

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

Sprawozdanie z laboratorium nr 2

Sobolewski Konrad, Róžański Antoni, Giełdowski Daniel

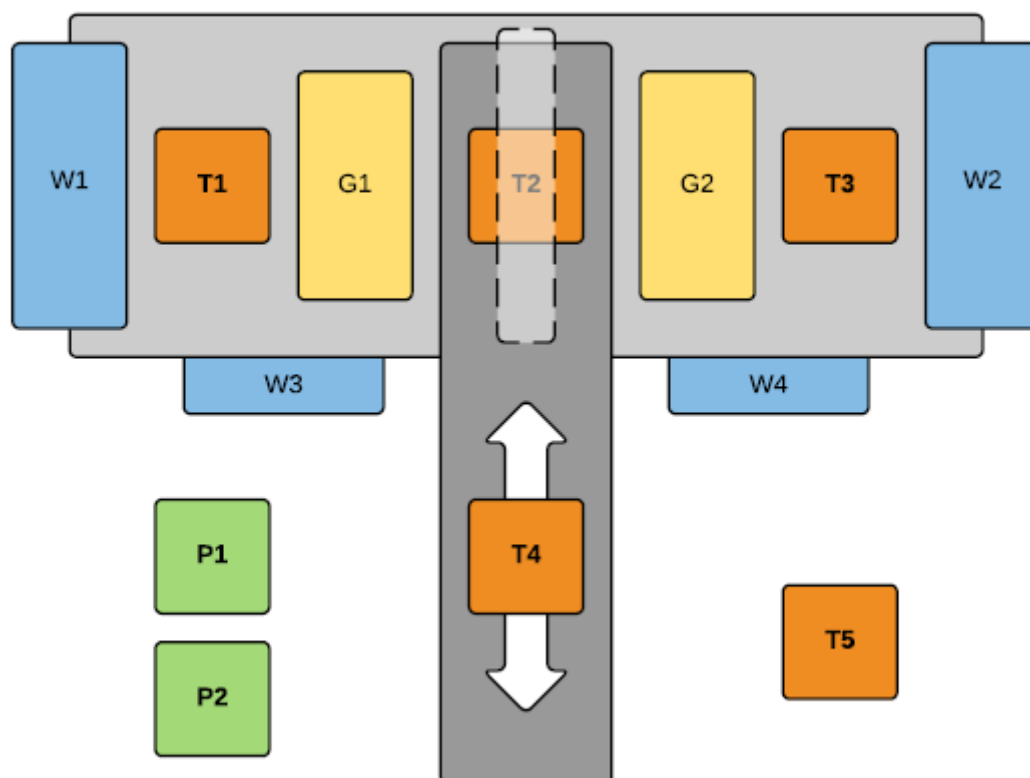
Warszawa, 2017

Spis treści

1. Opis obiektu	2
2. Zadanie 1: Punkt pracy	3
3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe	4
4. Zadanie 3: Znormalizowana odpowiedź skokowa	8
5. Zadanie 4: Algorytm DMC	11
5.1. Analityczny algorytm DMC	11
5.2. Dobieranie nastaw analitycznego regulatora DMC	12
5.2.1. Horyzont predykcji N	12
5.2.2. Horyzont sterowania N_u	12
5.2.3. Parametr λ	14
6. Zadanie 5: Regulacja obiektu z uwzględnieniem wpływu zakłóceń	16
6.1. Zmiany w stosunku do podstawowej wersji regulatora analitycznego	16
6.2. Dobór parametru Dz	16
6.3. Porównanie jakości regulacji z i bez uwzględnienia zakłóceń	18

1. Opis obiektu

Obiektem używanym na laboratorium było stanowisko grzewąco-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 ze wszystkiego naraz. Wyłączyliśmy wszystkie wentylatory oprócz W1, który ustawiliśmy na stałe na 50%, co pozwoli na szybszy spadek temperatury obiektu. Sterowaniem i źródłem zakłóceń naszego obiektu była grzałka G1 (grzałka G2 na stałe wyłączona). Jako wyjście przyjęliśmy czujnik temperatury T1. Nie odczytywaliśmy wartości z pozostałych czujników, nie były one ważne dla naszego eksperymentu. Ze względu na to, że mierzonym medium była temperatura, obiekt był narażony na różnego rodzaju szumy i zakłócenia. Jego położenie także nie sprzyjało dokładnym pomiarom (otwarte drzwi oraz wentylacja w pobliżu). Z tych powodów pomiary z niego otrzymane mogły zawierać (a dokładniej mówiąc na pewno zawierały) odchylenia od wartości właściwej, co zostało uwzględnione w trakcie analizy wyników.



