

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)**

**Sprawozdanie z laboratorium nr 1**

**Sobolewski Konrad, Róžański Antoni, Giełdowski Daniel**

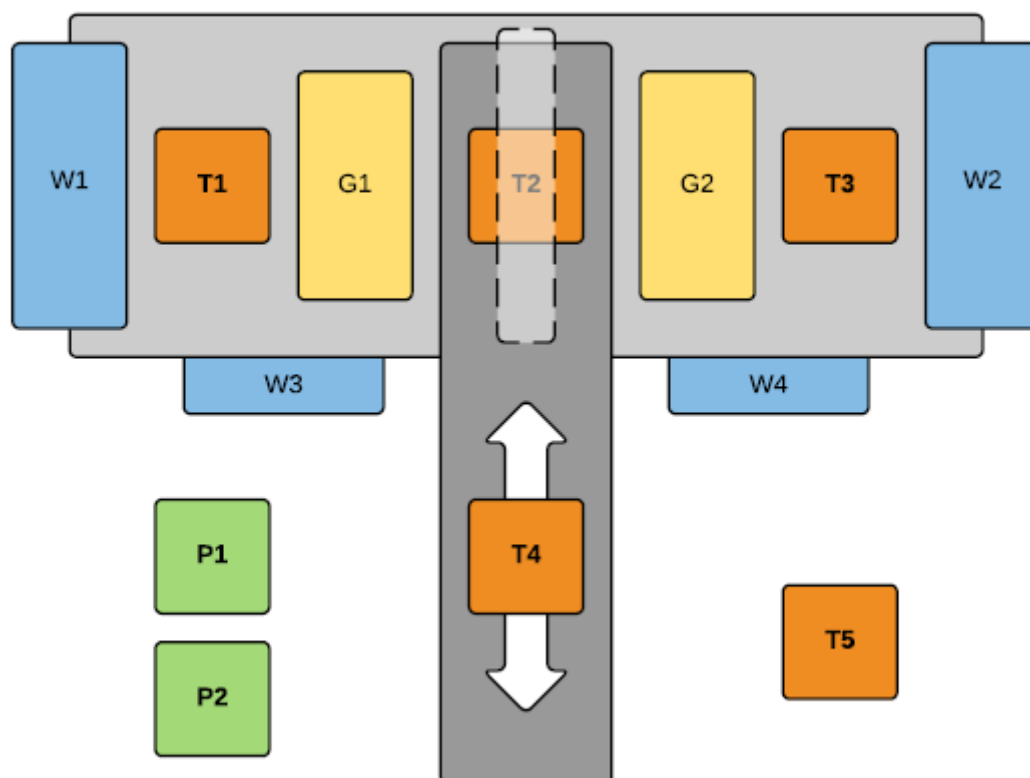
**Warszawa, 2017**

# Spis treści

<b>1. Opis obiektu</b>	2
<b>2. Zadanie 1: Punkt pracy</b>	3
<b>3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe</b>	4
3.1. Skrośnię odpowiedzi skokowe	4
3.2. Właściwości statyczne obiektu	5
3.3. Charakterystyki statyczne procesu $T1(G1, G2)$ , $T3(G1, G2)$	6
<b>4. Zadanie 3: Znormalizowane odpowiedzi skokowe</b>	9
<b>5. Zadanie 4: Algorytmy PID i DMC</b>	14
5.1. Cyfrowy algorytm PID	14
5.2. Analityczny algorytm DMC	14
<b>6. Zadanie 5: Strojenie regulatora PID i DMC</b>	17
6.1. Regulator PID	17
6.1.1. Początkowe nastawy	17
6.1.2. Korygowanie nastaw	19
6.1.3. Finalne nastawy	20
6.2. Regulator DMC	21
6.2.1. Początkowe nastawy	21
6.3. Korekta parametru $N_u$	23
6.4. Korekta parametru $\lambda$	25
6.5. Podsumowanie	26

# 1. Opis obiektu

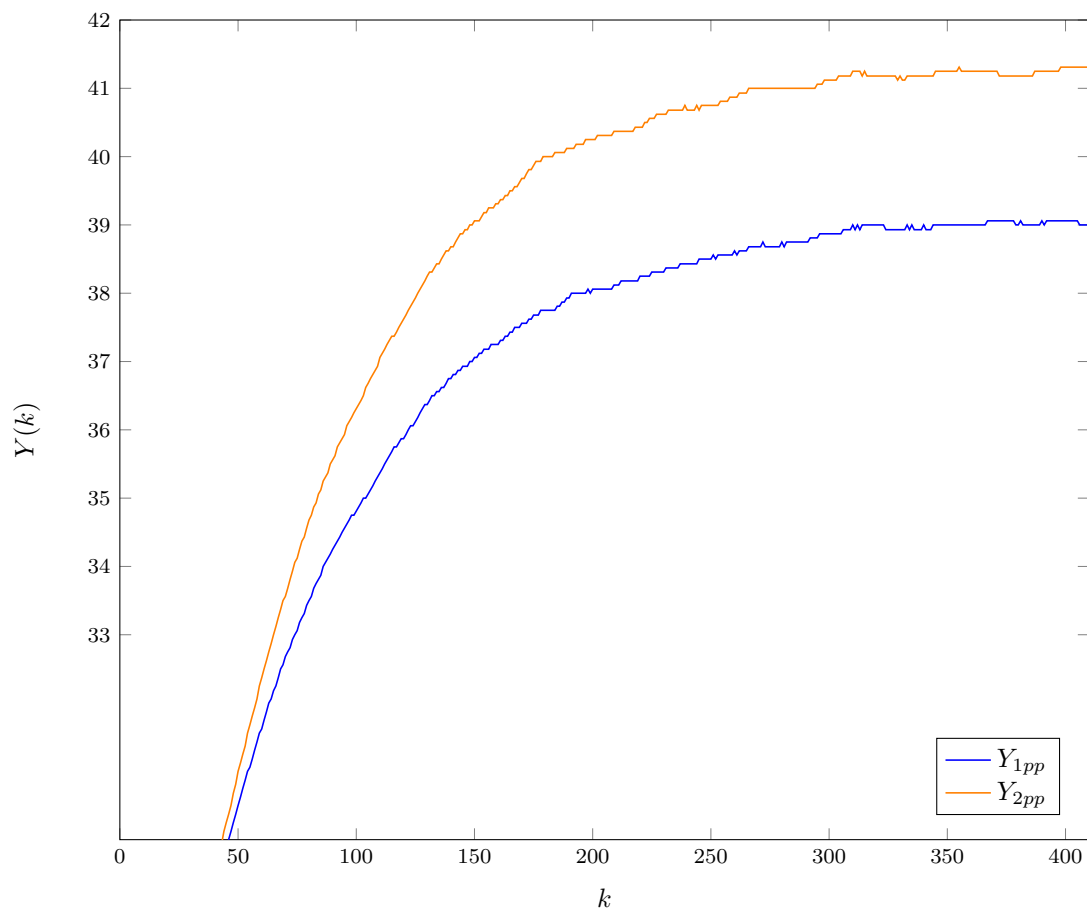
Obiektem używanym na laboratorium było stanowisko grzejąco-chłodzące przedstawione schematycznie na poniższym rysunku 1.1. Stanowisko składa się z 4 wentylatorów (W), 2 grzałek (G), 5 czujników temperatury (T), pomiaru prądu (P1) oraz napięcia (P2). Nie korzystaliśmy jednak w tym ćwiczeniu ze wszystkich elementów stanowiska. Przez cały czas trwania ćwiczenia uruchomione były wentylatory W1 oraz W2, które ustawione na stałe 50% mocy symulowały stałe niemierzalne zakłócenie. Stanowisko grzewcze było doskonale symetryczne, tj. grzałki G1 i G2 były identyczne, czujniki T1 i T3 również były identyczne, a szkielet stanowiska był jednorodny i jednakowej grubości w każdym punkcie. Symulowany był obiekt o dwóch wejściach i dwóch wyjściach - sterowaniami naszego obiektu były grzałki G1 oraz G2. Jako wyjścia zostały przyjęte czujniki temperatury T1 oraz T3. Nie odczytywaliśmy wartości z pozostałych czujników; nie były one istotne dla naszego eksperymentu. Ze względu na to, że mierzonym medium była temperatura, obiekt był narażony na różnego rodzaju szумы i zakłócenia. Jego położenie także nie sprzyjało dokładnym pomiarom (otwarte drzwi). Z tych powodów pomiary z niego otrzymane mogły zawierać odchylenia od wartości właściwej.



Rys. 1.1. Schemat stanowiska grzejąco-chłodzącego

## 2. Zadanie 1: Punkt pracy

Pierwszym poleceniem było sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem oraz określenie wartości wyjść obiektu  $Y_{1pp}$  (pomiaru  $T1$ ) oraz  $Y_{2pp}$  (pomiaru  $T3$ ) w punkcie pracy  $U_{1pp} = 25 + nz$  oraz  $U_{2pp} = 30 + nz$ , gdzie dla naszego zespołu  $nz = 11$ . Obiekt zachowywał się prawidłowo - umożliwiał zarówno sterowanie temperaturą jak i jej odczyt. Następnie przeszliśmy do badania zachowania obiektu w punkcie pracy: ustawiliśmy wartość sterowania (moc grzania grzałek  $G1$  i  $G3$ ) na  $U_{1pp}$  i  $U_{2pp}$  i odczekaliśmy znaczną ilość czasu (powyżej 8 minut). Wyjścia ustabilizowały się w pobliżu wartości  $Y_{1pp} = 39$  oraz  $Y_{2pp} = 41.31$  (czasami występowały niewielkie skoki spowodowane prawdopodobnie zakłóceniami z otoczenia). Ostatecznie zdecydowaliśmy się zachować te wartości.



