość sterowania oraz wartość wyjściową. Weryfikacja polegała na podaniu na wejście procesu wartości zerowej i obserwowaniu zachowania wyjścia. Zgodnie z oczekiwaniami, wyjście ustaliło się na poziomie $y = 0$, co zostało zaprezentowane na wykresie 2.1..



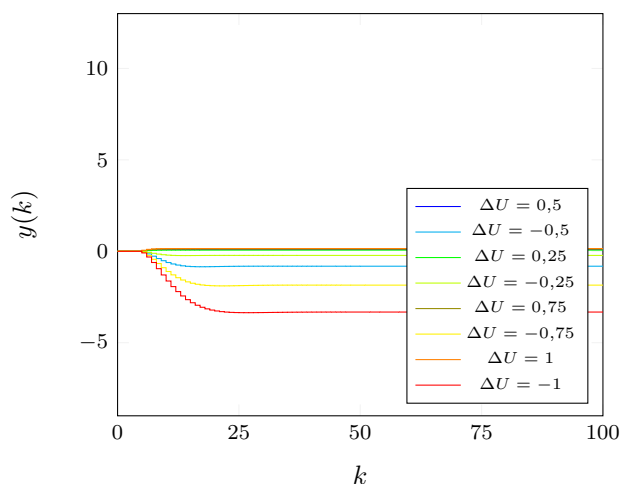
Rys. 2.1. Punkt pracy

3. Badanie odpowiedzi skokowej

W zadaniu drugim, również tradycyjnie, zmierzaliśmy się z zadaniem zbadania odpowiedzi skokowych układu dla różnych wielkości skoków wejścia. W tym celu przeprowadziliśmy 8 symulacji po 4 w kierunku dodatnich i ujemnych wartości sterowania. Wszystkie skoki odbywały się z punktu pracy $u = y = 0$, a ich wartości zawierały się w przedziale

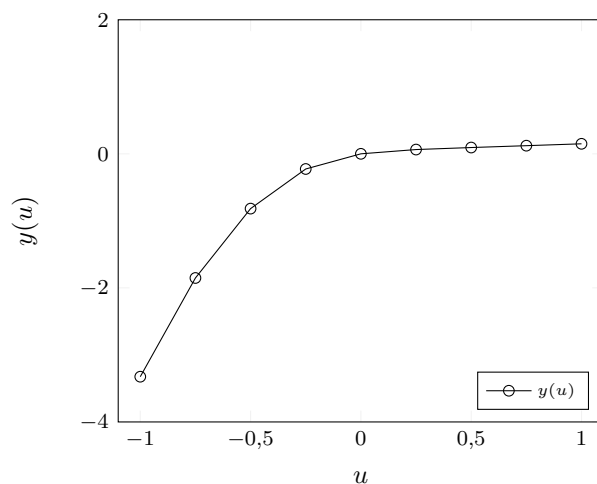
$$-1 \leq u \leq 1 \quad (3.1)$$

Przedział ten został równomiernie pokryty przez wartości skoków, co pozwoliło pokazać charakter obiektu regulacji w całym przedziale pracy. Wyniki wszystkich symulacji zostały przedstawione na wykresie 3.1..



Rys. 3.1. Przebieg wartości wyjściowej procesu przy skokowej zmianie sygnału sterującego

Wyniki eksperymentów w wyraźny sposób ukazują spodziewany, nieliniowy charakter procesu. Wartości wyjściowe przy dodatnich skokach sterowania nie przekraczały poziomu 0,15, gdy przy skokach ujemnych sięgały wartości bliskich 3,5. Nieliniowość obiektu widać jeszcze wyraźniej, jeśli spojrzeć się na charakterystykę statyczną przedstawioną na wykresie 3.2..



Rys. 3.2. Charakterystyka statyczna

W części dodatniej (ze względu na wartości sterowania) charakterystyka wydaje się mieć charakter przynajmniej w przybliżeniu liniowy. Jednak w części ujemnej zależność między wartością wejścia, a ustaloną wartością wyjścia staje się silnie nieliniowa (w przybliżeniu kwadratowa). Taka sytuacja każe nam sądzić, że zastosowanie do regulacji obiektu klasycznych algorytmów liniowych typu PID lub DMC może dać niezadowalające efekty. Teza ta zostanie sprawdzona na kolejnych etapach badań.

4. Implementacja regulatorów liniowych

Aby pokazać, że algorytmy liniowe nie sprawdzają się w przypadku regulacji obiektów nieliniowych, zaimplementowane zostały dwa klasyczne regulatory PID (*ang. Proportional Integral Derivative Controller*) oraz DMC (*ang. Dynamic Matrix Control*). Oba algorytmy zostały zaimplementowane w postaci klas języka Matlab, co pozwoliło w dużym stopniu ujednolicić ich interfejsy, a tym samym skrypty testujące ich działanie.

Uwaga. Określenia "algorytmy liniowe" oraz "regulatory liniowe" są jedynie skrótem myślowym i nie należy kojarzyć ich z liniowością samych regulatorów jako układów dynamicznych. Odnoszą się one do faktu, że dana metoda regulacji jest zaprojektowana do sterowania procesami liniowymi.

4.1. Regulator PID

Regulator PID jest jednym z najbardziej znanych regulatorów liniowych. Zawdzięcza to przede wszystkim swojej prostocie, zarówno w domenie koncepcyjnej, jak i domenie implementacyjnej. Posiada on jedynie trzy parametry strojenia co umożliwia stosowanie automatycznych procedur ich optymalizacji, jeżeli tylko posiadamy model obiektu regulacji.

Koncepcja, która leży u podstaw algorytmu, polega na aktualizowaniu wartości sterowania na bazie aktualnego uchybu (różnicy między wartością zadaną, a rzeczywistą wartością wyjścia procesu). Zależność między wejściem, a wyjściem regulatora ma trojaki charakter, co ukazane jest w klasycznym równaniu regulatora 4.1.

$$u(k) = K[1 + \frac{T}{2T_i}(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}) + \frac{T_d}{T}(1-z^{-1})]e(k) \quad (4.1)$$

Powyższa formuła zawiera trzy składniki. Pierwszy z nich to *człon proporcjonalny*. Dzięki niemu siła z jaką regulator reaguje na wychylenia uchybu jest wprost proporcjonalna do jego wartości. Chociaż ma on największy wpływ na jakość regulacji, to jednak, gdy występuje osobno, posiada pewien uciążliwy mankament. Regulator proporcjonalny (czyli operujący jedynie na członie proporcjonalnym) charakteryzuje się tzw. uchybem ustalonym, tzn. różnicą między wartością zadaną, a wartością rzeczywistą wyjścia procesu w stanie ustalonym. Aby wyeliminować tę niedoskonałość wprowadza się drugi człon zwany *członem całkującym*. Jego wkład do sterowania jest tym większy, im dłużej występuje niezerowa wartość uchybu. Regulator składający się tylko z tych dwóch członów (regulator PI) jest często wystarczający przy sterowaniu obiektów o wolniejszej dynamice. Aby zwiększyć szybkość reagowania regulatora wprowadza się jeszcze jeden element, a mianowicie *człon różniczkujący*. Wprowadza on zależność między wartością sterowania, a **szybkością zmian** uchybu. Jako że uchyb zawiera w sobie zarówno wartość wyjściową, jak i wartość zadaną, odpowiednie dostrojenie członu różniczkującego pozwala nie tylko dostosować się do dynamiki obiektu, ale również zwiększyć szybkość reagowania na zmiany wartości zadanej.

Powyższe równania zależą nie tylko od aktualnej wartości uchybu ale również od jego wartości z chwili poprzedniej oraz sumy wszystkich jego wartości od rozpoczęcia procesu regulacji. Po zaaplikowaniu do równań kilku algebraicznych transformacji można otrzymać formułę, która

zależy od aktualnej wartości uchybu, jego wartości z dwóch poprzednich chwil oraz ostatniej wartości sterowania. Postać ta jest bardziej przystępna w implementacji i to właśnie ona została wykorzystana w zaprojektowanym przez nas regulatorze. Równania wynikowe przedstawiono poniżej.

$$u(k) = r_0 * e(k) + r_1 * e(k-1) + r_2 * e(k-2) \quad (4.2)$$

$$r_0 = K * (1 + \frac{T_s}{2 * T_i} + \frac{T_d}{T_s}) \quad (4.3)$$

$$r_1 = K * (\frac{T_s}{2 * T_i} - \frac{2 * T_d}{T_s} - 1) \quad (4.4)$$

$$r_2 = K * \frac{T_d}{T_s} \quad (4.5)$$

4.2. Regulator DMC

Regulator DMC należy do rodziny algorytmów predykcyjnych. Algorytmy te, bazujące na pewnym modelu regulowanego procesu, przeprowadzają proces optymalizacji wartości sygnałów sterujących w kilku kolejnych iteracjach algorytmu. Liczba chwil dyskretnych, na które wyznaczane są sterowania, nazywa się *horyzontem sterowania*, i jest oznaczana przez N_u . Ilość przyszłych chwil, z których brana jest pod uwagę przewidywana wartości regulowanej oznacz się przez N i zwyczajowo nazywa się *horyzontem predykcji*.

Metoda optymalizacji stosowana przez dany algorytm jest uzależniona od kilku czynników. Przede wszystkim bierze się pod uwagę, czy dla określonego przez algorytm problemu optymalizacji istnieją rozwiązania analityczne. Jeżeli tak, ich zastosowanie pozwala w bardzo dużym stopniu zredukować wymagania dotyczące mocy obliczeniowej konsumowanej przez regulator. Warto zauważyć, że w rzeczywistości wszystkie układy sterowania mają pewne ograniczenia co do możliwości generowania sterowania. Analityczne rozwiązania dla problemów optymalizacji z ograniczeniami są w praktyce dość rzadkie, co wymusza stosowanie **rzutowania sterowań wyznaczonych przez algorytm** na zbiór ograniczeń. Jako, że rzutowanie odbywa się poza procesem optymalizacji, prowadzi to często do pogorszenia jakości regulacji, gdyż algorytm nie posiada pełnej informacji o procesie i wyznaczone przez niego wartości nie są optymalne. Aby temu zaradzić stosuje się często numeryczne metody optymalizacji, które w łatwy sposób umożliwiają uwzględnienie ograniczeń, jednak są znacznie bardziej kosztowne obliczeniowo.

Każdy algorytm predykcyjny charakteryzuje się typem modelu, z jakiego korzysta, i na bazie którego estymuje wartości wyjść procesu na horyzoncie predykcji. W przypadku regulatora DMC model ten przedstawiony jest w postaci **odpowiedzi skokowej**, będącej wektorem wartości wyjścia procesu w kolejnych chwilach po wykonaniu na jego wejściu *skoku jednostkowego*. Dla dokładności regulacji ważne jest to, aby wektor ten miał wartość nie krótszą niż **rzęd dynamiki** obiektu. Wartość ta, oznaczana często przez D , określa liczbę chwil dyskretnych, po których wejście procesu można uznać za ustabilizowane. Po zebraniu odpowiedzi skokowej konieczne jest rozwiązanie problemu optymalizacji danego wzorem 4.6.

$$J(k) = \sum_{p=1}^N (y^{zad}(k+p|k) - \hat{y}(k+p|k))^2 + \sum_{p=0}^{N_u} \lambda_p (\Delta u(k+p|k))^2 \quad (4.6)$$

Funkcja celu składa się z dwóch składników. Pierwszy z nich określa skumulowany błąd regulacji (uchyb) estymowany na horyzoncie predykcji. Drugi wprowadza z kolei ograniczenia

na szybkość zmian sygnałów sterujących. Jako że model w postaci odpowiedzi skokowej reprezentuje liniową zależność pomiędzy zbiorem sterowań, a zbiorem wartości wyjściowych, powyższe równanie można przepisać do formy macierzowej, co przedstawiono w równaniu 4.7

$$J(k) = \|Y^{zad}(k) - \hat{Y}(k)\|_{\Psi}^2 + \|\Delta U(k)\|_{\Lambda}^2 \quad (4.7)$$

Okazuje się, że postawiony w ten sposób problem posiada rozwiązanie analityczne w postaci 4.8

$$\Delta U(k) = (M^T \Psi M + \Lambda)^{-1} M^T \Psi (Y^{zad}(k) - Y(k) - M^P \Delta U^P(k)) = K(Y^{zad}(k) - Y(k) - M^P \Delta U^P(k)) \quad (4.8)$$

$$Y^0 = Y(k) + M^P + \Delta U^P(k) \quad (4.9)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \phi_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \phi_N \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_N \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$M = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_N - N_u + 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$M^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \dots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

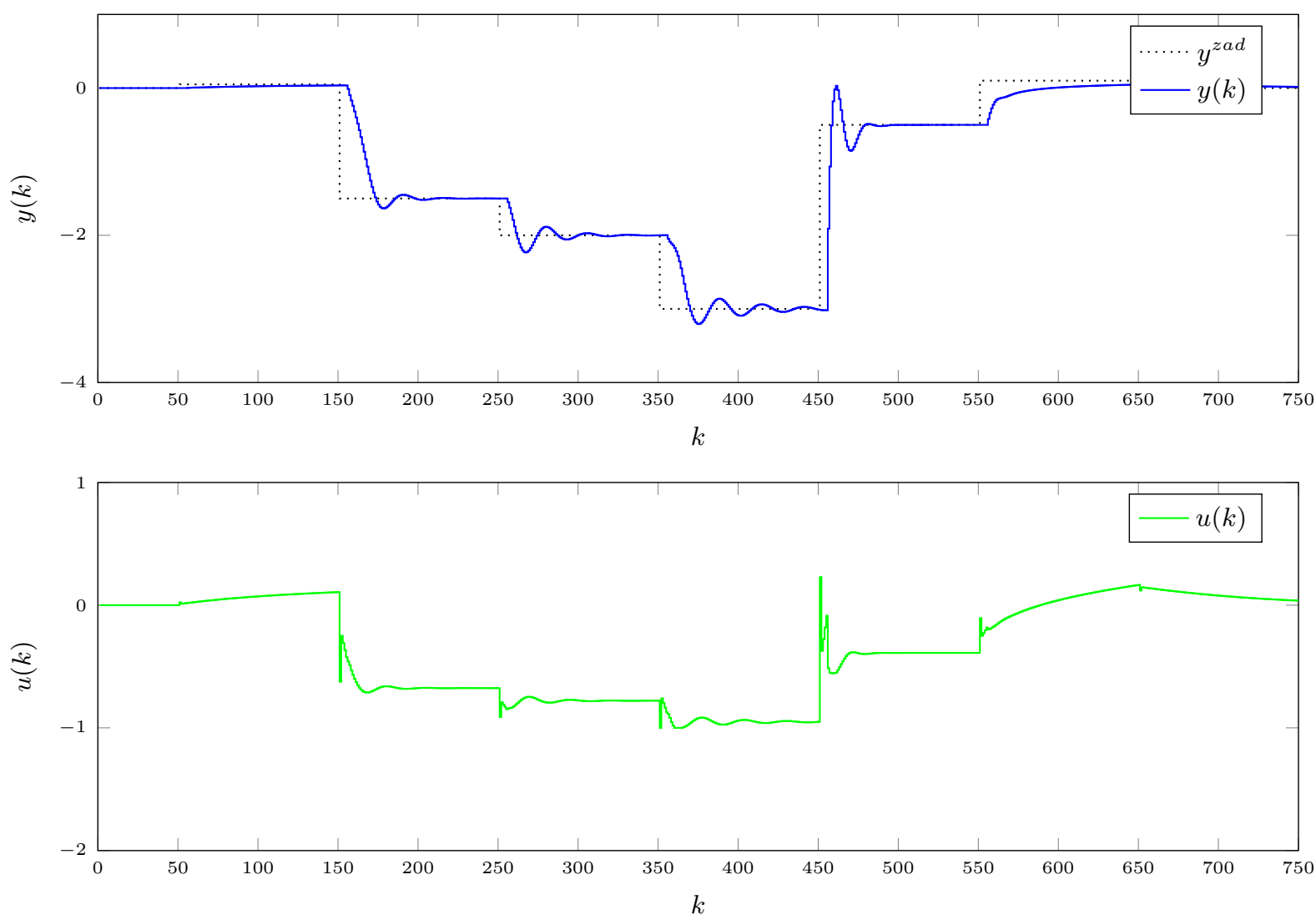
$$Y^{zad}(k) = \begin{bmatrix} y^{zad}(k) \\ y^{zad}(k) \\ \vdots \\ y^{zad}(k) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\Delta U^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta u(k-2) \\ \vdots \\ \Delta u(k-(D-1)) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Postać macierzy i wektorów występujących w równaniach przedstawiono we wzorach 4.9,4.10, 4.11,4.12,4.13, 4.14,4.15,4.16. Algorytm ten zaimplementowano w wersji "rozrzutnej", tzn. w takiej, w której wyznaczane są wszystkie przyrosty sterować na horyzoncie sterowania.