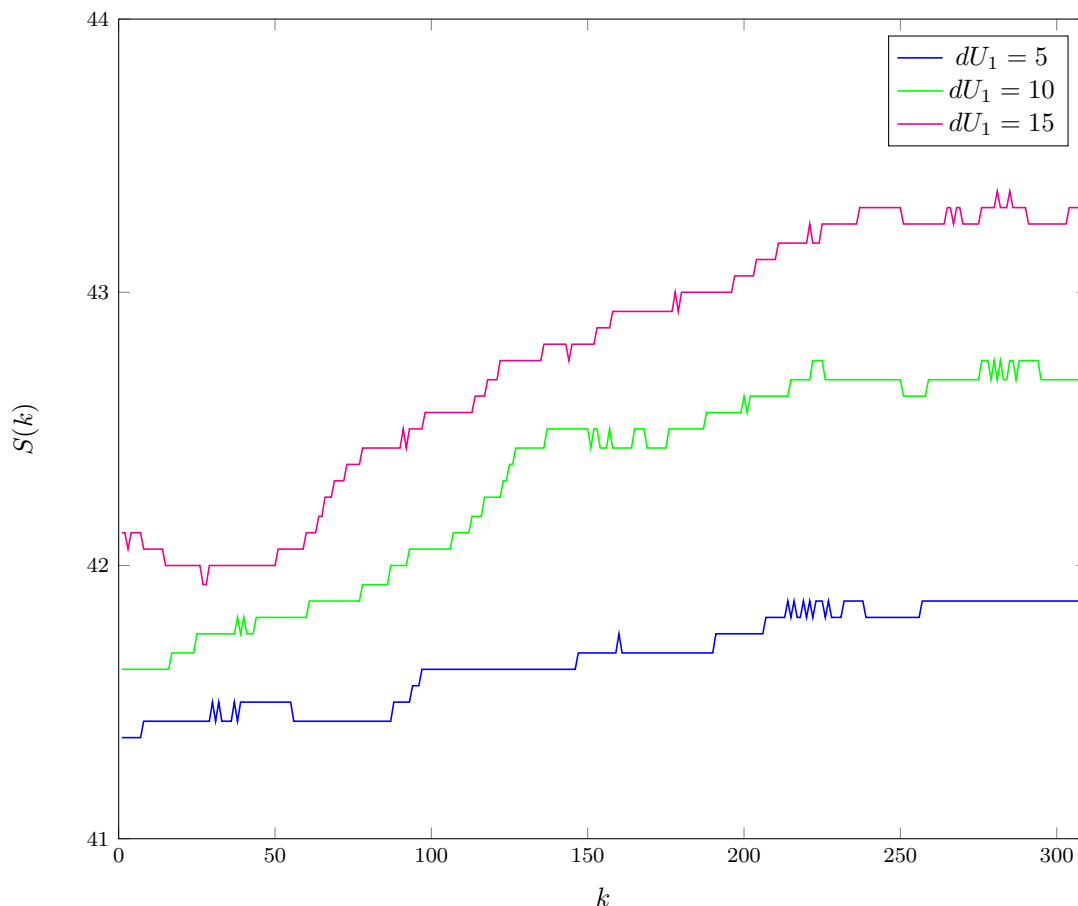
Rys. 2.1. Wykresy  $Y(k)$  w punktach pracy Upp

## 3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe

### 3.1. Skrośnię odpowiedzi skokowe

Kolejnym zadaniem było wyznaczenie trzech skrośnych odpowiedzi skokowych obiektu. Wykonaliśmy skoki na grzałce G1, rozpoczynające się w punkcie pracy i zmierzaliśmy wyjście obiektu na czuniku T3 (tj. odpowiedź skoką w torze  $y_2(u_1)$ ). Wyniki tego eksperymentu znajdują się na rysunku 3.1. Kolejno były wykonywane skoki sygnałem sterującym mocą grzałki o 5%, 10% i 15%. Dla przedstawionych odpowiedzi skok sterowania następował w chwili  $k = 10$ , co oznacza, że dopiero od  $k = 11$  wykresy przedstawiają właściwe odpowiedzi skokowe. Ponieważ obiekt był doskonale symetryczny, nie było potrzeby wykonywania drugiej skrośnej odpowiedzi skokowej  $y_1(u_2)$  - jest ona identyczna.

Z wykresu można także odczytać, jak w trakcie trwania ćwiczenia przesuwiał się punkt pracy w górę. Było to zapewne konsekwencją wzrastającej temperatury w laboratorium.



Rys. 3.1. Wykresy  $S_2(k)$  dla różnych skoków sterowania z  $U_{1pp} = 36$  o dU

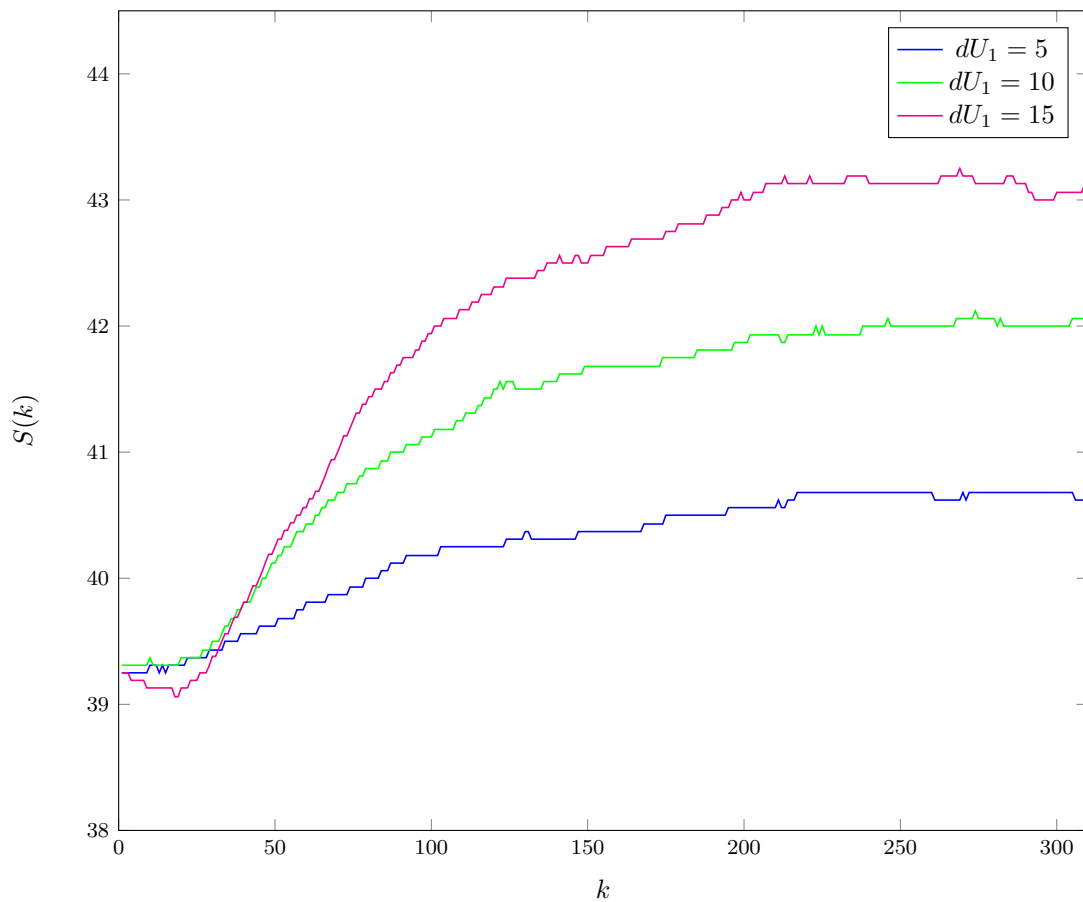
### 3.2. Właściwości statyczne obiektu

Trudności sprawiło nam określenie, czy właściwości statyczne posiadanego obiektu są liniowe. Biorąc dosłownie końcowe wartości wyjścia skrośnych odpowiedzi skokowych należałoby stwierdzić, że nie są. Należy jednak pamiętać o następujących faktach:

1. W okolicy obiektu występowały nieuchronne zakłócenia, które w znaczący sposób wpłynęły na odczyty;
2. Analizowane są odpowiedzi skrośne, które mają stosunkowo małe wzmocnienie i szum będzie na nie z tego powodu mocniej wpływał;
3. W trakcie trwania laboratorium punkt pracy przesunął się w górę, co również utrudnia poprawną interpretację wyniku;
4. Doświadczenia z poprzednich laboratoriów na tym obiekcie wskazują, że jest to obiekt liniowy.

Mając na uwadze powyższe fakty, można zauważyć w przebiegach pewne prawidłowości. Przy skoku sterowania o 5% temperatura podniosła się o około 0,4 stopnia, a przy skoku o 15% o około 1,2 stopnia. Jak można zauważyć, wyjście wzrosło o około 3 razy większą wartość przy 3 razy większym skoku, więc zachowało się liniowo. Gdyby założyć, że przy skoku o 10% nastąpiły większe zakłócenia niż przy innych i odczyt jest zbyt duży, to można by stwierdzić, że charakterystyka statyczna obiektu jest w przybliżeniu liniowa, a jej wzmocnienie statyczne toru  $y_2(u_1)$  wynosi około  $0,4/5 = 0,08$ .

Liniowy charakter obiektu potwierdzają także wykresy odpowiedzi skokowej nieskrośnej - na 3.2 zostały przedstawione charakterystyki  $y_1(u_1)$  przesunięte do wspólnego punktu pracy:



Rys. 3.2. Przesunięte do wspólnego punktu pracy wykresy  $S_1(k)$  dla różnych skoków sterowania z  $U_{1pp} = 36$  o dU

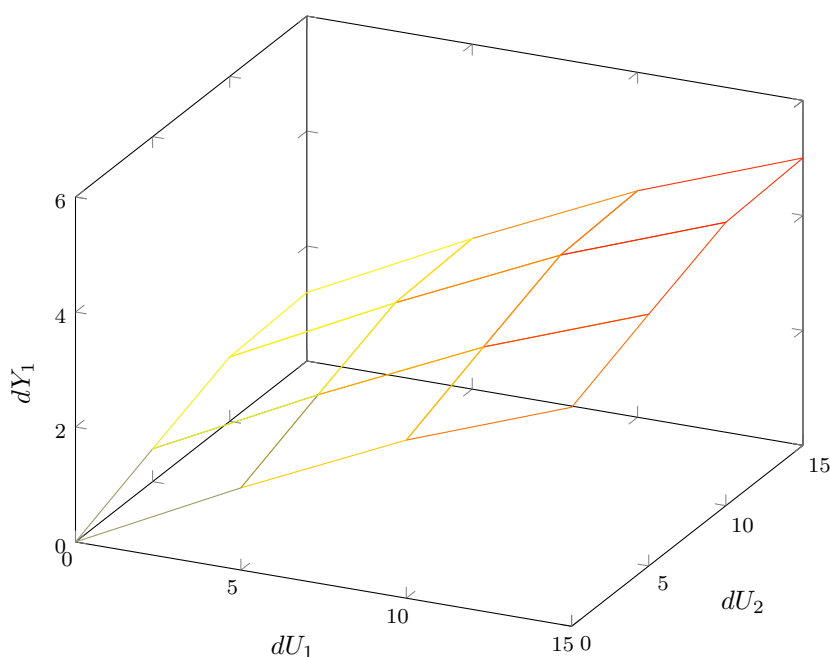
Widać na nich statystyczny charakter przebiegów - odległości między wartościami końcowymi poszczególnych skoków są bliskie tej samej wartości. Odczytujemy z niej wzmocnienie statyczne toru  $y_1(u_1)$ , które wynosi około  $2,85/10 = 0,285$ . Jak można wnioskować z tych wartości, wyjście  $y_1$  na zmianę  $u_1$  powinno reagować w przybliżeniu 2.5x mocniej, niż wyjście  $y_2$ .