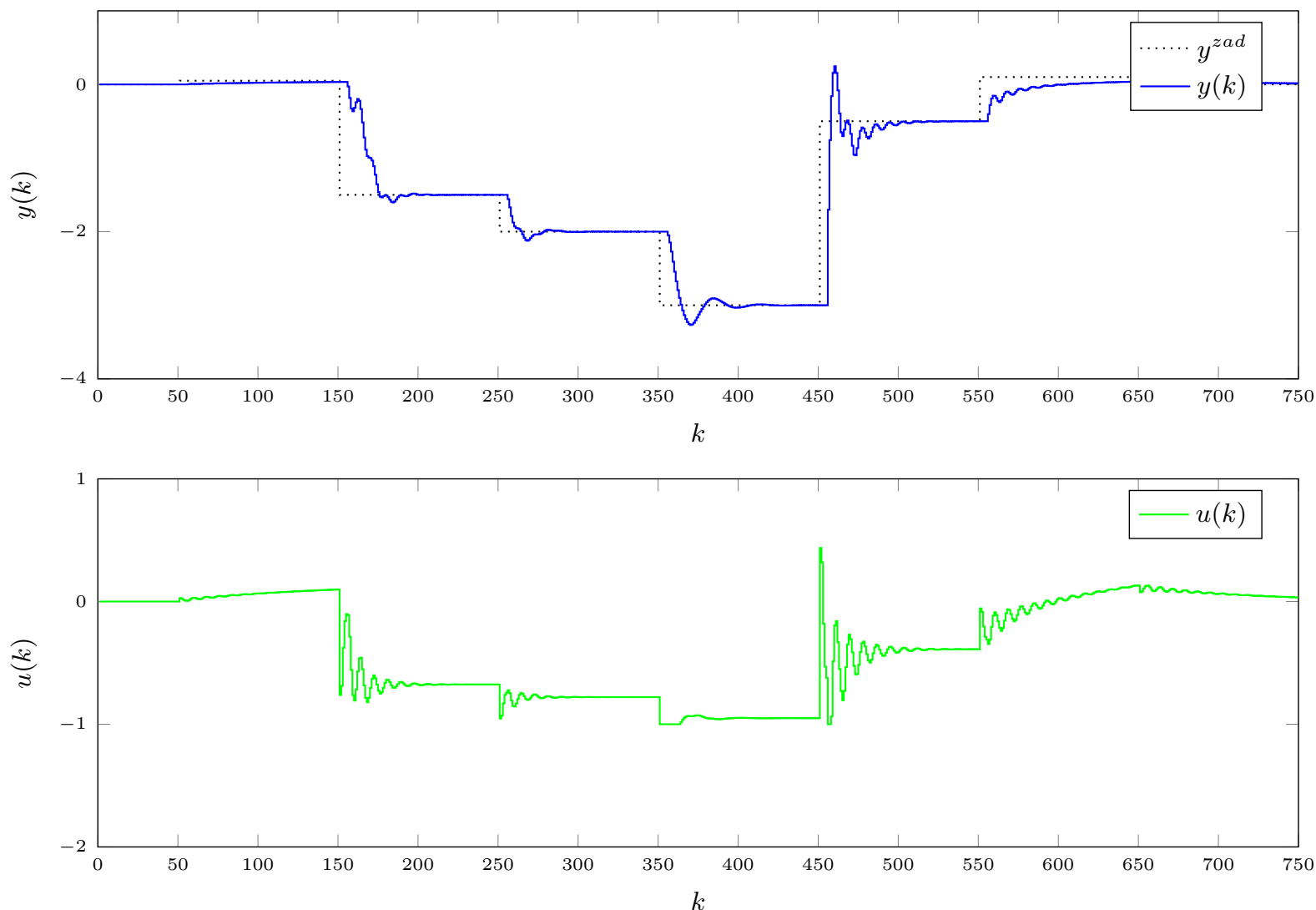
5. Strojeni regulatorów klasycznych

Stworzone regulatory zostały wstępnie dostrojone, po czym przeprowadzono z ich udziałem szereg symulacji w tych samym warunkach testowych. Zarówno w przypadku regulatora PID jak i DMC parametry zostały dobrane metodą inżynierską. Jak wiadomo, każdy student Automatyki i Robotyki posiada na trzecim roku studiów taki багаż doświadczeń związanych z obydwoma algorytmami, że optymalne parametry dla przypadków 1×1 wyczuwa podświadomie. Znalezione parametry regulatora PID zestawiono w tabeli 5.



Rys. 5.1. Przebieg eksperymentu dla dobranych parametrów regulatora PID

Przebiegi scenariusza testowego zostały przedstawione na 5. Jak widać jakość regulacji jest niedoskonała, ale biorąc pod uwagę, że algorytm PID nie jest przeznaczony dla procesów nieliniowych, wyniki i tak wypadają stosunkowo dobrze. Sumaryczny błąd regulatora rozumiany jako suma kwadratów uchybu ze wszystkich chwil dyskretnych symulacji wyniósł 88,835. Przebieg sterowania wydaje się dopuszczalny.



Rys. 5.2. Przebieg eksperymentu dla dobranych parametrów regulatora DMC

Parametry regulatora DMC znalazły się z kolei w tabeli 5. W jego przypadku przebiegi są łagodniejsze w części liniowej i trochę bardziej poszarpane po przejściu do obszaru liniowego. Zmiana ta została okupiona wzmożonymi oscylacjami sterowania po wykonywanych skokach. Sumaryczny błąd regulatora wyniósł 85,7141, czyli nieznacznie lepiej niż w przypadku regulatora PID.

K	T_i	T_d	T_s
0,174	2,3	0,8	0,5

Tab. 5.1. Parametry regulator PID

D	N	N_u	λ
51	15	7	0,2

Tab. 5.2. Parametry regulator DMC

6. Rozmyte algorytmy PID i DMC

Rozmyty algorytm regulacji polega na stworzeniu kilku regulatorów lokalnych, przeznaczonych do działania z obiektami liniowymi, które będą regulowały proces jedynie w niewielkim fragmencie jego charakterystyki. Narzędzi do takiego opisu algorytmów regulacji dostarcza teoria zbiorów rozmytych. Posługując się jej żargonem można powiedzieć, że obszar pracy obiektu dzielony jest na kilka zbiorów rozmytych (ze względu na wartość wyjść lub też wejść, o czym później). Dla każdego regulatora definiowana jest następnie, w ogólności nieliniowa, funkcja przynależności, która określa jak duży jest wkład danego regulatora do końcowej wartości sterowania w zależności od punktu pracy, w którym znajduje się proces.

Jak wiadomo, każdą krzywą można aproksymować z nieskończenie dużą dokładnością przez nieskończenie liczny zbiór odcinków. Skutkiem tego, niektóre funkcje liniowe (w tym również charakterystyki układów dynamicznych) można aproksymować na pewnych odcinkach funkcją liniową. To właśnie ten fakt stoi za ideą stosowania regulatorów rozmytych. Każdy z lokalnych regulatorów pracuje w obszarze, który z pewną dokładnością można aproksymować linią prostą. Im mniejszy ten obszar, tym dokładniejsza jest zazwyczaj aproksymacja.

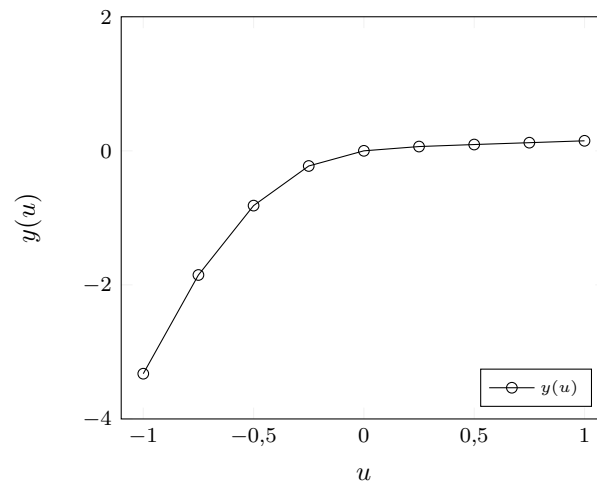
$$u_k = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ki} * f_i(y_k)}{\sum_{i=1}^n f_i(y_k)} \quad (6.1)$$

Lokalne regulatory funkcjonują w obszarze, który można uznać za (w przybliżeniu liniowy). Dzięki temu, że funkcje przynależności są często modelowane przez funkcje gładkie, zmiany wpływów poszczególnych regulatorów na przestrzeni obszaru pracy również zmieniają się w sposób gładki. Taki układ, przy odpowiednio dobranej liczbie i rozmieszczeniu regulatorów lokalnych pozwala regulować znaczną klasę procesów nieliniowych. Matematyczne ujęcie idei "wkładów" poszczególnych regulatorów zapisano w równaniu 6.1, gdzie u_{ki} oznacza wyjście i-tego regulatora w chwili k , a $f_i(y_k)$ wartość funkcji przynależności w chwili k regulator i-tego.

$$f(x) = \exp\left(\frac{-(x - average)^2}{2 * std^2}\right) \quad (6.2)$$

W celu rozmycia zbiorów obecnych w naszej implementacji algorytmów (zarówno PID, jak i DMC) wykorzystaliśmy funkcję dzwonową Gaussa definiowaną przez równanie 6.2. *average* oznacza argument maksimum funkcji przynależności regulatora, a *std* decyduje o szerokości krzywej. Funkcja ta jest popularna między innymi ze względu na łatwość jej definiowania w kontekście położenia maksimum i szybkości spadku jej wartości wraz z odejściem od niego.

Jak wspomniano wcześniej, "rozmywanie" regulatorów lokalnych może następować ze względu na wartości wyjścia lub też wartości wejścia. Wybór ten zależy od tego, która wersja regulatora sprawdza się lepiej przy danym procesie. W naszym przypadku **wybrana została wartość wyjściowa**, gdyż przeprowadzone eksperymenty wskazywały na dość znaczącą przewagę tego podejścia. Taki stan rzeczy nie jest bynajmniej przypadkowy. Zależało nam na tym, aby regulatory lokalne mogły być rozmieszczone w miarę możliwości równomiernie, gdyż zwalniałoby to nas z konieczności ręcznego dobierania położenia funkcji przynależności. Patrząc od strony zmiennej wejściowej, charakterystyka statyczna jest niemalże liniowa w przedziale $0 \leq 1$ i silnie nieliniowa w przedziale $-1 \leq 0$. Umieszczenie większej liczby regulatorów po prawej stronie od 0 wydaje się zatem marnotrawstwem mocy obliczeniowej. Większa liczba przydałaby się za to po stronie ujemnych sterowań. Stoi to w sprzeczności z potrzebą równomiernego rozmieszczania regulatorów.



Gdy spojrzymy na charakterystykę od strony wyjścia kwestia wygląda nieco inaczej. Wydaje się, że funkcja zachowuje podobny stopień nieliniowości we wszystkich obszarach. Z tego też powodu wybór wartości wyjściowej jako zmiennej rozmywającej wydał nam się bardziej korzystny, co w późniejszym czasie potwierdziły eksperymenty.

7. Kalibracja regulatorów rozmytych

Kalibracja regulatorów rozmytych jest potencjalnie o wiele bardziej złożonym procesem niż kalibracja pojedynczego regulatora. Wynika to bezpośrednio z liczby parametrów, jakie należy wziąć pod uwagę. W przypadku więcej niż dwóch-trzech regulatorów rozmytych odrębna, ręczna kalibracja każdego z nich wydaje się skazana na porażkę. Z tego powodu wprowadziliśmy do procedury kalibracji kilka udogodnień, które miały zwiększyć wydajność i dokładność kalibracji. Procedury te były identyczne w przypadku obydwu regulatorów, dlatego zostaną opisane zbiorczo.

1. W pierwszym kroku ustalaliśmy liczbę regulatorów lokalnych. Rozpoczynaliśmy od jednego regulatora lokalnego i w kolejnych krokach zwiększaliśmy tę liczbę o jeden do momentu, w którym przestawało to przynosić zauważalne korzyści. Regulatory rozmieszczaliśmy równomiernie w całym obszarze pracy.

2. Kolejną czynnością było automatyczne zoptymalizowanie parametrów regulatorów oraz funkcji przynależności. Zakładaliśmy, że parametry wszystkich regulatorów (oczywiście oprócz punktów środkowych funkcji przynależności) były na tym etapie jednakowe. Do optymalizacji wykorzystaliśmy funkcję *ga* (*Genetic Algorithm*) środowiska Matlab.

3. Po uzyskaniu wstępnie zoptymalizowanych parametrów definiowaliśmy specjalne przebiegi kalibracyjne. Liczba przebiegów równa była liczbie regulatorów lokalnych. Każdy z nich zawierał (w miarę możliwości) pobudzenia z zakresu pracy pojedynczego regulatora. Na podstawie błędów popełnianych przez regulator rozmyty optymalizowaliśmy parametry pojedynczych regulatorów (z wyłączeniem parametrów ich funkcji przynależności). Optymalizacja ta mogła odbyć się oczywiście na drodze automatycznej, jednak aby w większym stopniu zapoznać się ze strukturą algorytmów rozmytych przeprowadziliśmy ten etap ręcznie.

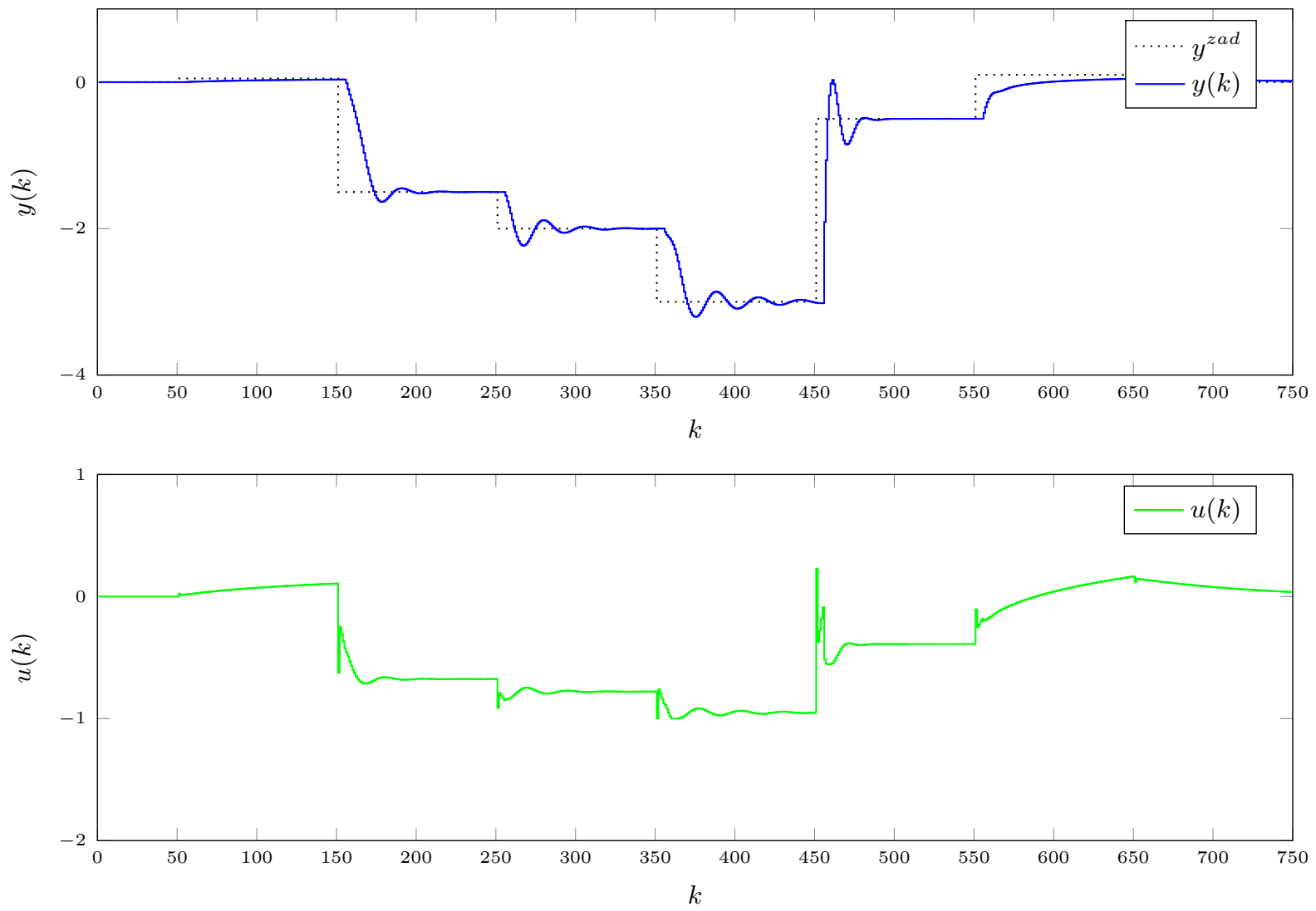
4. Ostatnim krokiem było indywidualne doprecyzowanie parametrów regulatorów lokalnych (razem z parametrami ich funkcji przynależności) na podstawie trajektorii zawierającej pełen zakres pracy obiektu.

Poniżej zostały zamieszone wyniki kalibracji dla regulatorów PID oraz DMC (przy stałym współczynniku λ). Biorąc pod uwagę, że powyższa procedura była bardzo czasochłonna, a jej wyniki obszerne, analiza tych wyników zostanie przeprowadzono zbiorczo z analizą wyników zadania 7 w rozdziale nr 7.

7.1. Kalibracja rozmytych regulatorów PID

K	T_i	T_d	T_s
0,174	2,3	0,8	0,5

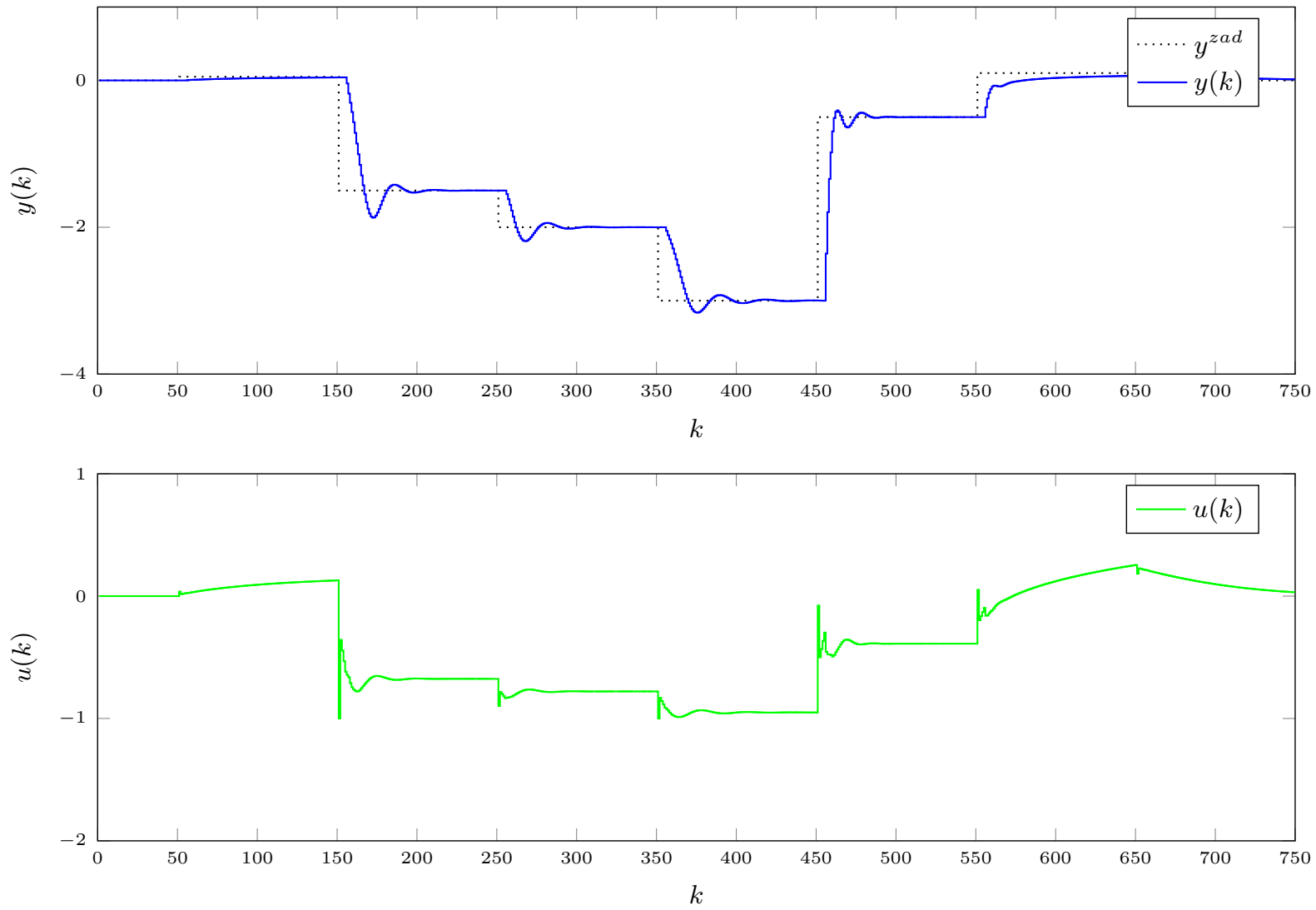
Tab. 7.1. Parametry regulator PID



Rys. 7.1. Wykres dla parametrów powyżej

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,14	2,6	0,7	0,5	-2,3	0,4
0,235	2,09	1,0	0,5	-0,5	0,4

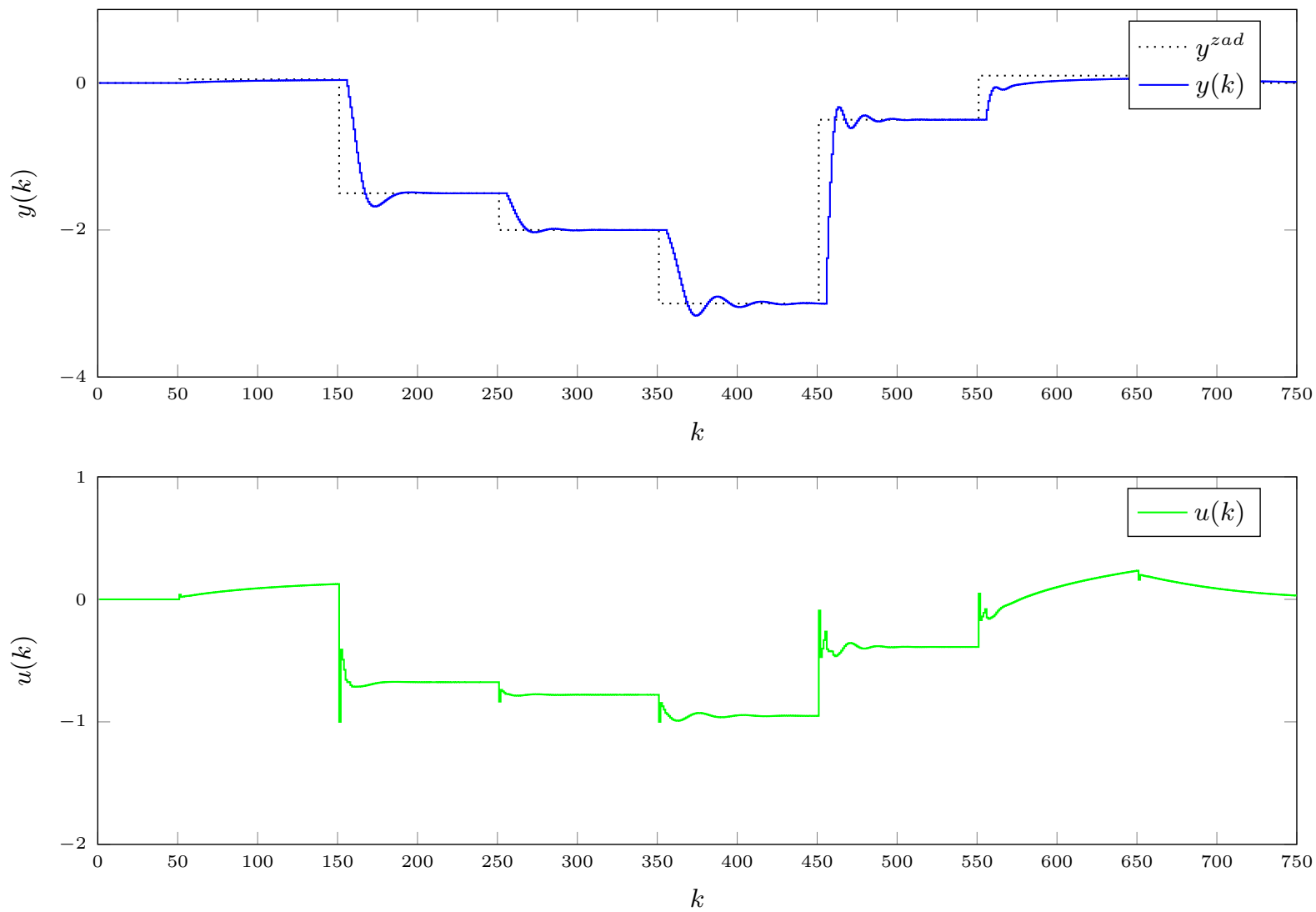
Tab. 7.2. Parametry 2 rozmyte regulatory PID



Rys. 7.2. Wykres dla parametrów powyżej

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,15	2,7	0,6	0,5	-2,4	0,3
0,09	2,0	1,2	0,5	-1,2	0,3
0,31	2,9	0,7	0,5	-0,2	0,3

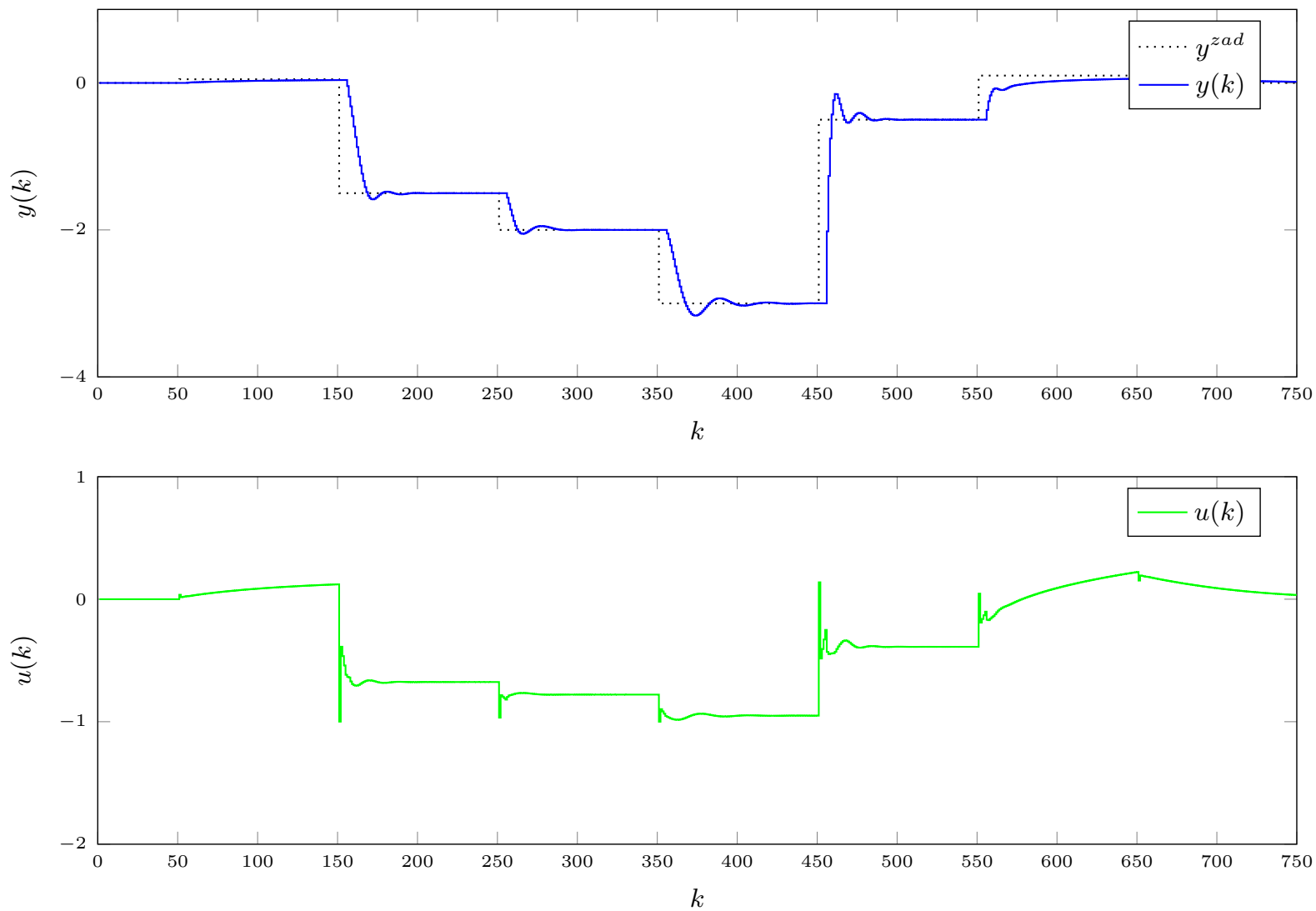
Tab. 7.3. Parametry 3 rozmyte regulatory PID