Ponieważ obiekt jest idealnie symetryczny a obie grzałki mają takie same właściwości, torry  $y_1(u_2)$  i  $y_2(u_2)$  będą lustrzanym odbiciem torów dla wejścia nr 1. Tak więc: wzmocnienie statyczne toru  $y_1(u_2) = 0,08$ , a wzmocnienie statyczne toru  $y_2(u_2) = 0,285$ .

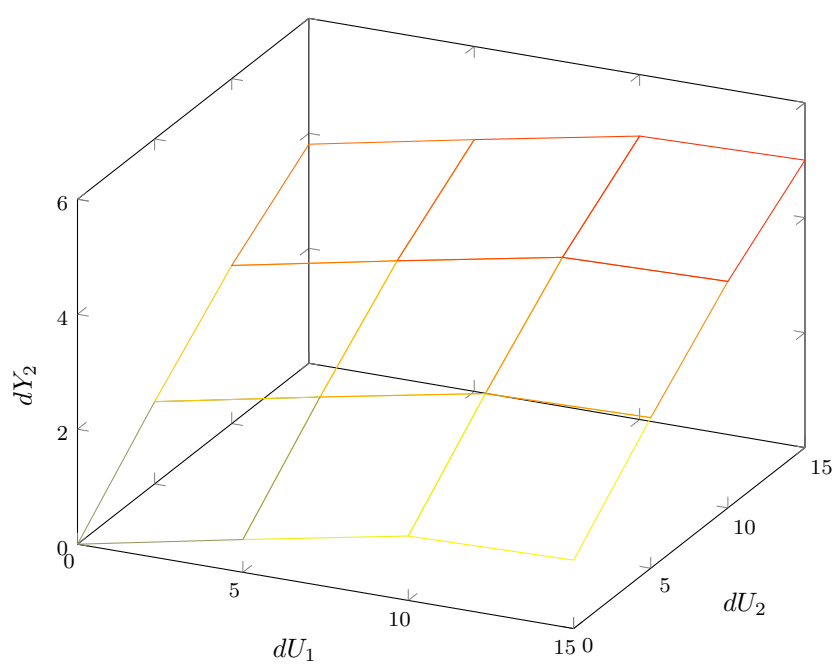
### 3.3. Charakterystyki statyczne procesu $T1(G1, G2)$ , $T3(G1, G2)$

Z powodu ograniczonego czasu na laboratorium, nie byliśmy w stanie zebrać odpowiedzi dla różnych kombinacji obu wejść. Posiadając jednak wartości opisane w poprzednim podpunkcie, możemy bez problemu utworzyć trójwymiarowe wykresy obrazujące wyjście obu wyjść w zależności od obu wejść. Tworzymy je w oparciu o dwa fakty: stanowisko jest symetryczne - właściwości odpowiednich torów ( $y_1(u_1)$  i  $y_2(u_2)$  oraz  $y_1(u_2)$  i  $y_2(u_1)$ ) są identyczne oraz zachowane są właściwości liniowe, możemy więc skorzystać z zasady superpozycji: przykładowo, wyjście  $y_1$  w stanie ustalonym dla skoku sterowania  $du_1 = 10$  i  $du_2 = 15$  będzie wynikiem sumy: wartości  $y_1$  w punkcie pracy, różnicy między wartością końcową i początkową odpowiedzi skokowej  $y_1(u_1)$  dla skoku  $du_1 = 10$  oraz różnicy między wartością końcową i początkową odpowiedzi skokowej  $y_2(u_1)$  dla skoku  $du_1 = 15$ . Zbiór punktów utworzonych w ten sposób pozwala na utworzenie płaszczyzny.

Kompletne charakterystyki przedstawiają poniższe wykresy 3.3 i 3.4.



Rys. 3.3.  $y_1(u_1, u_2)$

Rys. 3.4.  $y_2(u_1, u_2)$



---

Należy zaznaczyć, że nie tworzą one idealnych płaszczyzn - wynika to z istoty rzeczywistego obiektu, jakim jest stanowisko grzewcze oraz zakłóceń otoczenia, których obecność powoduje obarczenie odczytów nieuchronnym błędem.

## 4. Zadanie 3: Znormalizowane odpowiedzi skokowe

Kolejnym poleceniem było wyznaczyć znormalizowane odpowiedzi skokowe (takie jakie wymagane są do algorytmu DMC) i zaproksymować je, używając w tym celu członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem. Człon posiada 4 parametry:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $K$  (dalej oznaczane jako  $K_p$ ) i  $T_d$  (w dalszej części sprawozdania oznaczane jako  $TD$ ). Nazwy zostały zmienione, by nie mylić ich z parametrami algorytmu PID. Człon jest opisany wzorami powstałymi po przekształceniu jego transmitancji:

$$\alpha_1 = e^{-\frac{1}{T_1}} \quad (4.1)$$

$$\alpha_2 = e^{-\frac{1}{T_2}} \quad (4.2)$$

$$a_1 = -\alpha_1 - \alpha_2 \quad (4.3)$$

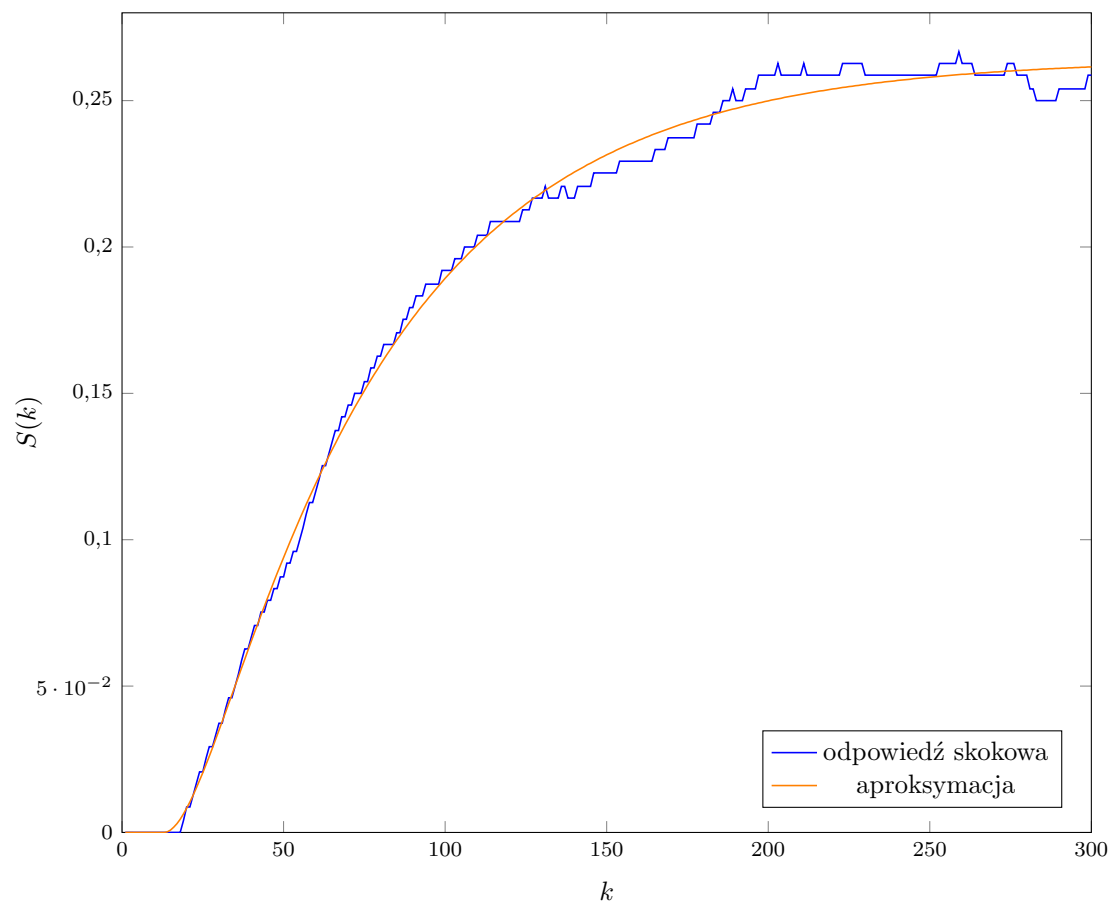
$$a_2 = \alpha_1 \alpha_2 \quad (4.4)$$

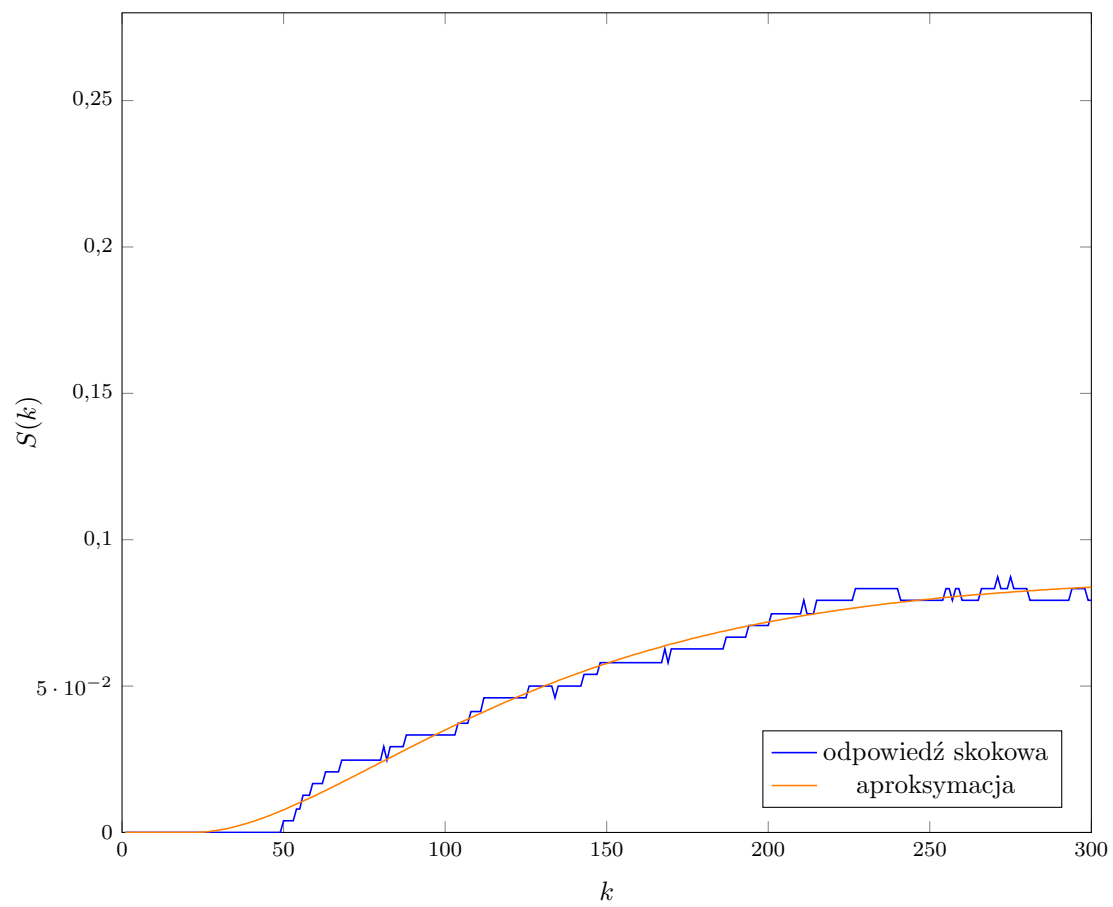
$$b_1 = \frac{K_p}{T_1 - T_2} [T_1(1 - \alpha_1) - T_2(1 - \alpha_2)] \quad (4.5)$$

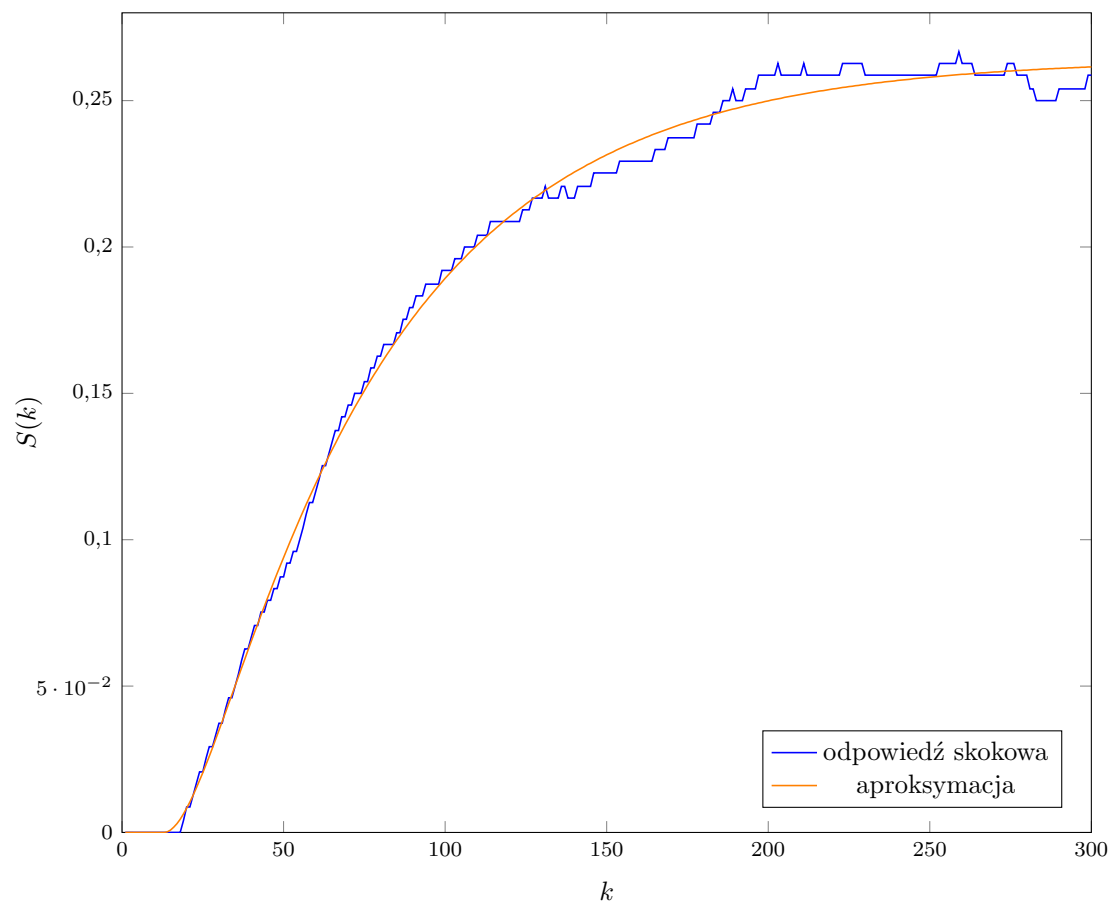
$$b_2 = \frac{K_p}{T_1 - T_2} [\alpha_1 T_2(1 - \alpha_2) - \alpha_2 T_1(1 - \alpha_1)] \quad (4.6)$$

$$y(k) = b_1 u(k - TD - 1) + b_2 u(k - TD - 2) - a_1 y(k - 1) - a_2 y(k - 2) \quad (4.7)$$

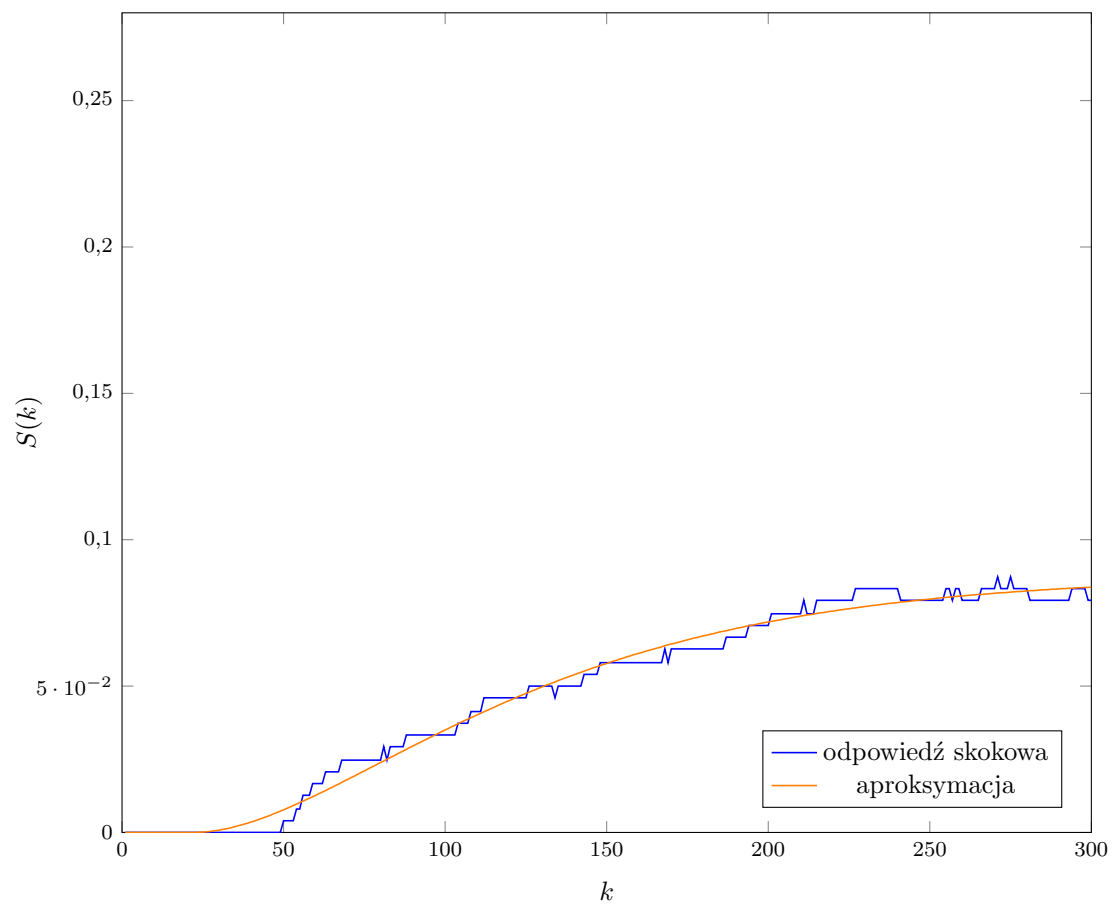
W celu doboru parametrów członu wykorzystano funkcję `fmincon`. Jako początkowe wartości dobieranych parametrów wybraliśmy  $[11, 10, 1, 10]$ , 11 i 10 dla  $T_1$  i  $T_2$  żeby nie były takie same, 1 dla  $K_p$ , bo przy dotychczas zebranych przebiegach nie spodziewaliśmy się dużego wzmocnienia dla tego obiektu i 10 dla  $TD$ , bo z obserwacji wynika, że opóźnienie obiektu jest bliskie tej wartości. Od dołu ograniczyliśmy wszystkie parametry zerami. Od góry ograniczyliśmy je wartościami  $[1000, 1000, 20, 30]$ , tak, by każdy parametr miał przedział dostosowany do swoich potrzeb (duże zmiany dla  $T_1$  i  $T_2$ , małe zmiany dla  $K_p$ ,  $TD$  sądząc po wykresach nie powinno przekroczyć 30). Jako odpowiedź do znormalizowania wybraliśmy tą dla skoku o 15, jako najmniej zaszumioną. W wyniku normalizacji przekształciliśmy ją do odpowiedzi jaką mielibyśmy po skoku jednostkowym - odjęliśmy od każdej zebranej próbki wartość w punkcie pracy dla danego wyjścia i podzieliliśmy otrzymane wartości przez skok). Następnie po wykonaniu aproksymacji otrzymaliśmy parametry członu równe  $T_1 = 60,41746$ ,  $T_2 = 9,98566$ ,  $K_p = 0,26426$  i  $TD = 13$  przy błędzie optymalizacji  $e = 0,0066$  dla toru  $y_1(u_1)$  (analogicznie  $y_2(u_2)$ ) oraz  $T_1 = 56,48782$ ,  $T_2 = 56,99066$ ,  $K_p = 0,08764$  i  $TD = 22$  przy błędzie optymalizacji  $e = 0,0030$  dla toru  $y_2(u_1)$  (analogicznie  $y_1(u_2)$ ). Znormalizowane odpowiedzi i jej aproksymacje przedstawiliśmy na poniższych wykresach 4.1,4.2,4.4,4.3.