Rys. 7.3. Wykres dla parametrów powyżej

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,14	2,25	1,0	0,5	-2,7	0,2
0,1	2,7	0,6	0,5	-2,1	0,2
0,18	3,7	1,1	0,5	-1,3	0,2
0,255	2,57	0,87	0,5	-0,5	0,2

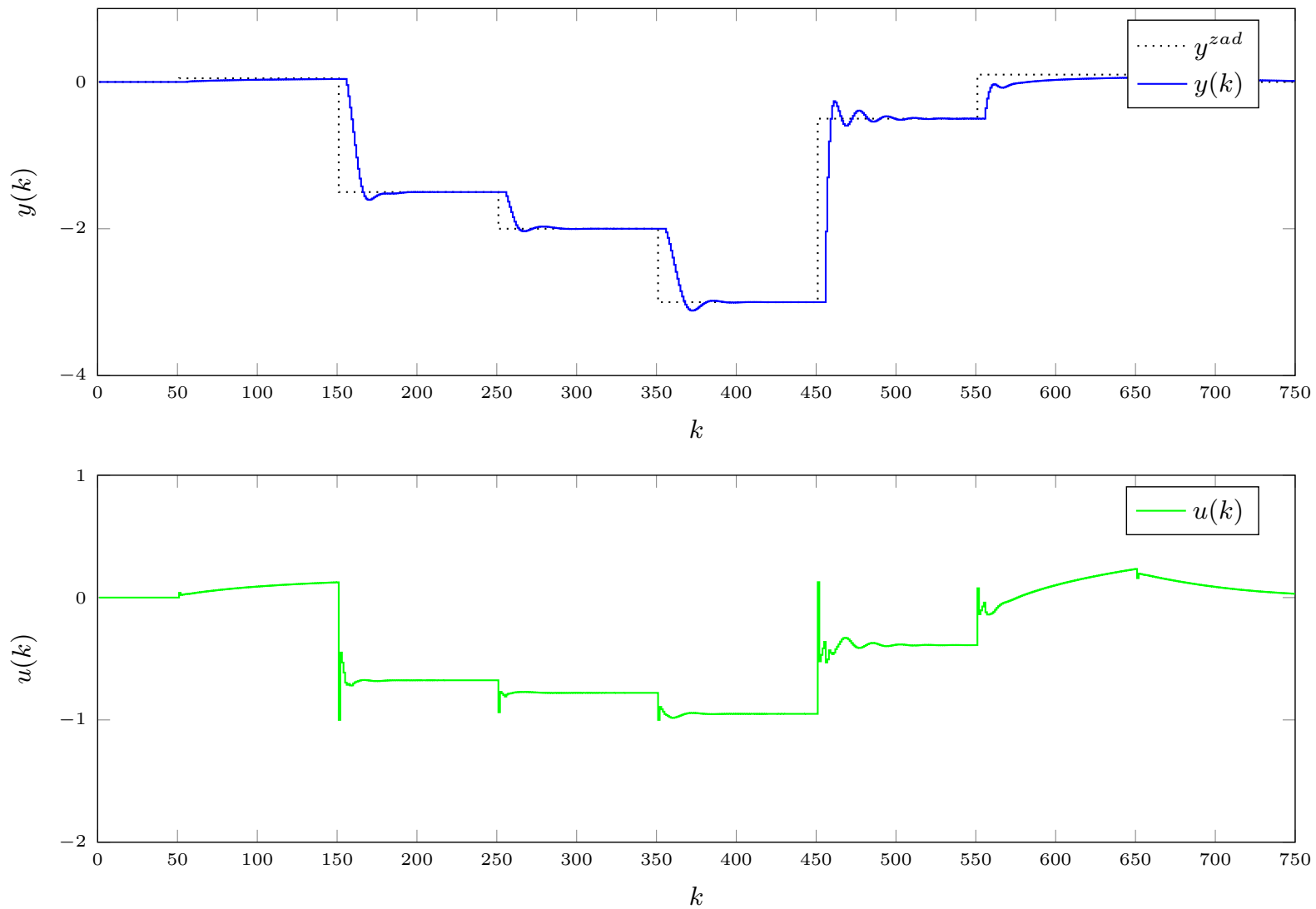
Tab. 7.4. Parametry 4 rozmyte regulatory PID



Rys. 7.4. Wykres dla parametrów powyżej

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,14	3,3	1,0	0,5	-2,7	0,1
0,09	2,3	0,7	0,5	-2,1	0,1
0,15	2,9	1,2	0,5	-1,6	0,1
0,15	2,8	1,9	0,5	-1	0,1
0,34	3,2	0,6	0,5	-0,5	0,1

Tab. 7.5. Parametry 5 rozmytych regulatorów PID

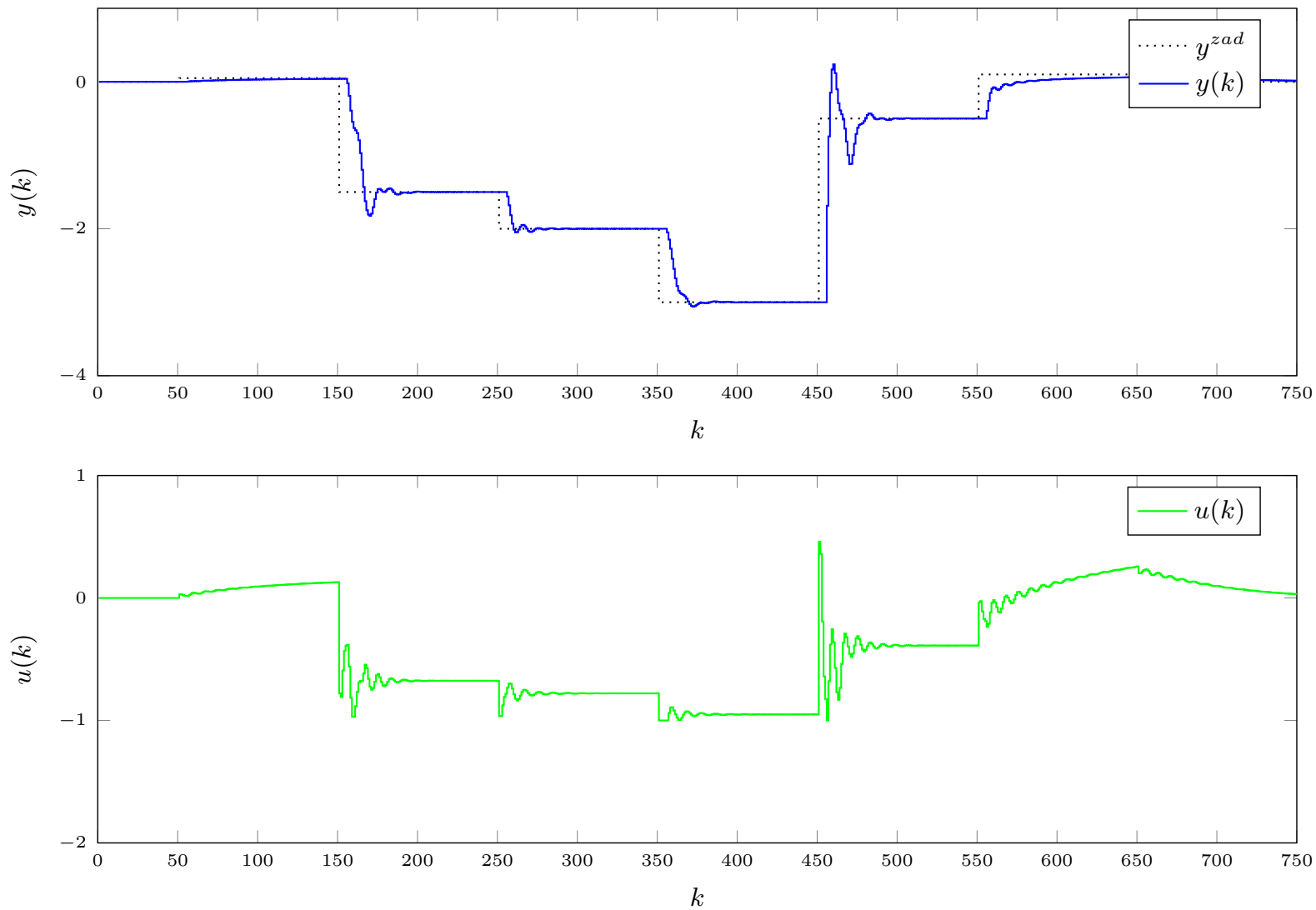


Rys. 7.5. Wykres dla parametrów powyżej

7.2. Kalibracja rozmytych regulatorów PID

D	N	N_u	λ	c	σ
25	15	10	1	-2,5	0,6
25	15	10	1	-0,7	0,6

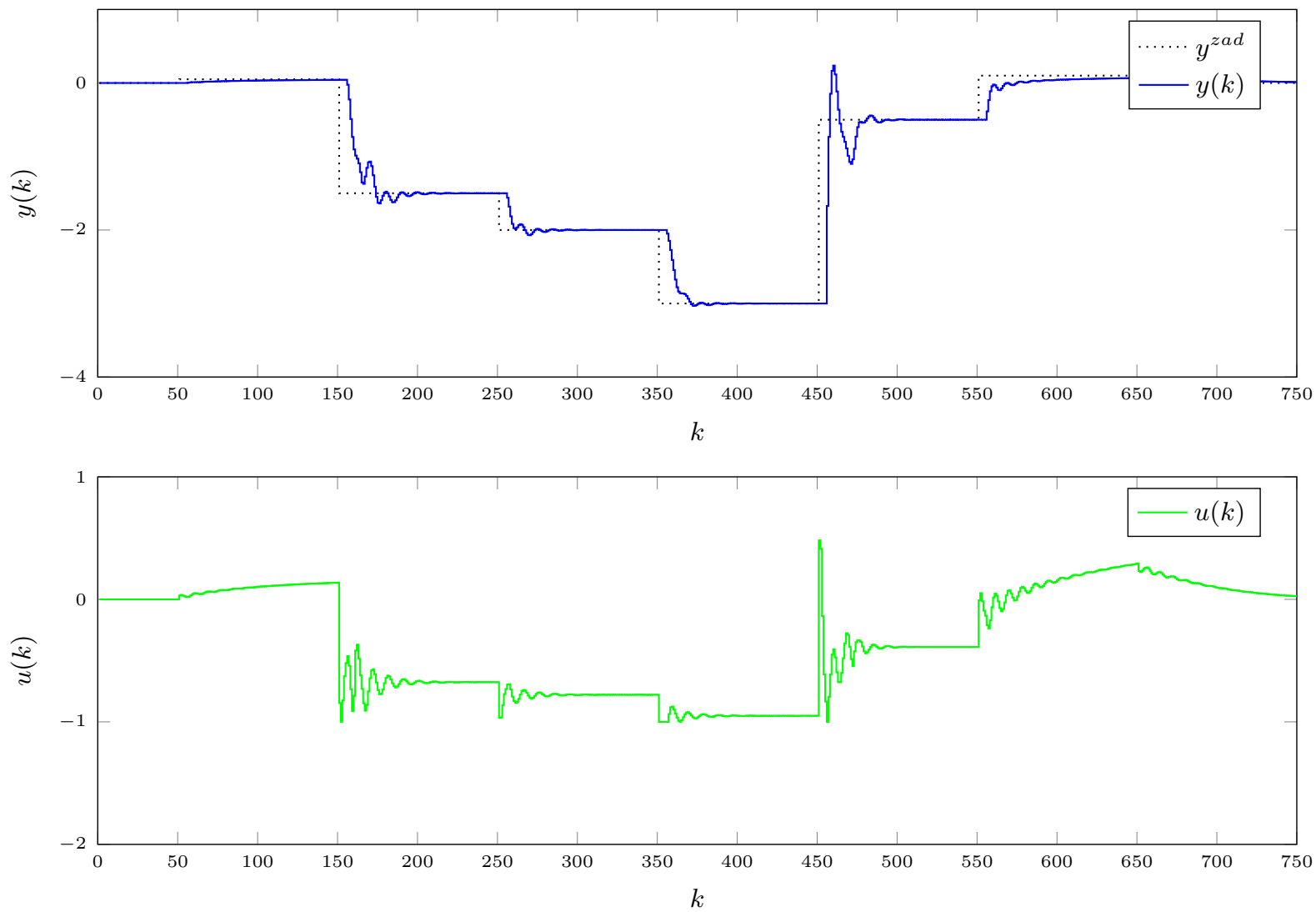
Tab. 7.6. Parametry 2 rozmyte regulatory DMC



Rys. 7.6. Wykres dla parametrów powyżej

D	N	N_u	λ	c	σ
58	16	14	1	-2,6	0,21
49	16	14	1	-1,5	0,21
39	16	14	1	-0,4	0,21

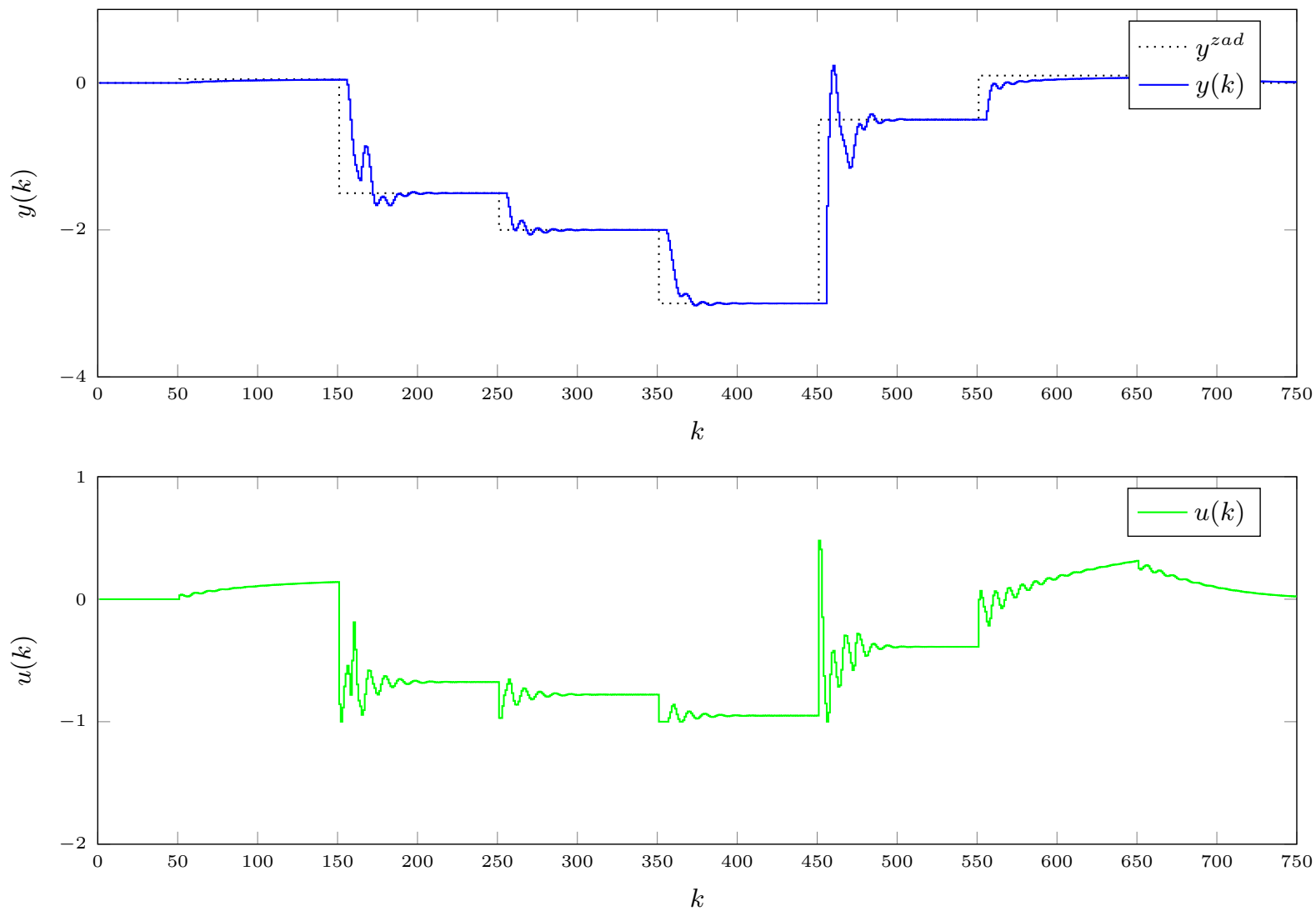
Tab. 7.7. Parametry 3 rozmyte regulatory DMC