Rys. 4.1. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji toru  $y_1(u_1)$

Rys. 4.2. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji toru  $y_1(u_2)$



Rys. 4.3. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji toru  $y_2(u_2)$

Rys. 4.4. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji toru  $y_2(u_1)$

## 5. Zadanie 4: Algorytmy PID i DMC

### 5.1. Cyfrowy algorytm PID

W projekcie został wykorzystany regulator cyfrowy *PID*, którego parametry są opisane poniższymi wzorami, gdzie  $K$  - wzmocnienie członu  $P$ ,  $T_p$  - czas próbkowania,  $T_i$  - czas zdwojenia członu całkującego  $I$ ,  $T_d$  - czas wyprzedzenia członu różniczkującego  $D$ ,  $j$  - numer toru.

$$r_0^j = K^j * (1 + T_p / (2 * T_i^j) + T_d^j / T_p) \quad (5.1)$$

$$r_1^j = K^j * (T_p / (2 * T_i^j) - 2 * T_d^j / T_p - 1) \quad (5.2)$$

$$r_2^j = K * T_d^j / T_p \quad (5.3)$$

W każdej iteracji pętli sterowania jest obliczany uchyb danego wyjścia obiektu i wartości zadanej tego wyjścia.

$$e(k)^j = Y^{\text{zad}}(k)^j - Y(k)^j \quad (5.4)$$

Sterowanie regulatora zostaje wyliczone na bieżącą chwilę przy użyciu wzoru:

$$U(k)^j = r_2^j * e(k - 2)^j + r_1^j * e(k - 1)^j + r_0^j * e(k)^j + U(k - 1)^j \quad (5.5)$$

Na końcu zotają nałożone na to sterowanie ograniczenia:

$$0 \leq G1(k) \leq 100 \quad (5.6)$$

$$0 \leq G2(k) \leq 100 \quad (5.7)$$

### 5.2. Analityczny algorytm DMC

Do obliczeń wykorzystujemy następujące wzory:

$$\mathbf{y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{\text{zad}}(k) \\ \vdots \\ y_{ny}^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix}_{n_y \times 1} \quad (5.8)$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ \vdots \\ y_{ny}(k) \end{bmatrix}_{n_y \times 1} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_{nu}(k) \end{bmatrix}_{n_u \times 1} \quad (5.10)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \vdots \\ \Delta u_{nu}(k) \end{bmatrix}_{n_u \times 1} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y^{\text{zad}}(k|k) \\ \vdots \\ y^{\text{zad}}(k|k) \end{bmatrix}_{N \times n_y} \quad (5.12)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u_{n_u}(k + N_u - 1|k) \end{bmatrix}_{N \times n_y} \quad (5.13)$$

$$\Delta \mathbf{U}^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k - (D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times n_u} \quad (5.14)$$

$$\mathbf{S}_l = \begin{bmatrix} s_l^{11} & s_l^{12} & \dots & s_l^{1n_u} \\ s_l^{21} & s_l^{22} & \dots & s_l^{2n_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_l^{n_y 1} & s_l^{n_y 2} & \dots & s_l^{n_y n_u} \end{bmatrix}_{n_y \times n_u}, l = 1, \dots, D. \quad (5.15)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & S_{N-1} & \dots & S_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times (N_u \times n_u)} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{M}^P = \begin{bmatrix} S_2 - S_1 & S_3 - S_2 & \dots & S_D - S_{D-1} \\ S_3 - S_1 & S_4 - S_2 & \dots & S_{D+1} - S_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N+1} - S_1 & S_{N+2} - S_2 & \dots & S_{N+D-1} - S_{D-1} \end{bmatrix}_{(N \times n_y) \times ((D-1) \times n_u)} \quad (5.17)$$

$$\mathbf{Y}^0(k) = \mathbf{Y}(k) + \mathbf{M}^P \Delta \mathbf{U}^P(k) \quad (5.18)$$

$$\mathbf{K} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda * \mathbf{I})^{-1} \mathbf{M}^T \quad (5.19)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \mathbf{K}(\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) - \mathbf{Y}^0(k)) \quad (5.20)$$

W naszej regulacji potrzebujemy wyznaczyć tylko pierwszy element macierzy  $\Delta \mathbf{U}(k)$  czyli  $\Delta u(k|k)$ . W tym celu rozwijamy wzór do postaci:

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - k_u \Delta \mathbf{U}^P \quad (5.21)$$

gdzie:

$$e(k) = \mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) - \mathbf{Y}(k) \quad (5.22)$$

$$k_e^j = \sum_{i=n_u}^{N * n_y} K(1 : n_u, i) \quad (5.23)$$

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} k_e^1 & k_e^2 \\ k_e^3 & k_e^4 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$



$$k_u = kM^P \quad (5.25)$$

$k$  to oznaczenie pierwszego wiersza macierzy  $K$ . Aktualne sterowanie otrzymujemy poprzez zsumowanie poprzedniego sterowania i aktualnie wyliczonego  $\Delta u(k|k)$ .

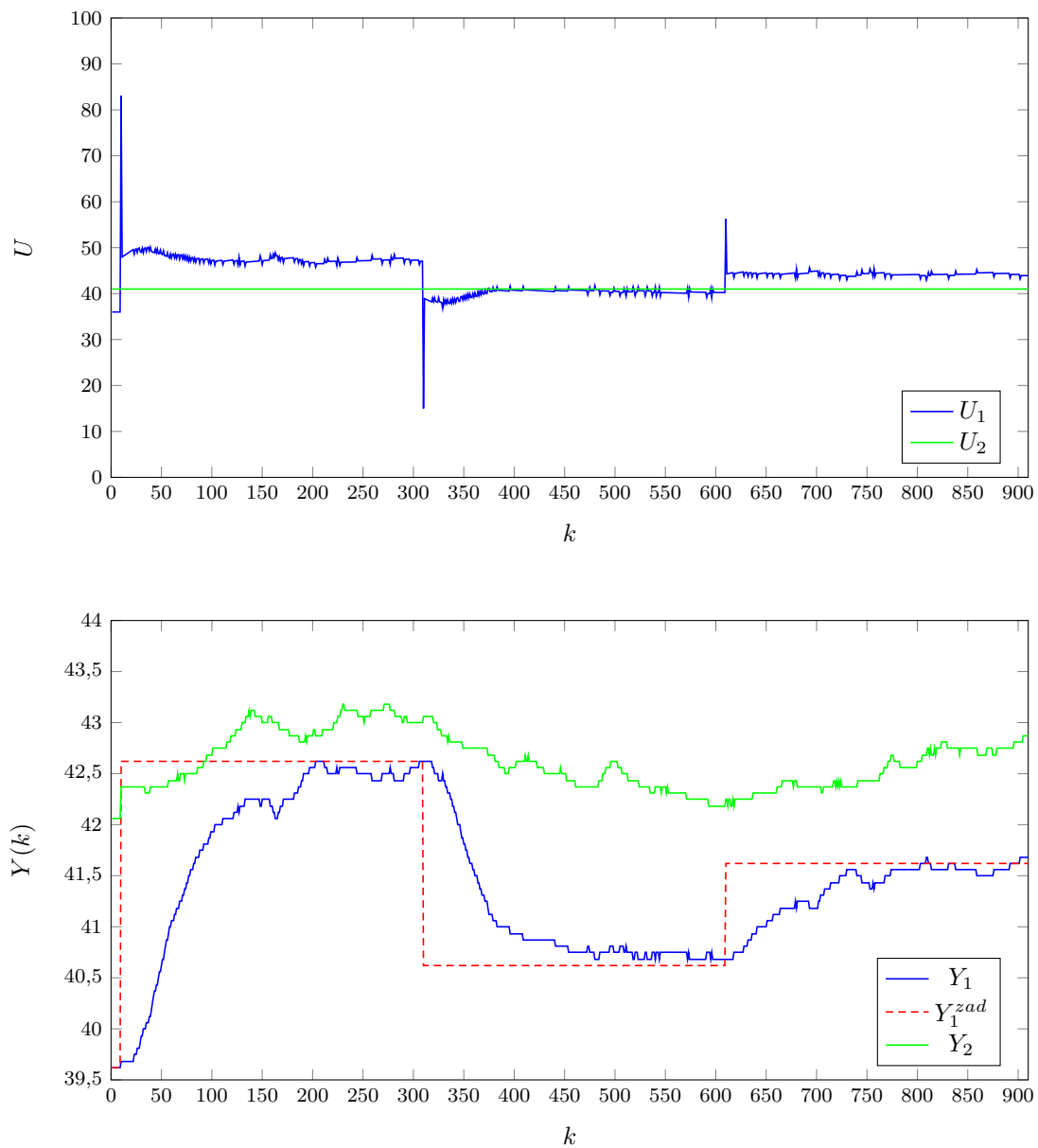
## 6. Zadanie 5: Strojenie regulatora PID i DMC

Strojenie regulatora odbyło się na podstawie oceny regulacji dla zaproponowanej trajektorii zmian sygnałów zadanych składającej się z trzech skoków. Podczas strojenia, jeden z regulatorów jest zawsze wyłączony - ma wzmocnienie  $K_p = 0$ . Dobieramy dla drugiego niego odpowiednie nastawy, kierując się zarówno oceną jakościową (charakter przebiegów sterowania i wyjścia) jak i ilościową - wielkością błędu  $e$ . Po dostrojeniu pierwszego regulatora, powinniśmy nastąpić proces doboru nastaw dla drugiego, jednak dla stanowiska grzewczego w laboratorium, sterowane obiekty (grzałki) są identyczne - ich regulatory więc również powinny być takie same, nie występuje zatem potrzeba ponownego strojenia. Gdy zostaną znalezione nastawy pierwszego regulatora, należy uruchomić drugi z takimi samymi, i wtedy, jeśli zajdzie taka konieczność, końcowo skorygować nastawy obu naraz.