Rys. 7.7. Wykres dla parametrów powyżej

D	N	N_u	λ	c	σ
60	15	10	1	-2,8	0,2
54	15	10	1	-1,98	0,2
45	15	10	1	-1,2	0,2
38	15	10	0,01	-0,35	0,2

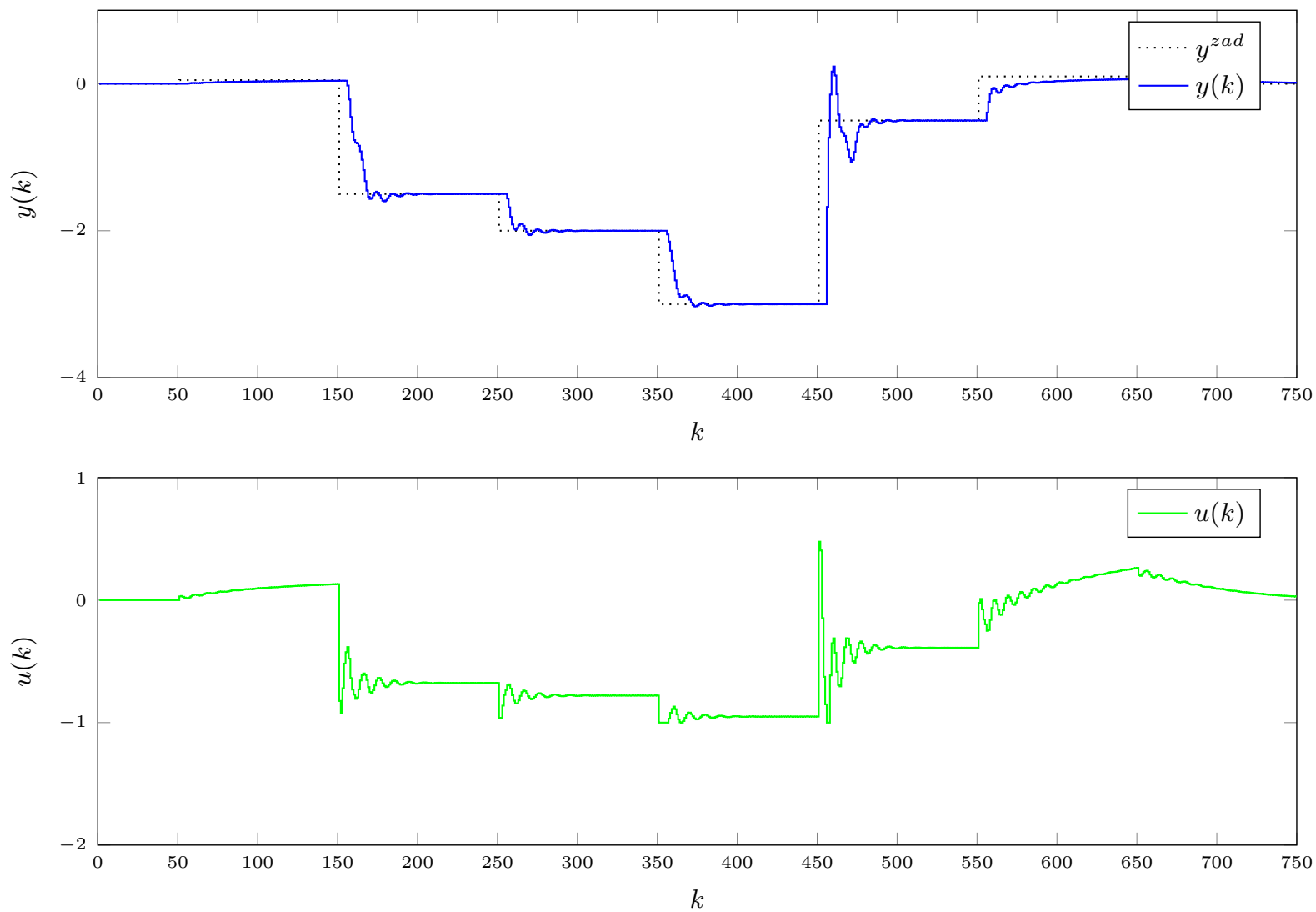
Tab. 7.8. Parametry 4 rozmyte regulatory DMC



Rys. 7.8. Wykres dla parametrów powyżej

D	N	N_u	λ	c	σ
60	14	14	1	-2,8	0,2
55	14	14	1	-2,1	0,2
49	14	14	1	-1,6	0,3
41	14	14	1	-1	0,3
40	14	14	1	-0,5	0,3

Tab. 7.9. Parametry 5 rozmytych regulatorów DMC



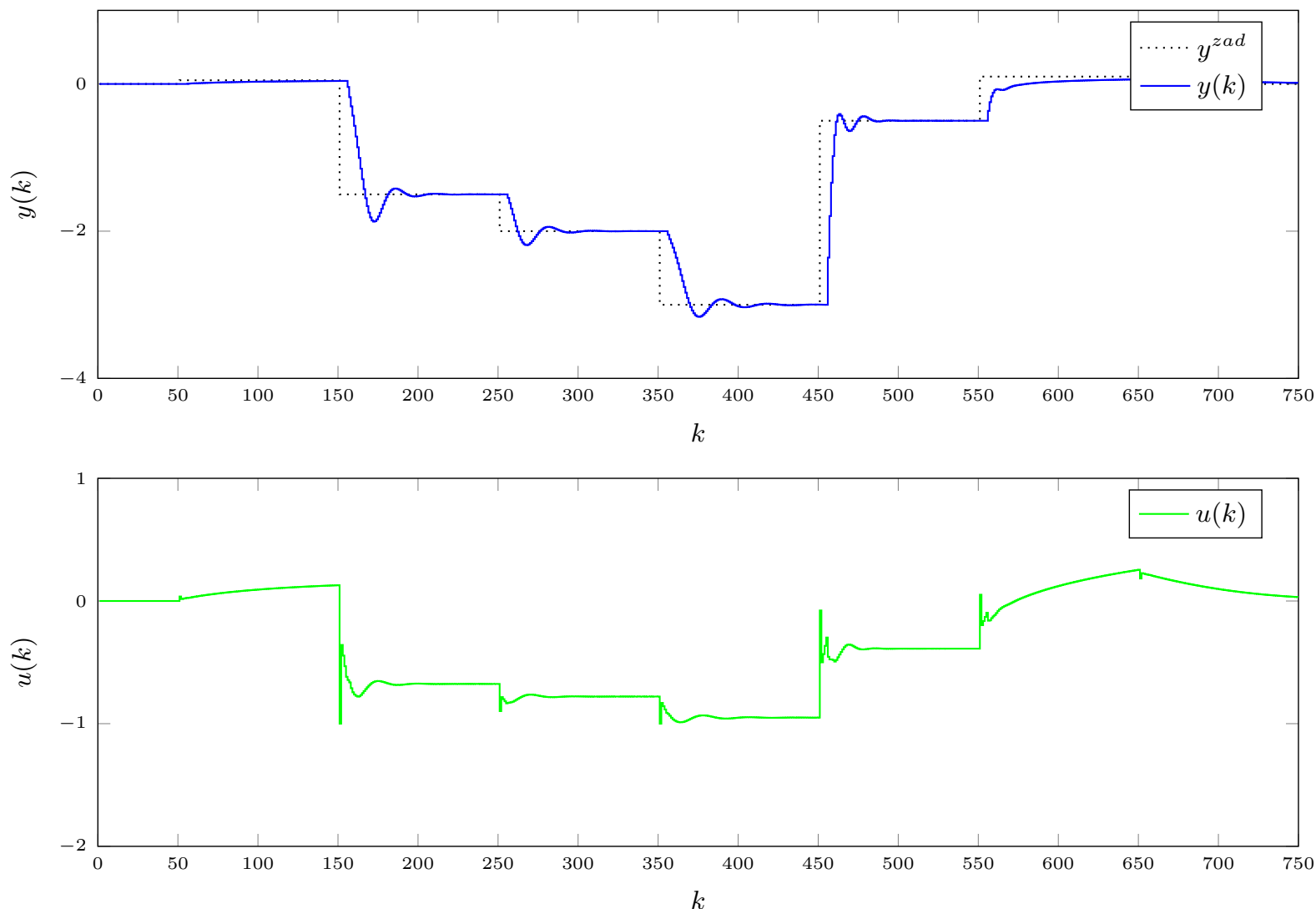
Rys. 7.9. Wykres dla parametrów powyżej

8. Analiza wyników kalibracji rozmytego regulatora PID

Tak jak zaznaczono podczas analizowania zadania numer 4, przebiegi dla pojedynczego regulatora są dalekie od doskonałości, jednak w określonych przypadkach mogłyby być uznane za wystarczające. Proces prawie zawsze udaje się ustabilizować, chociaż może zająć to dłuższą chwilę. Sygnał sterujący ma postać stosunkowo płaską.

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,14	2,6	0,7	0,5	-2,3	0,4
0,235	2,09	1,0	0,5	-0,5	0,4

Tab. 8.1. Parametry 2 rozmyte regulatory PID

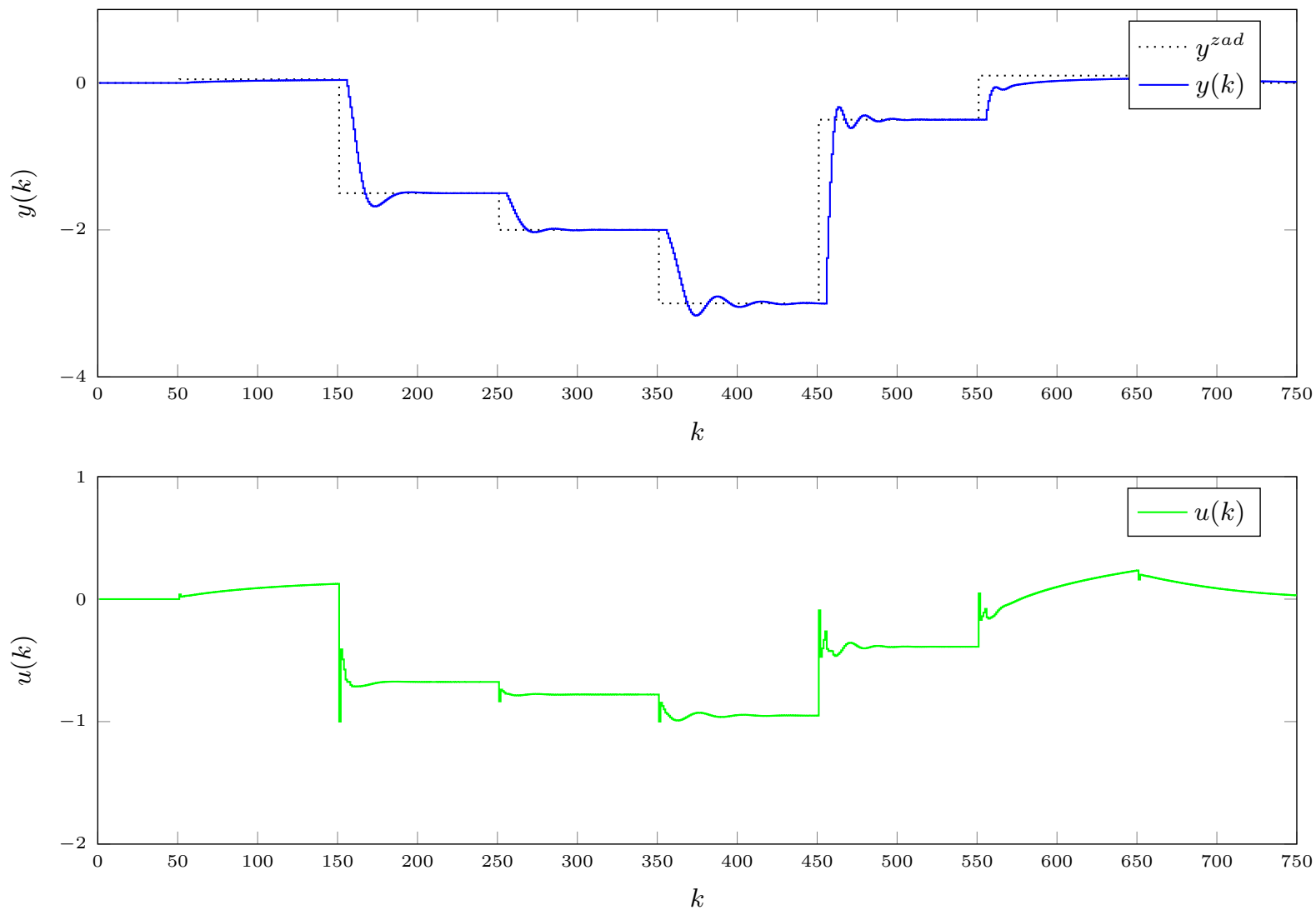


Rys. 8.1. Wykres dla parametrów powyżej

Zwiększenie liczby regulatorów do dwóch skutkuje znacznym skokiem jakości regulacji. Preregulowanie w kierunku dodatnim znacznie maleje, a czas oscylacji po zmianie wartości zadanej znacznie się zmniejsza. Wszystkie wartości zadane są bez problemu osiągane. Przebieg sygnału sterującego nie zmienia się znacząco, chociaż i tutaj można zauważyć, że tętnienia zostały stłumione przy skokach w kierunku dodatnim oraz lekko wzmocnione w kierunku ujemnym. Jeszcze raz ukazuje to nieliniową strukturę obiektu regulacji.

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,15	2,7	0,6	0,5	-2,4	0,3
0,09	2,0	1,2	0,5	-1,2	0,3
0,31	2,9	0,7	0,5	-0,2	0,3

Tab. 8.2. Parametry 3 rozmyte regulatory PID

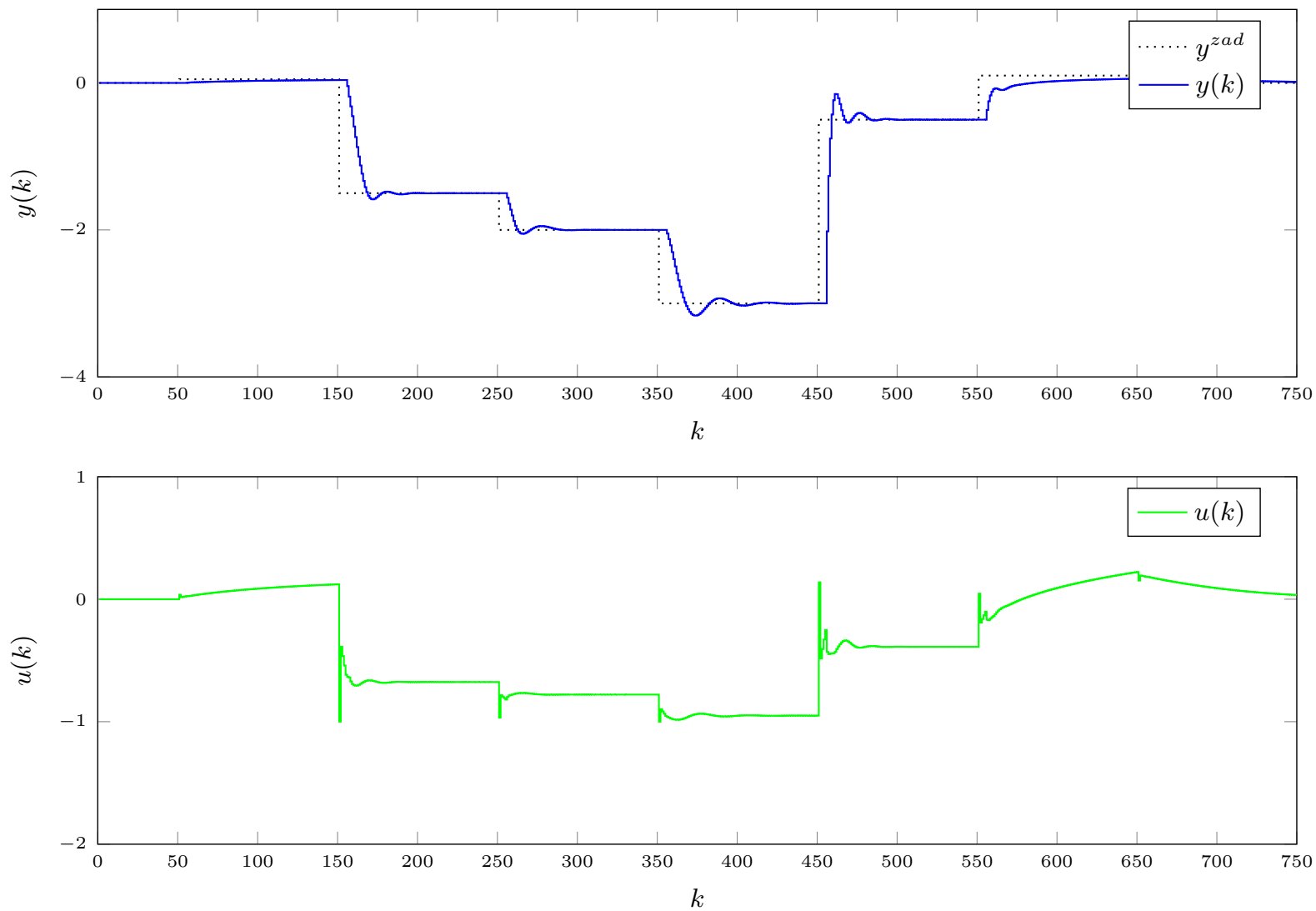


Rys. 8.2. Wykres dla parametrów powyżej

Trzeci regulator lokalny pozwala zapanować nad ujemnym przergulowaniem. Tętnienia przebiegu w dolnych obszarach charakterystyki są wyraźnie stłumione przy jednoczesnym zachowaniu poprawnej regulacji w obszarach dodatnich sterowań.

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,14	2,25	1,0	0,5	-2,7	0,2
0,1	2,7	0,6	0,5	-2,1	0,2
0,18	3,7	1,1	0,5	-1,3	0,2
0,255	2,57	0,87	0,5	-0,5	0,2

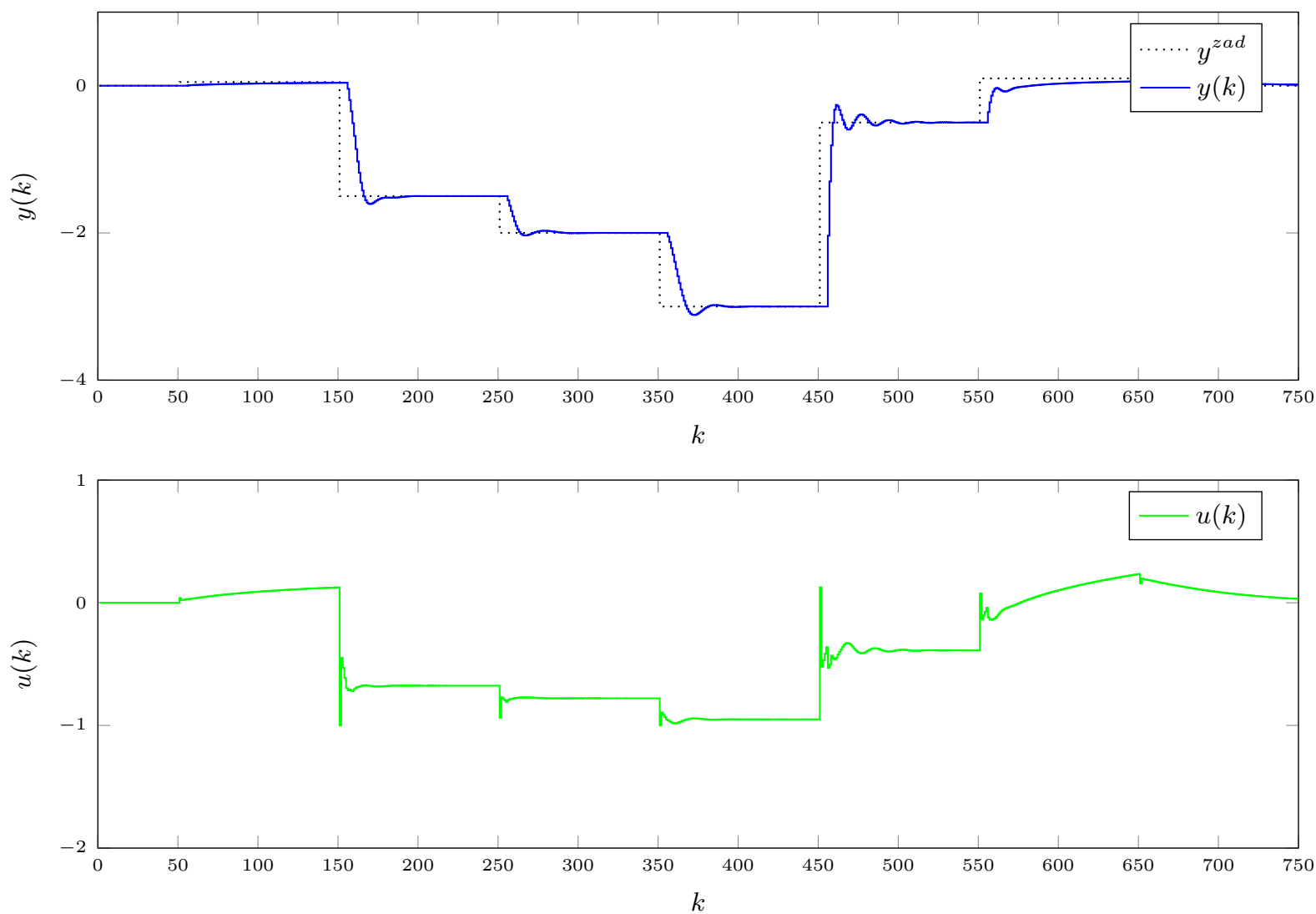
Tab. 8.3. Parametry 4 rozmyte regulatory PID



Rys. 8.3. Wykres dla parametrów powyżej

K	T_i	T_d	T_s	c	σ
0,14	3,3	1,0	0,5	-2,7	0,1
0,09	2,3	0,7	0,5	-2,1	0,1
0,15	2,9	1,2	0,5	-1,6	0,1
0,15	2,8	1,9	0,5	-1	0,1
0,34	3,2	0,6	0,5	-0,5	0,1

Tab. 8.4. Parametry 5 rozmytych regulatorów PID



Rys. 8.4. Wykres dla parametrów powyżej

Przy czterech i pięciu regulatorach lokalnych w niewielkim stopniu regulacja poprawia się w nieliniowym obszarze charakterystyki, za to ulega (również nieznacznie) pogorszeniu rejonach liniowych. Jest to szczególnie widoczne dla $n = 5$. Wynika to najprawdopodobniej z faktu, że przy równomiernym rozmieszczeniu pięciu regulatorów, żaden z nich nie znajduje się w okolicach środka obszaru liniowego.

liczba regu- latorów	błąd DMC
1	84,7209
2	70,8563
3	67,6583
4	66,1229
5	68,6593

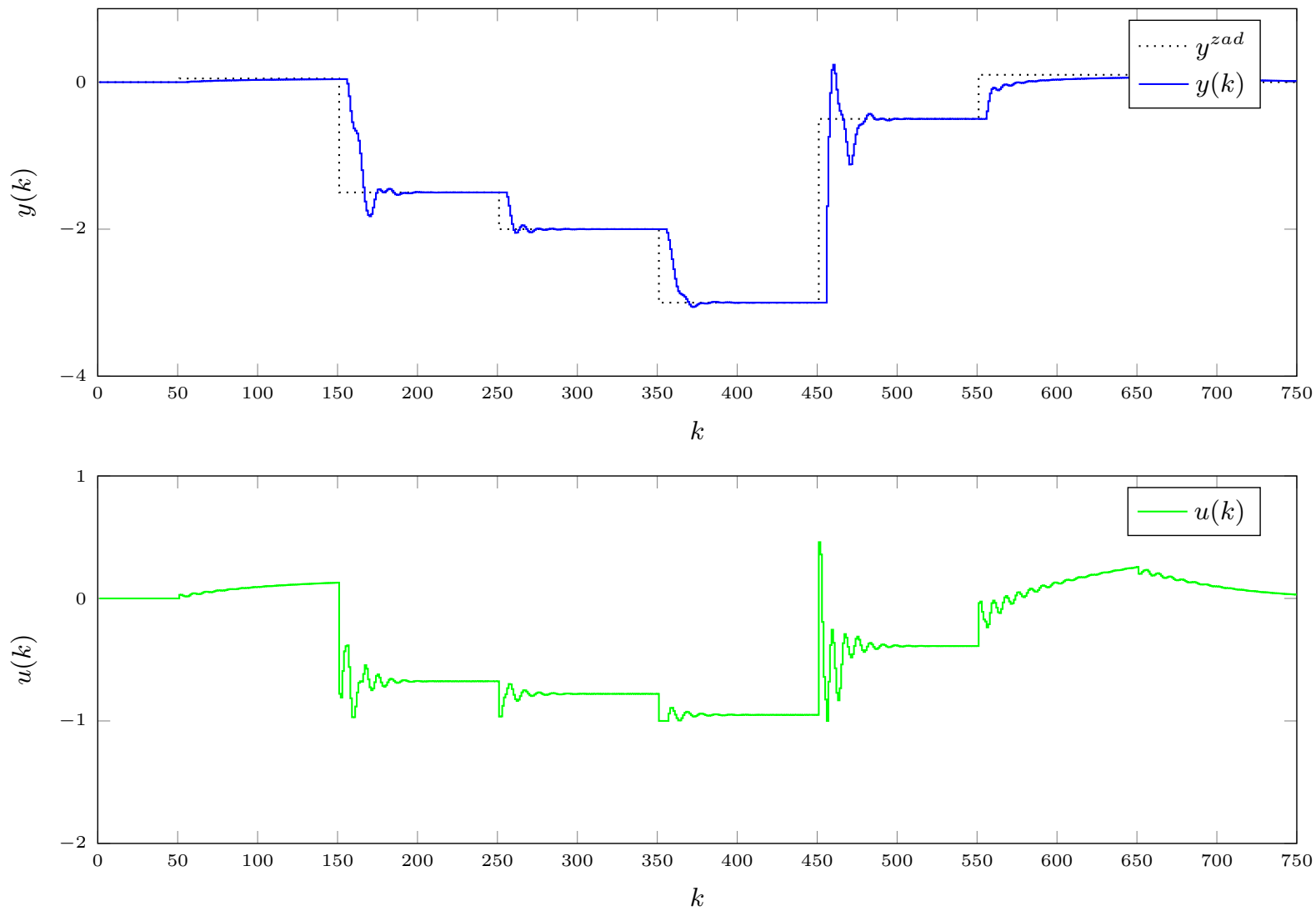
Tab. 8.5. Tabela błędów regulatorów DMC

9. Analiza wyników kalibracji rozmytego regulatora DMC

Regulator DMC wyróżnia się w stosunku do regulatora PID znacznie krótszym czasem stabilizacji wyjścia. Już przy pojedynczym regulatorze stabilizacja następuje stosunkowo szybko z jednym widocznym pikiem przy każdej zmianie wartości zadanej. Jest to jednak okupione wprowadzeniem widocznych oscylacji do sygnału sterującego, szczególnie w przypadku skoków wartości zadanej o większej amplitudzie.

D	N	N_u	λ	c	σ
25	15	10	1	-2,5	0,6
25	15	10	1	-0,7	0,6

Tab. 9.1. Parametry 2 rozmyte regulatory DMC

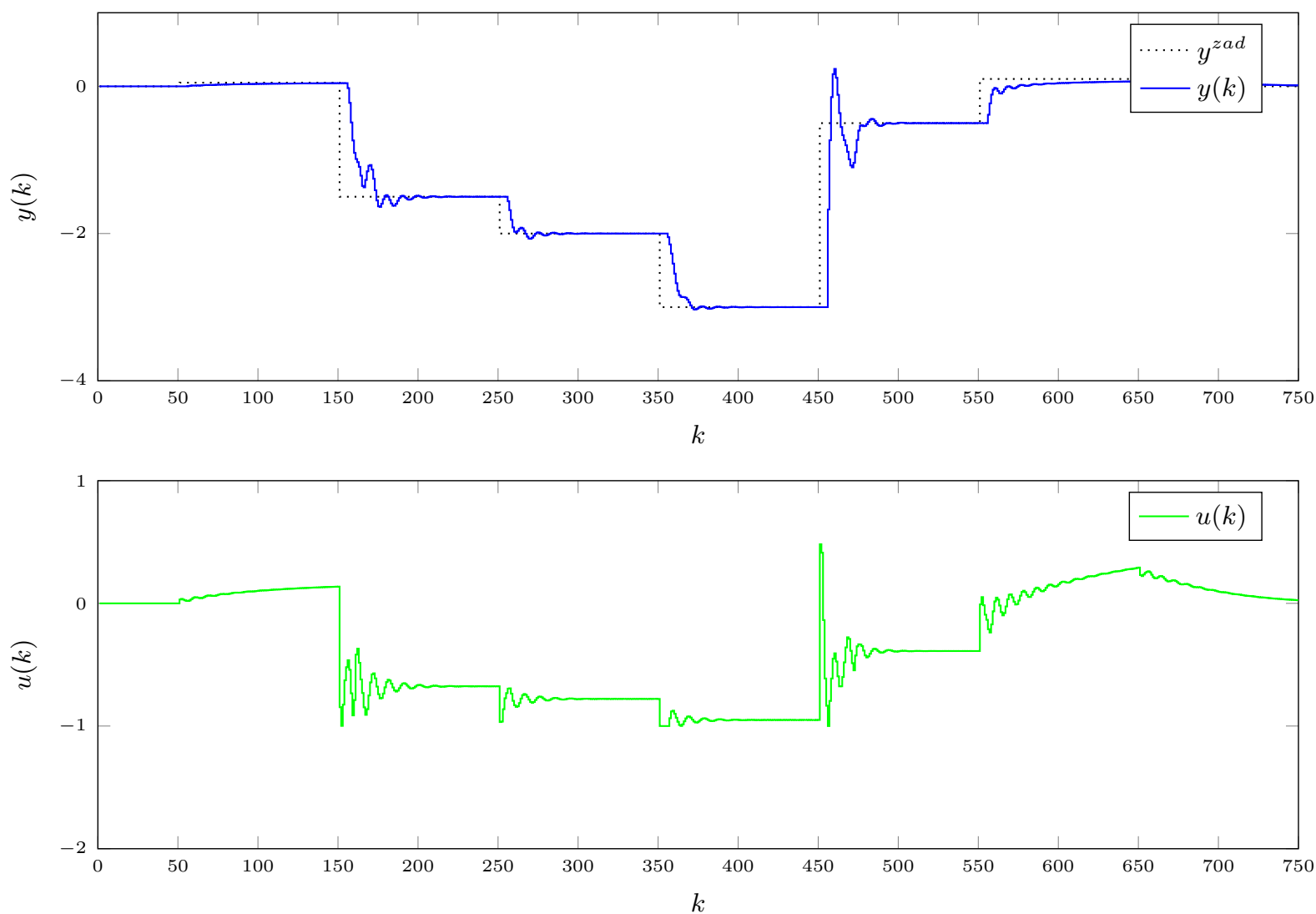


Rys. 9.1. Wykres dla parametrów powyżej

Wprowadzenie drugiego regulatora lokalnego nie przynosi praktycznie żadnej poprawy. Przebieg wartości regulowanej zmienia się w prawdzie nieznacznie, jednak bez dokładnych wyliczeń ciężko byłoby określić, czy sumaryczny błąd wzrósł, czy zmalał. Również na przebiegu wartości sterowania nie widać wyraźnych zmian.