### 6.1. Regulator PID

#### 6.1.1. Początkowe nastawy

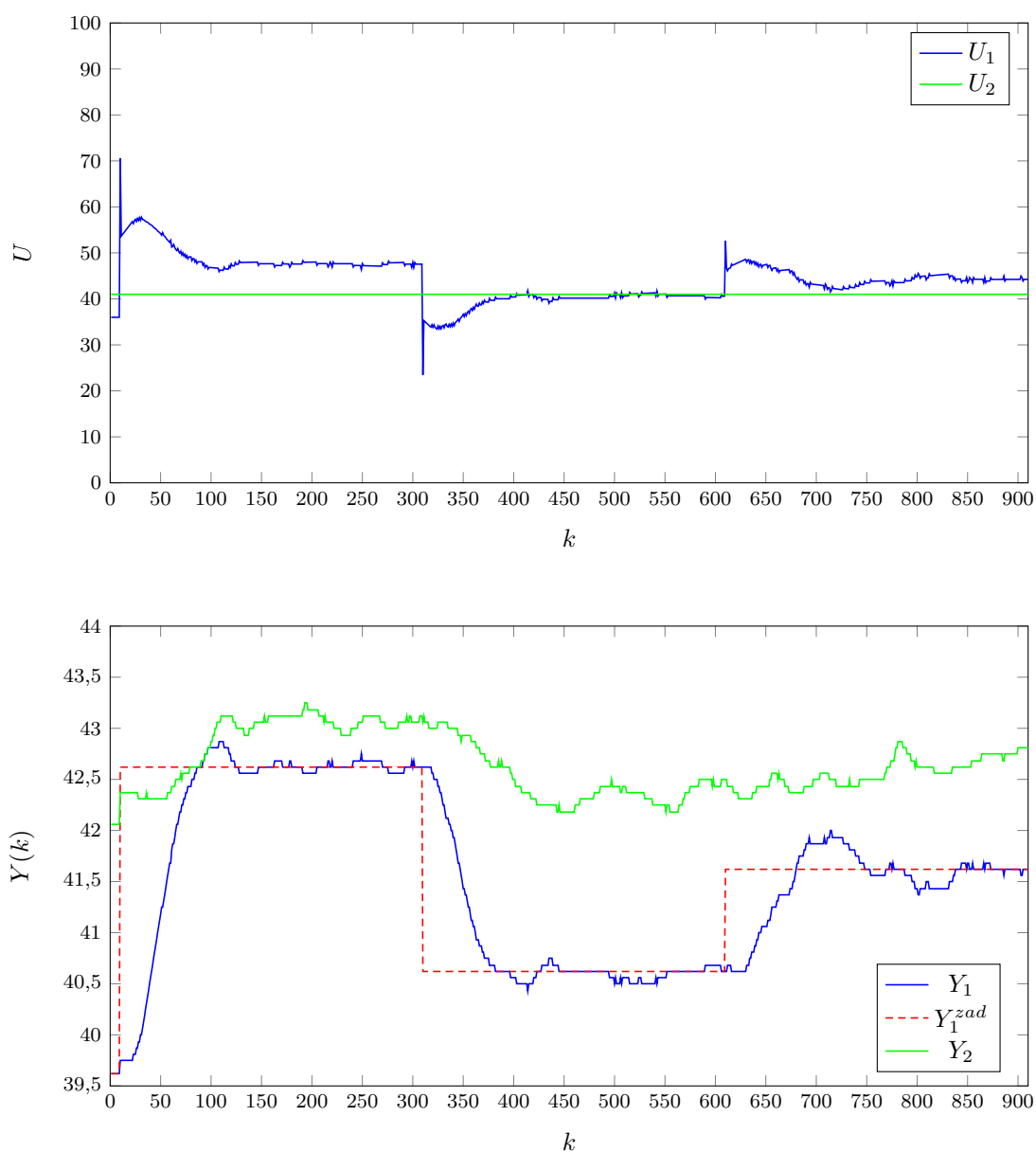
Nastawy regulatora PID zostały dobrane eksperymentalnie. Jako wartości początkowe przyjęliśmy nastawy otrzymane jako optymalne na poprzednich laboratoriach na stanowisku grzewczym, tj:  $K_p = 4, T_i = 80, T_d = 3$ . Drugi regulator, jak wspomniane zostało we wstępie, został wyłączony. Na rys. 6.1 można obserwować pracę regulatora z takimi nastawami. Jak widać, nie są to nastawy optymalne; regulator jest bardzo powolny oraz występuje uchyb ustalony. Błąd wyjścia  $Y_1$  wyniósł:  $E = 582,3934$ .



Rys. 6.1. Działanie algorytmu PID przy początkowych nastawach  $K_p = 4, T_i = 80, T_d = 3$  sterującego wejściem  $U_1$

### 6.1.2. Korygowanie nastaw

Aby wyeliminować uchyb ustalony, zwiększyliśmy  $K_p$  o 2. Aby układ szybciej osiągał wartość zadaną, zwiększyliśmy również wpływ członu całkującego, zmniejszając parametr  $T_i$  o 20. Również postanowiliśmy zmniejszyć wpływ członu różniczkującego  $T_d$  - wyhamowanie narastania wartości wyjściowej w okolicach  $k = 150$  mogło wynikać ze zbyt dużej wartości tego parametru. Tak więc nowe nastawy to:  $K_p = 6, T_i = 60, T_d = 1$ . Dla takich nastaw osiągnęliśmy przebiegi jak na 6.2.

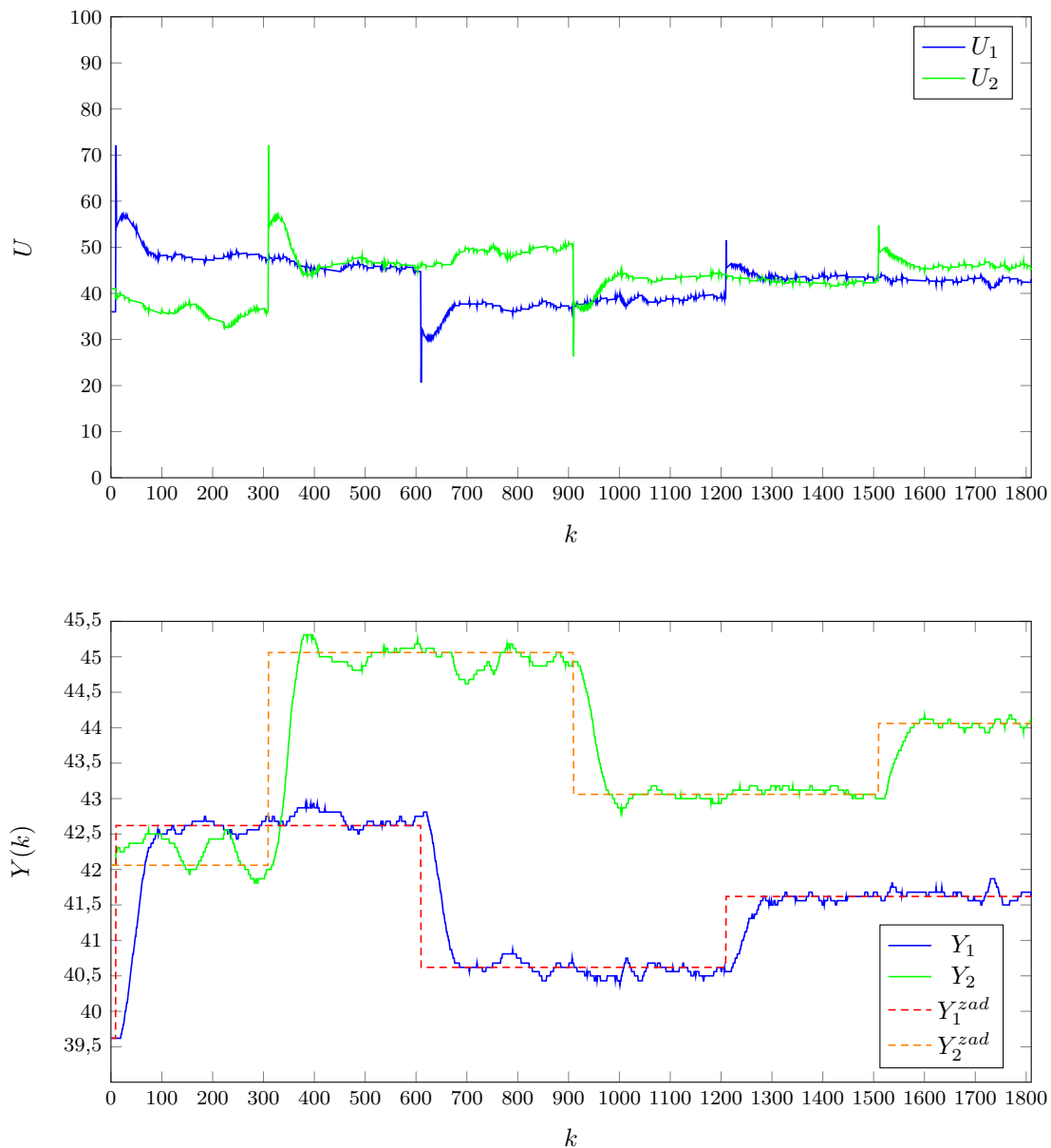


Rys. 6.2. Działanie algorytmu PID przy skorygowanych nastawach  $K_p = 6, T_i = 60, T_d = 1$  sterującego wejściem  $U_1$

Otrzymany regulator zapewnia znacznie lepszą jakość regulacji - nie dość, że regulator jest szybszy, to osiąga wartość zadaną w zadawalającym czasie a sterowanie się poprawiło. Wartość błędu również uległa znacznemu pomniejszeniu: błąd wyjścia  $Y_1$  wyniósł:  $E = 426,5754$ .