D	N	N_u	λ	c	σ
58	16	14	1	-2,6	0,21
49	16	14	1	-1,5	0,21
39	16	14	1	-0,4	0,21

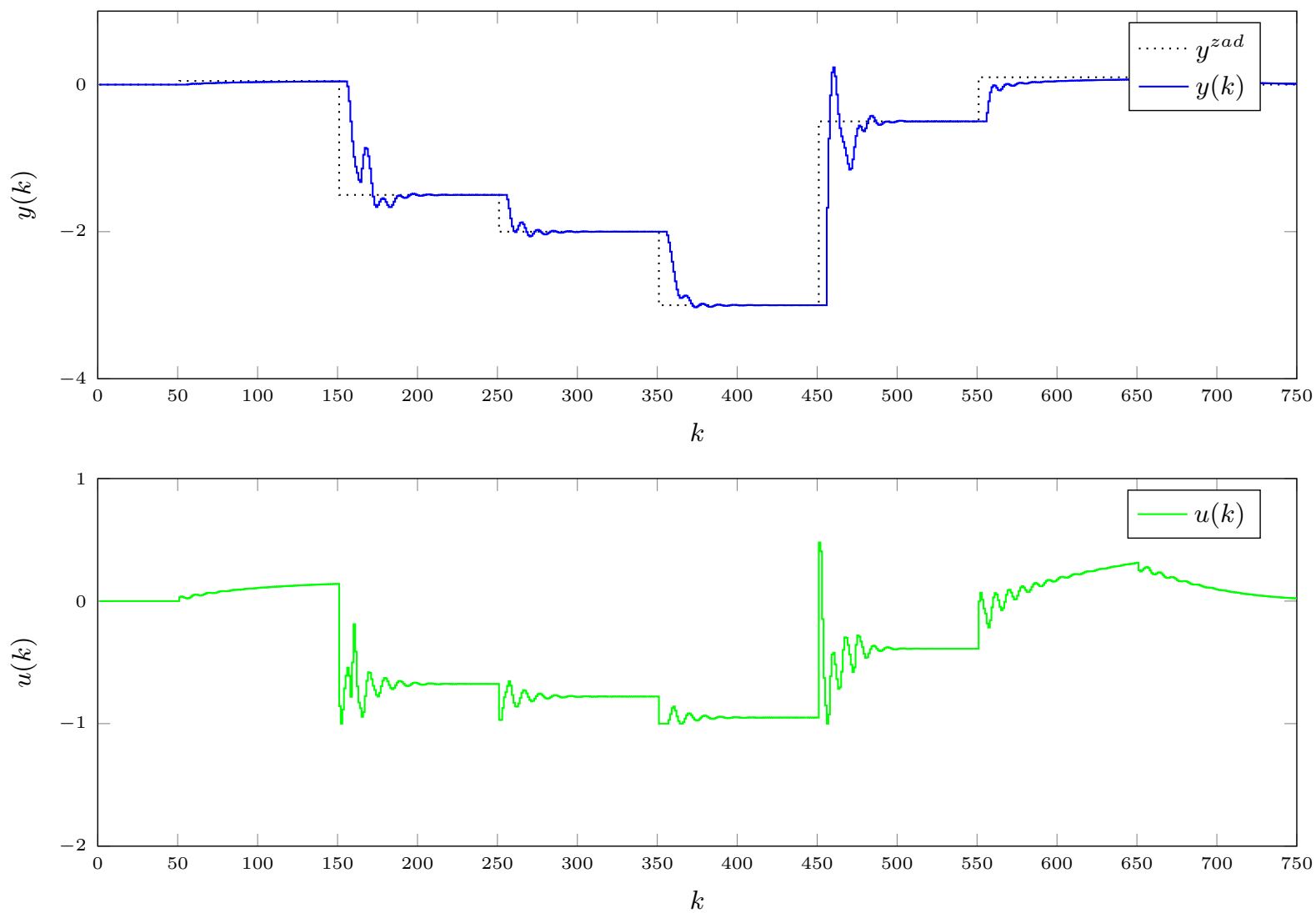
Tab. 9.2. Parametry 3 rozmyte regulatory DMC



Rys. 9.2. Wykres dla parametrów powyżej

D	N	N_u	λ	c	σ
60	15	10	1	-2,8	0,2
54	15	10	1	-1,98	0,2
45	15	10	1	-1,2	0,2
38	15	10	0,01	-0,35	0,2

Tab. 9.3. Parametry 4 rozmyte regulatory DMC

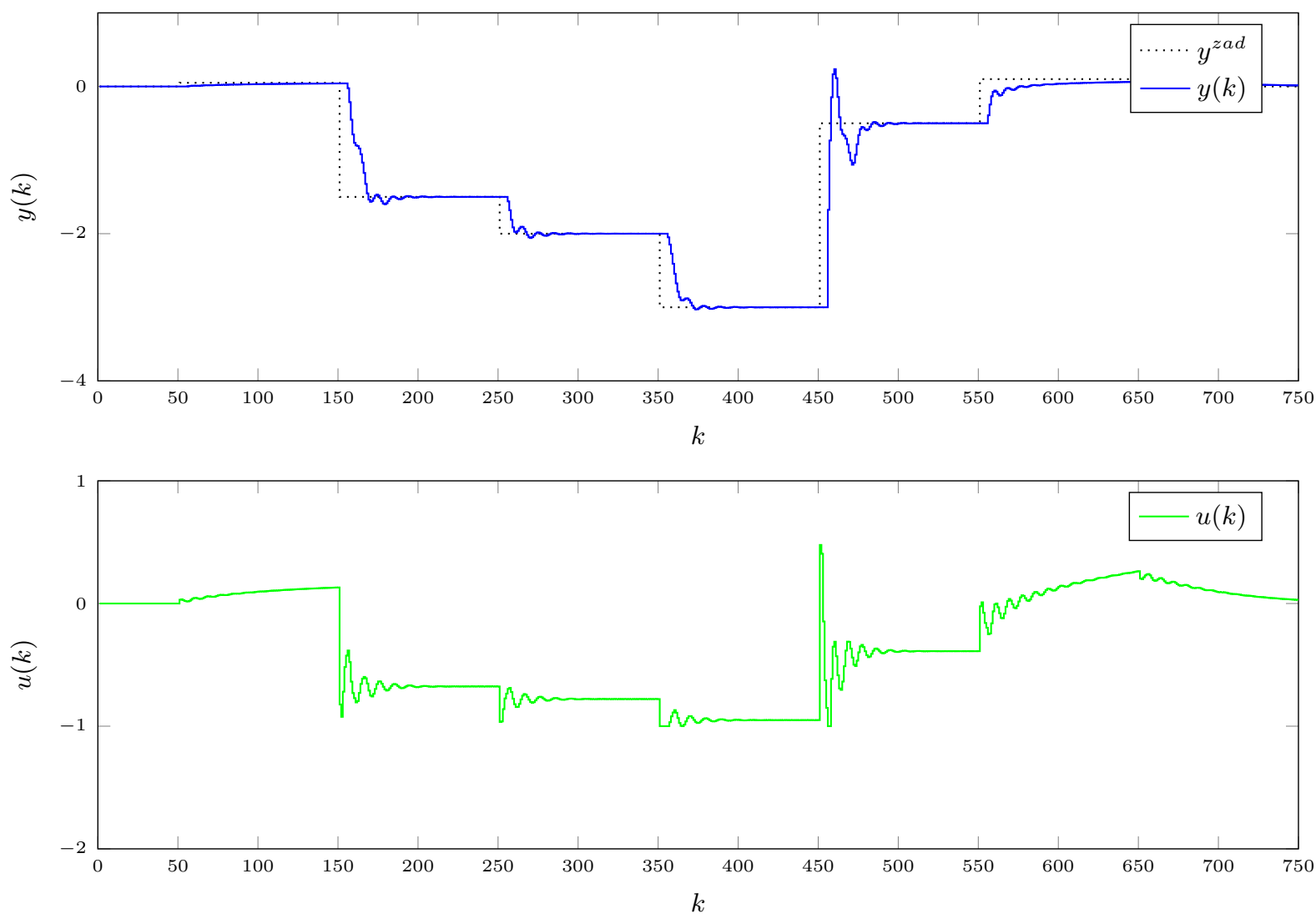


Rys. 9.3. Wykres dla parametrów powyżej

Również dla przebiegów zarejestrowanych przy 3 i 4 regulatorach nie widać wyraźnej poprawy ani od strony wartości wyjściowej procesu, ani od strony sygnału sterującego.

D	N	N_u	λ	c	σ
60	14	14	1	-2,8	0,2
55	14	14	1	-2,1	0,2
49	14	14	1	-1,6	0,3
41	14	14	1	-1	0,3
40	14	14	1	-0,5	0,3

Tab. 9.4. Parametry 5 rozmytych regulatorów DMC



Rys. 9.4. Wykres dla parametrów powyżej

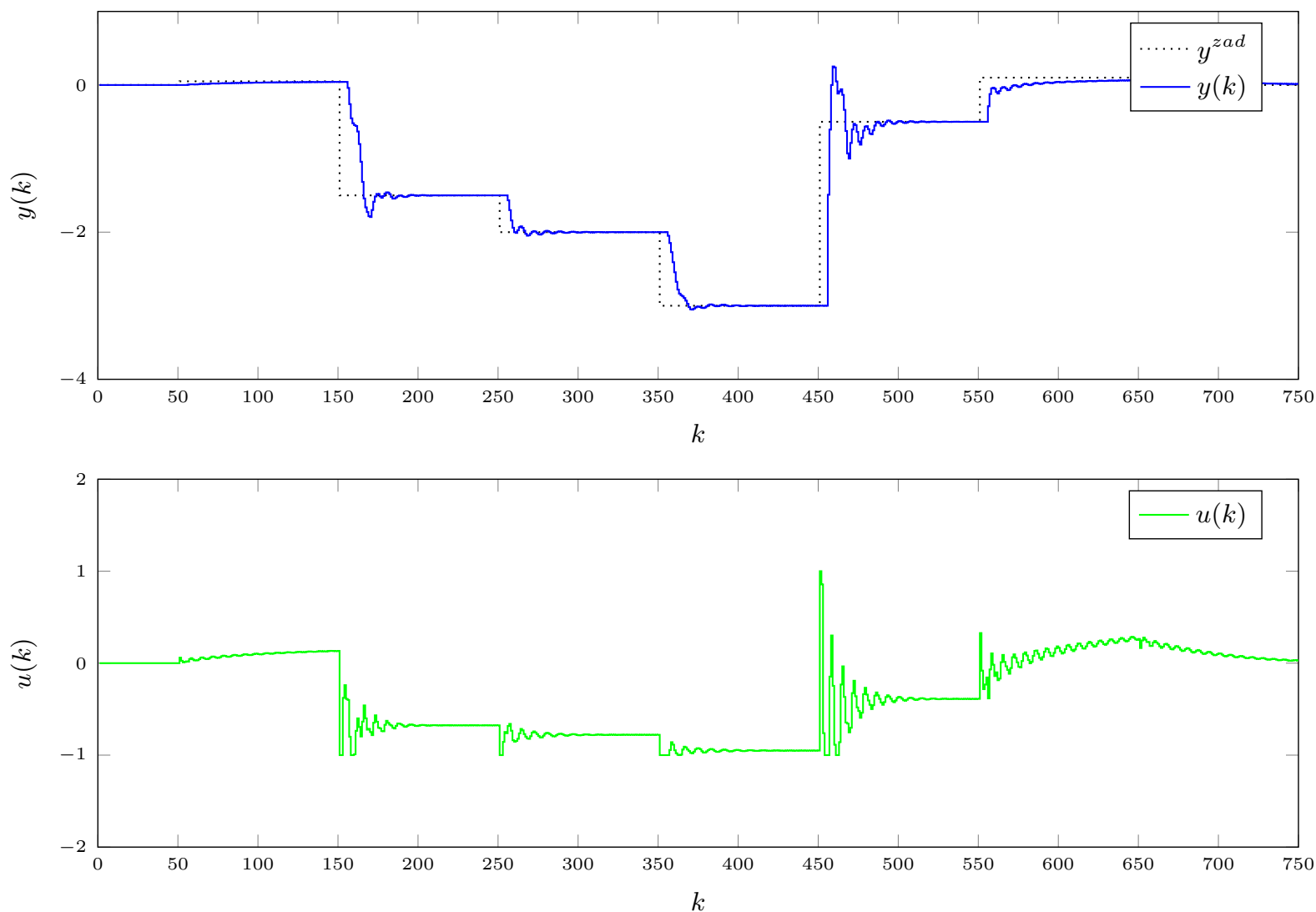
Dopiero zwiększenie liczby regulatorów do 5 pozwoliło uzyskać przebieg wyraźnie lepszy niż w przypadku $n = 2$. Przeregulowania są większości przypadków minimalne, a czas regulacji bardzo krótki. W sygnale sterującym obserwujemy oscylacje o nieco większej częstotliwości niż w przypadku dwóch regulatorów.

Powyższe eksperymenty zostały przeprowadzone po skalibrowaniu regulatorów ze stałą wartością parametru λ wynoszącą $\lambda = 1$, który określa karę za zmienność przebiegu sygnału sterującego. Parametr ten może się okazać kluczowy w wielu sytuacjach praktycznych, gdyż pozwala on zapanować zarówno nad wartością jak i szybkością wahań sterowania co w prosty sposób przekładać się może na wytrzymałość i bezpieczeństwo elementów wykonawczych struktury sterowania.

9.1. Kalibracja parametru λ

D	N	N_u	λ	c	σ
25	15	10	0,1	-2,5	0,6
25	15	10	0,1	-0,7	0,6

Tab. 9.5. Parametry 2 rozmyte regulatory DMC

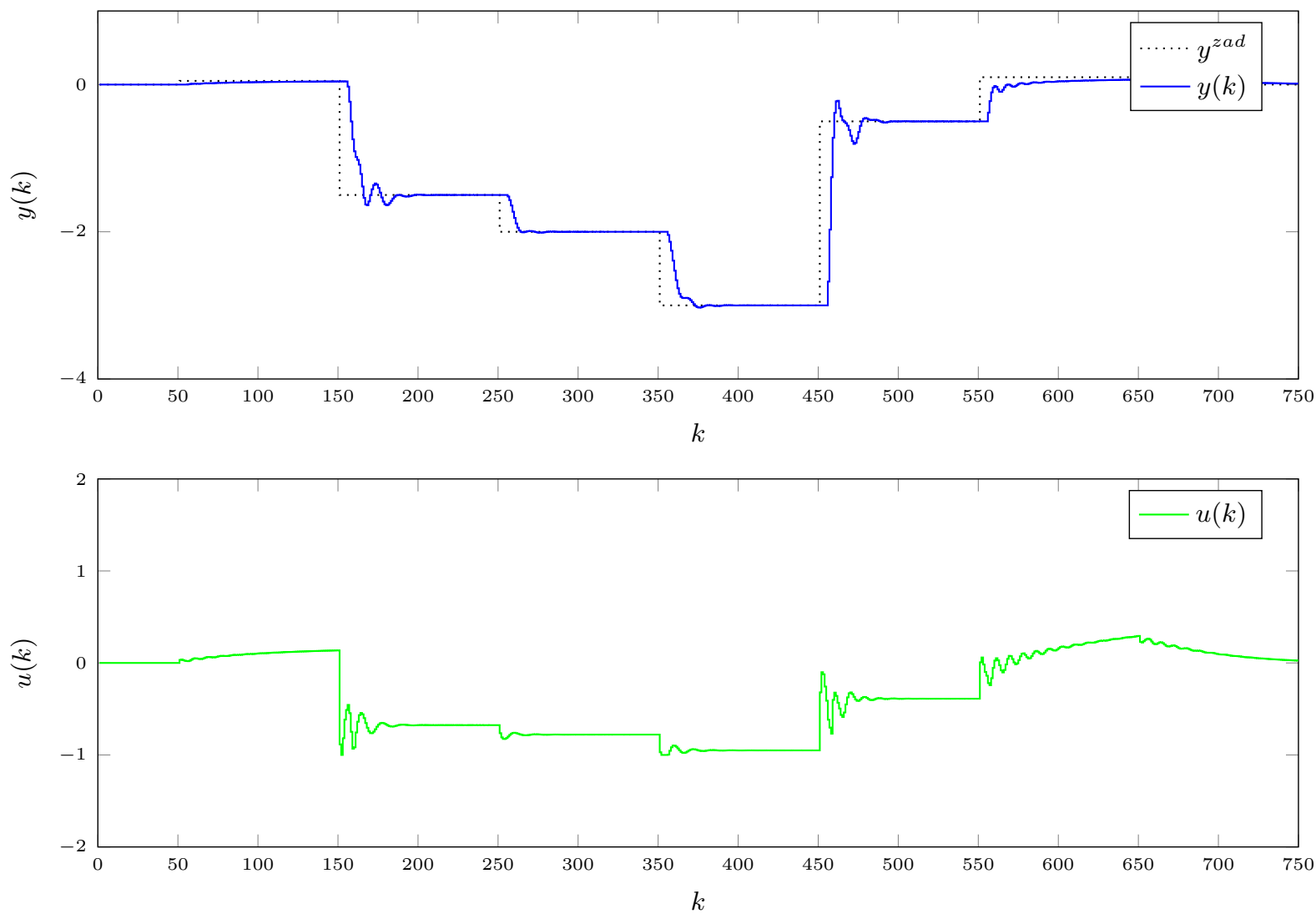


Rys. 9.5. Kalibracja parametru λ , 2 regulatory

Chociaż dobierając parametr λ należy mieć na uwadze wartości sygnału sterującego, to jednak głównym celem regulacji jest zapewnienie jak najmniejszego błędu regulacji. Dlatego też, w przypadku dwóch regulatorów zdecydowaliśmy się na dziesięciokrotne zmniejszenie tego parametru. Chociaż oscylacje sterowania zauważalnie wzrosły, to jednak jak pokazują dokładne wyliczenia, sumaryczny błąd regulatora zmalał. Czy jest to opłacalna wymiana? To już zależy od praktycznych uwarunkowań jak chociażby wspomniane możliwości elementów wykonawczych.

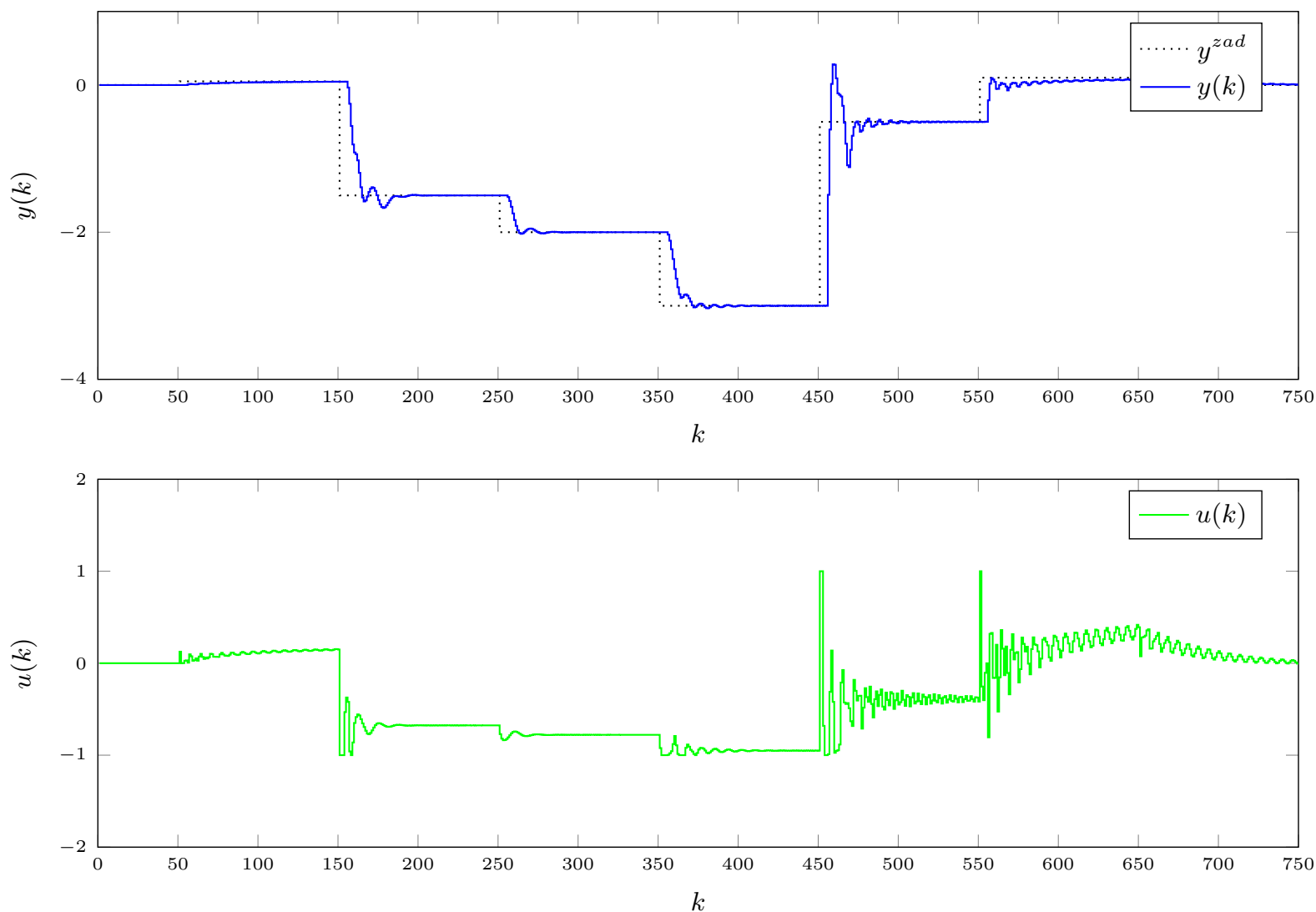
D	N	N_u	λ	c	σ
58	16	14	8	-2,6	0,21
49	16	14	20	-1,5	0,21
39	16	14	0,9	-0,4	0,21

Tab. 9.6. Parametry 3 rozmyte regulatory DMC

Rys. 9.6. Kalibracja parametru λ , 3 regulatory

D	N	N_u	λ	c	σ
60	15	10	0,1	-2,8	0,2
54	15	10	30	-1,98	0,2
45	15	10	15	-1,2	0,2
38	15	10	0,01	-0,35	0,2

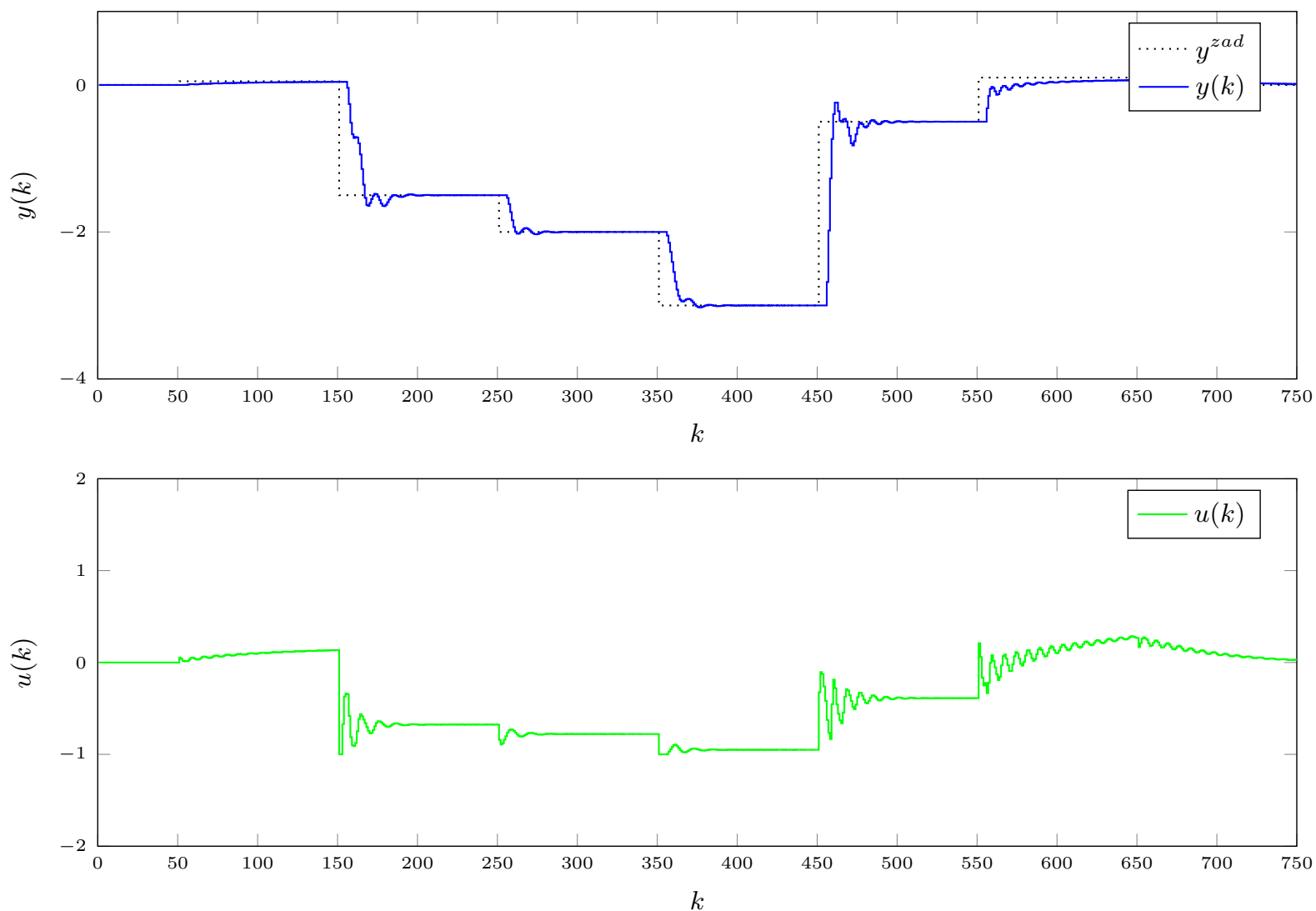
Tab. 9.7. Parametry 4 rozmyte regulatory DMC

Rys. 9.7. Kalibracja parametru λ , 4 regulatory

W układzie implementującym trzy regulatory lokalne udało nam się zredukować nie tylko sumaryczny błąd regulacji, ale też w znacznym stopniu opanować oscylacje sygnału sterującego. Przy niewielkich skokach wartości zadanej przeregulowanie praktycznie nie występuje, a w przypadku skoków o większej amplitudzie nie przekracza 15%. Przypadek z czterema regulatorami sprawił nam szczególną trudność w strojeniu. Jedyne co udało nam się osiągnąć, to niewielkie zmniejszenie sumarycznego błędu. Było to jednak okupione wprowadzeniem znacznych wahań sygnału sterującego.

D	N	N_u	λ	c	σ
60	14	14	8	-2,8	0,2
55	14	14	10	-2,1	0,2
49	14	14	10	-1,6	0,3
41	14	14	0,6	-1	0,3
40	14	14	0,2	-0,5	0,3

Tab. 9.8. Parametry 5 rozmytych regulatorów DMC

Rys. 9.8. Kalibracja parametru λ , 5 regulatorów

Przypadek pięciu regulatorów również był problematyczny. Pod względem jakości regulacji nie udało nam się przy jego pomocy przebić osiągniętych algorytmu z czterema regulatorami lokalnymi. W znacznym stopniu ograniczyliśmy jednak tętnienia sterowania.

10. Podsumowanie

Po zakończeniu eksperymentów z oboma rozmytymi algorytmami regulacji mogliśmy zauważyć pewne tendencje. Dla obiektów nieliniowych, jak przykładowy wykorzystywany podczas tego laboratorium, jesteśmy w stanie otrzymać regulację za pomocą jednego regulatora zwykłego, ale jej jakość może nie być zadowalająca. Zdecydowanie wykorzystanie większej liczby regulatorów pozwala na znacząco lepszą jakość regulacji, gdyż możemy spróbować podzielić obszar regulacji na obszary w przybliżeniu liniowe co poprawi możliwą jakość. W teorii czym większa liczba regulatorów rozmytych, tym lepsza powinna być jakość, bo jesteśmy w stanie podzielić obszary regulacji na mniejsze obszary, które będą w przybliżeniu bardziej liniowe. Zwiększanie liczby regulatorów zwiększa również liczbę parametrów wymagających dostrojenia. Powoduje to, że dobór metodą inżynierską nie jest wskazany, gdyż duży nakład czasu poświęcony na strojenie tą metodą nie będzie miał odzwierciedlenia w jakości sterowania. Z tego względu wskazane jest dostrajanie do obiektu regulatorów rozmytych. W przypadku rozmytego algorytmu DMC dobranie poprawnych parametrów funkcji rozmywających dla każdego regulatora jest krytyczne, gdyż będą one definiowały odpowiedź skokową dla danego obszaru i błędne dobranie tych parametrów spowoduje, że po dostrojeniu wszystkich regulatorów nadal ogólna jakość regulacji będzie daleka od optymalnej i najpewniej niezadowalająca. Parametry funkcji rozmywającej muszą zostać dobrane przed samą kalibracją konkretnych regulatorów, co powoduje, że bardzo trudno ocenić czy wybrane obszary pozwolą ostatecznie na lepszą regulację niż inne (po kalibracji regulatorów pod konkretne obszary oczywiście).