### 6.1.3. Finalne nastawy

Z powodu presji czasu na laboratorium, nie byliśmy w stanie przeprowadzić kolejnych eksperymentów, aby poprawić jakość regulacji. Postanowiliśmy uruchomić oba regulatory z tymi nastawami, korygując delikatnie parametr  $T_i$  w górę - odnieśliśmy wrażenie, że przebiegi zaczynają mieć oscylacyjny charakter spowodowany zbyt mocnym całkowaniem. Nowa wartość:  $T_i = 65$ . Na poniższych wykresach można zaobserwować działanie gotowego dwuwymiarowego regulatora PID, z nastawami regulatorów podłączonych do obu wejść równymi:  $K_p = 6, T_i = 65, T_d = 1$ .



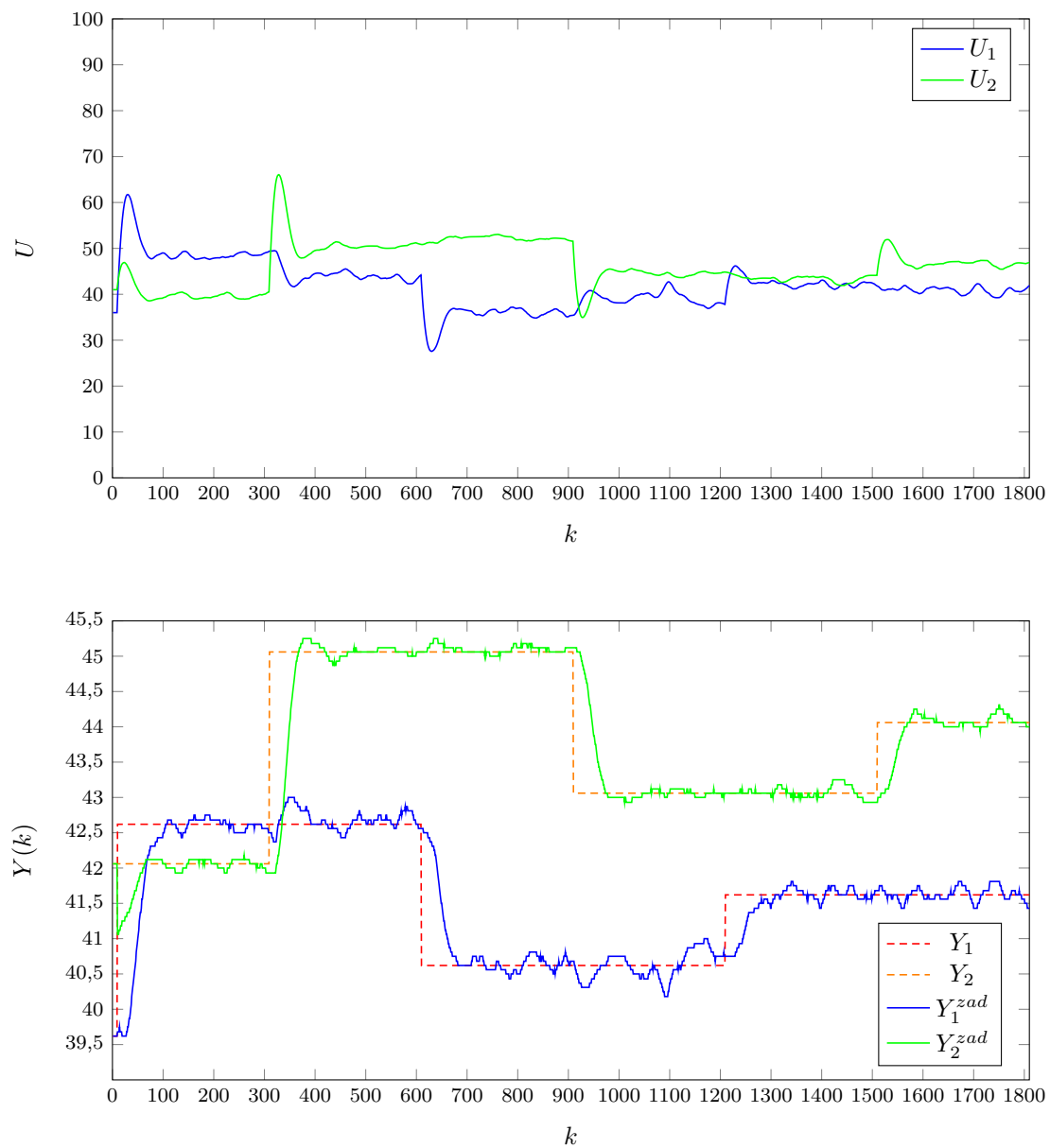
Rys. 6.3. Działanie dwuwymiarowego regulatora PID o nastawach  $K_p = 6, T_i = 65, T_d = 1$

Jakość regulacji jest zadowalająca. Oba wyjścia stosunkowo szybko osiągają wartość zadaną, a błąd nie jest duży. Podczas pierwszego, największego skoku wartości zadanej  $Y_1^{zad}$  ( $dY_2^{zad} = 3$ ) wyjście  $Y_2$  zdaje się wpadać w oscylacje. Trudno nam określić, czy nie są to chwilowe zewnętrzne zakłócenia, gdyż dla następnych skoków wartości zadanej taka sytuacja nie występuje. Należałoby przeprowadzić więcej eksperymentów i ewentualnie zmniejszyć jeszcze wpływ całkowania. Błędy osiągnęły wartości: błąd wyjścia  $Y_1$  wyniósł:  $E_1 = 464,1920$ , natomiast błąd wyjścia  $Y_2$  wyniósł:  $E_2 = 446,9870$ . Błąd sumaryczny:  $E = 911,1790$ . Mimo, że wartość błędu na wyjściu  $Y_1$  zwiększyła się, należy pamiętać, że więc zjawisko to jest oczekiwane, gdyż teraz działają oba regulatory, które mogą sobie wzajemnie przeszkadzać.

## 6.2. Regulator DMC

### 6.2.1. Początkowe nastawy

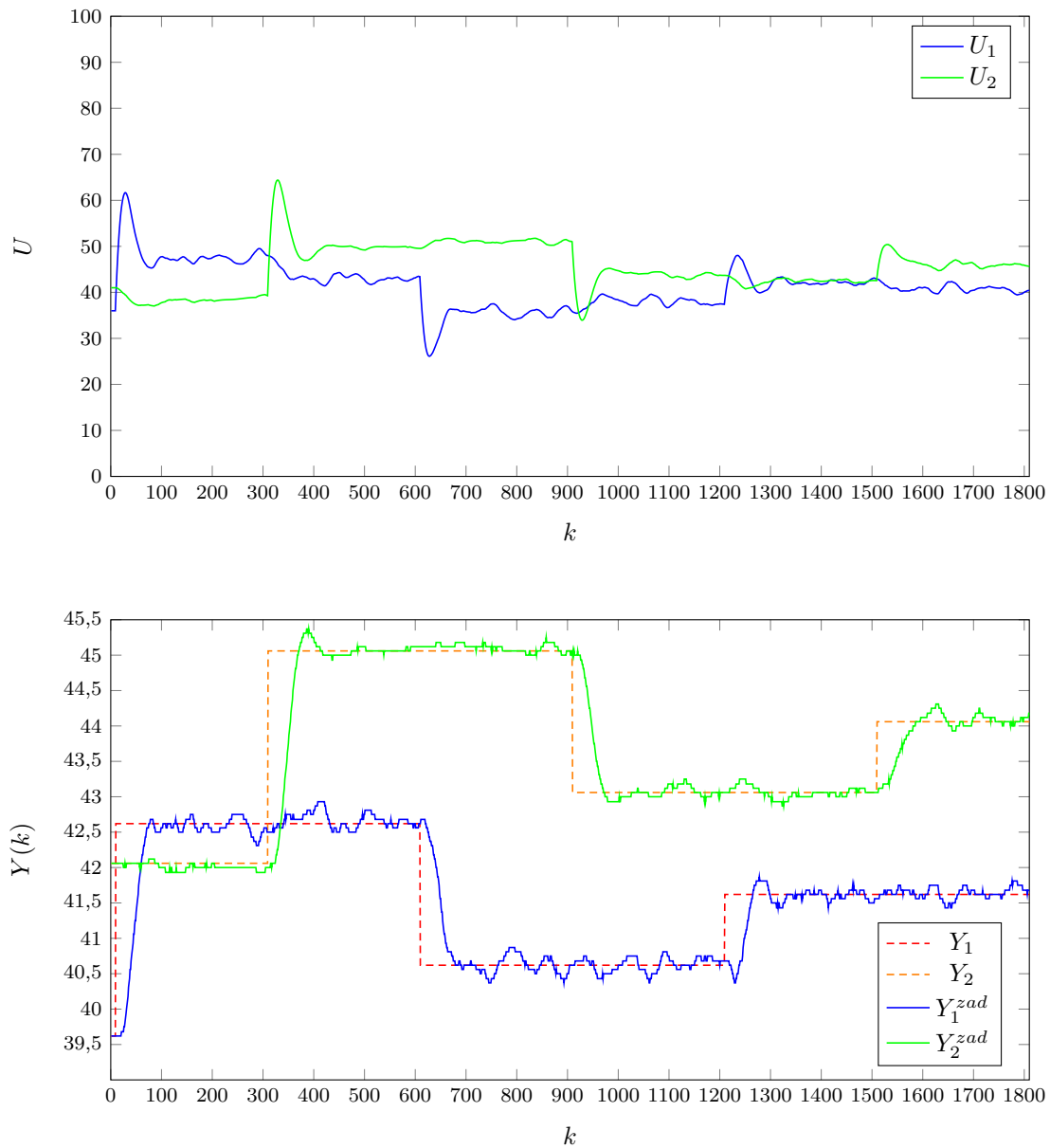
Nastawy regulatora DMC zostały dobrane eksperymentalnie. Jako wartości początkowe przyjęliśmy nastawy  $N = 300$ ,  $Nu = 300$ ,  $\lambda = 1$ . Wartość 300 wynika z obserwacji obiektu - bezpiecznie założyliśmy, że tyle wynosi jego horyzont dynamiki. Obiekt ten nie jest wrażliwy na nagłe zmiany sterowań, ale wartość  $\lambda = 1$  również założyliśmy bezpiecznie dosyć dużą. Na rys. 6.4 można obserwować pracę regulatora z takimi nastawami. Regulator działa poprawnie, ale nie są to nastawy optymalne; regulator powinien działać szybciej i z mniejszym błędem. Błąd wyjść wyniósł: dla  $Y_1$ :  $E_1 = 482,4677$ , dla  $Y_2$ :  $E_2 = 459,5991$ . Łączny:  $E = 942,0668$ .

Rys. 6.4. Działanie dwuwymiarowego regulatora DMC o nastawach  $N = 300, Nu = 300, \lambda = 1$

### 6.3. Korekta parametru $Nu$

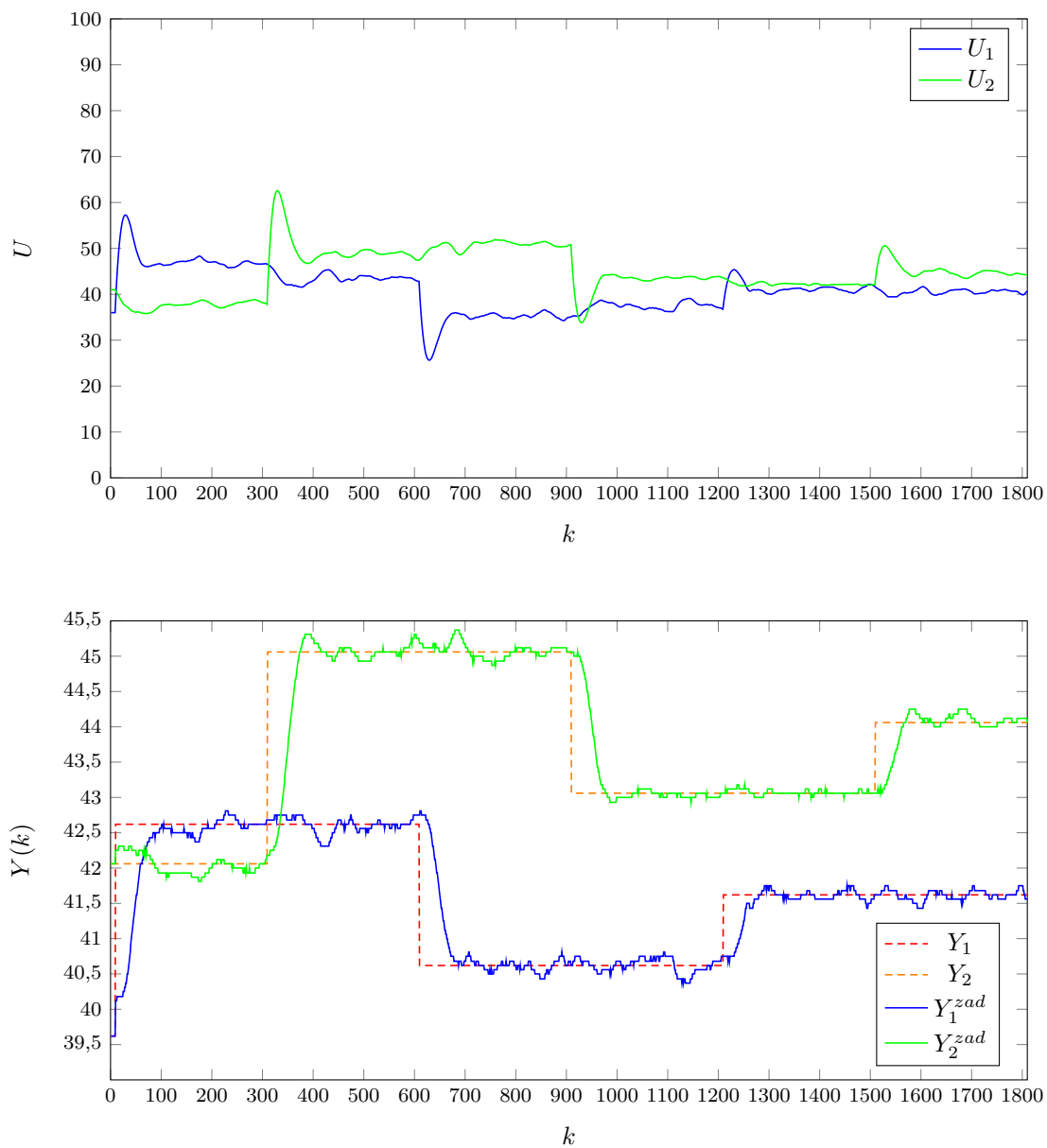
Następnie przystąpiliśmy do zmian nastaw: parametr  $N$  pozostawiliśmy bez zmian, jako że zarówno teoria jak i nasza praktyka wskazywały, że jego zmniejszanie, jeśli w ogóle, to prowadziło do minimalnych zysków w jakości sterowania. Gdyby był to obiekt szybszy lub działający w wymagającym środowisku, możnaby rozważyć skrócenie tej wartości w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej, jednak dla okresu próbkowania  $Tp = 1$  nie jest to konieczne. Wykonaliśmy dwukrotnie eksperyment kolejno dla wartości  $Nu = 150$  (rys. 6.5) oraz  $Nu = 100$  (rys. 6.6). Błędy w pierwszym eksperymencie osiągnęły wartości: dla  $Y_1$ :  $E_1 = 454,2170$ , dla  $Y_2$ :  $E_2 = 439,2227$ . Łączny:  $E = 893,4397$ .

Natomiast za drugim razem: dla  $Y_1$ :  $E_1 = 375,6482$ , dla  $Y_2$ :  $E_2 = 431,5992$ . Łączny:  $E = 807,2474$ .



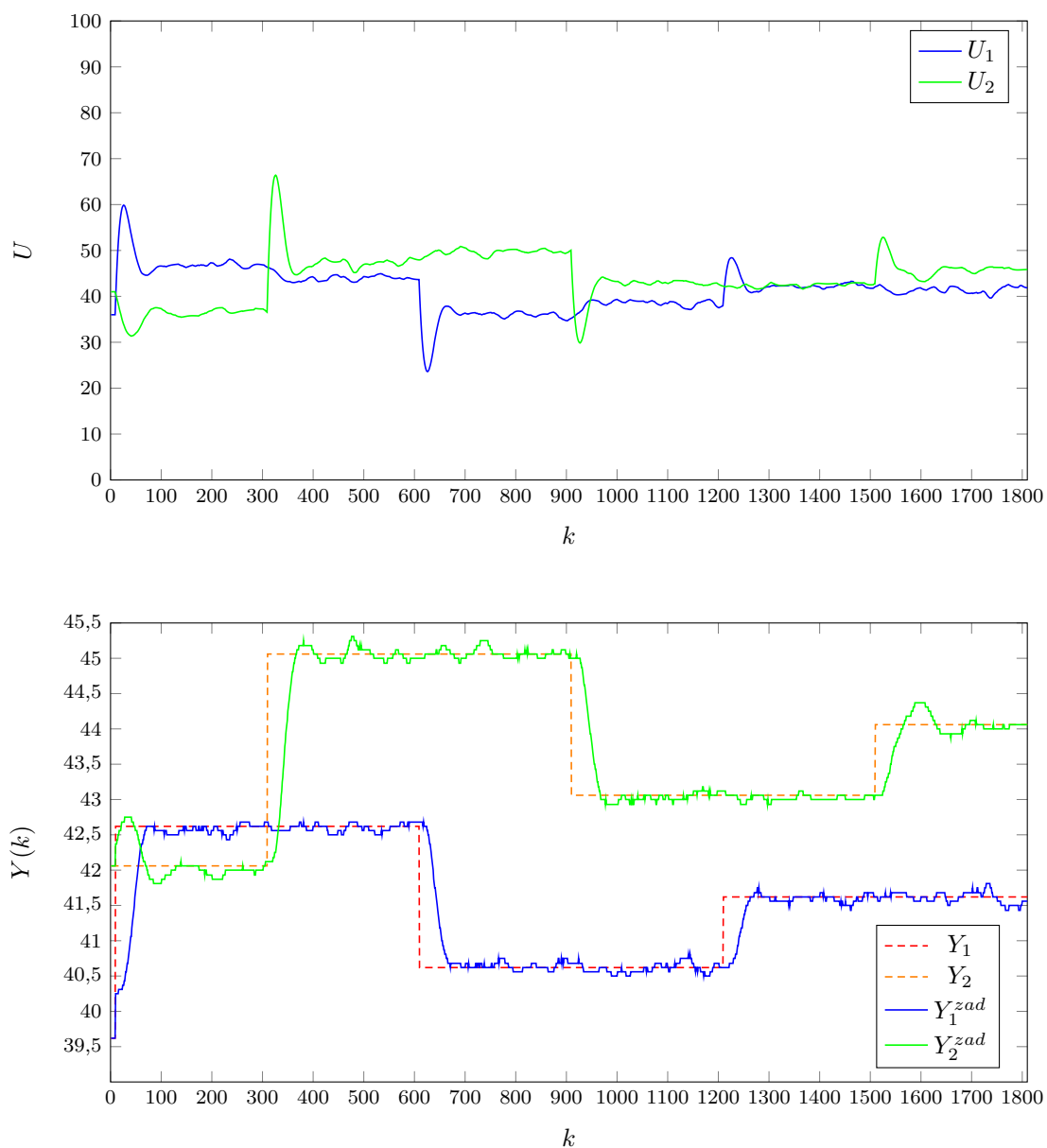
Rys. 6.5. Działanie dwuwymiarowego regulatora DMC o nastawach  $N = 300$ ,  $Nu = 150$ ,  $\lambda = 1$



Rys. 6.6. Działanie dwuwymiarowego regulatora DMC o nastawach  $N = 300, Nu = 100, \lambda = 1$

### 6.4. Korekta parametru $\lambda$

Jako ostatni zmieniony został parametr  $\lambda$ . W celu poprawy szybkości sterowania zmniejszyliśmy jego wartość o połowę (rys. 6.7). Finalnie, błędy osiągnęły wartości: dla  $Y_1$ :  $E_1 = 311,0436$ , dla  $Y_2$ :  $E_2 = 407,5791$ . Łączny:  $E = 718,6227$ .



Rys. 6.7. Działanie dwuwymiarowego regulatora DMC o nastawach  $N = 300$ ,  $Nu = 100$ ,  $\lambda = 0.5$

### 6.5. Podsumowanie

Tak jak należało się spodziewać, regulator DMC w stosunku do regulatora PID zapewnia lepszą regulację. Zarówno wskaźnik jakości regulacji (dla DMC:  $E = 718,6227$ , dla PID:  $E = 911,1790$ ) jak i wizualna ocena przebiegów wyjść i sterowania jednoznacznie wskazują algorytm DMC jako lepszy regulator obiektów o dwóch wejściach i dwóch wyjściach.