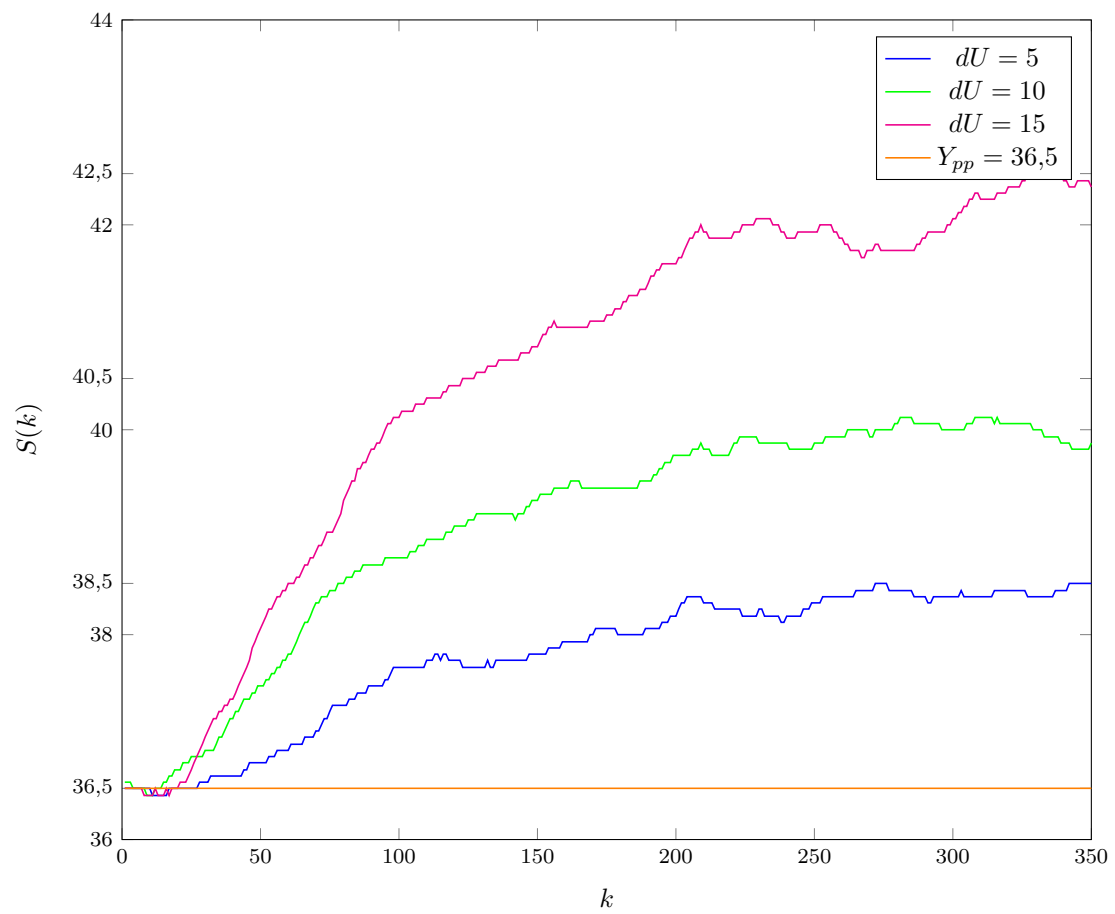
Rys. 1.1. Schemat stanowiska grzewąco-chłodzącego

2. Zadanie 1: Punkt pracy

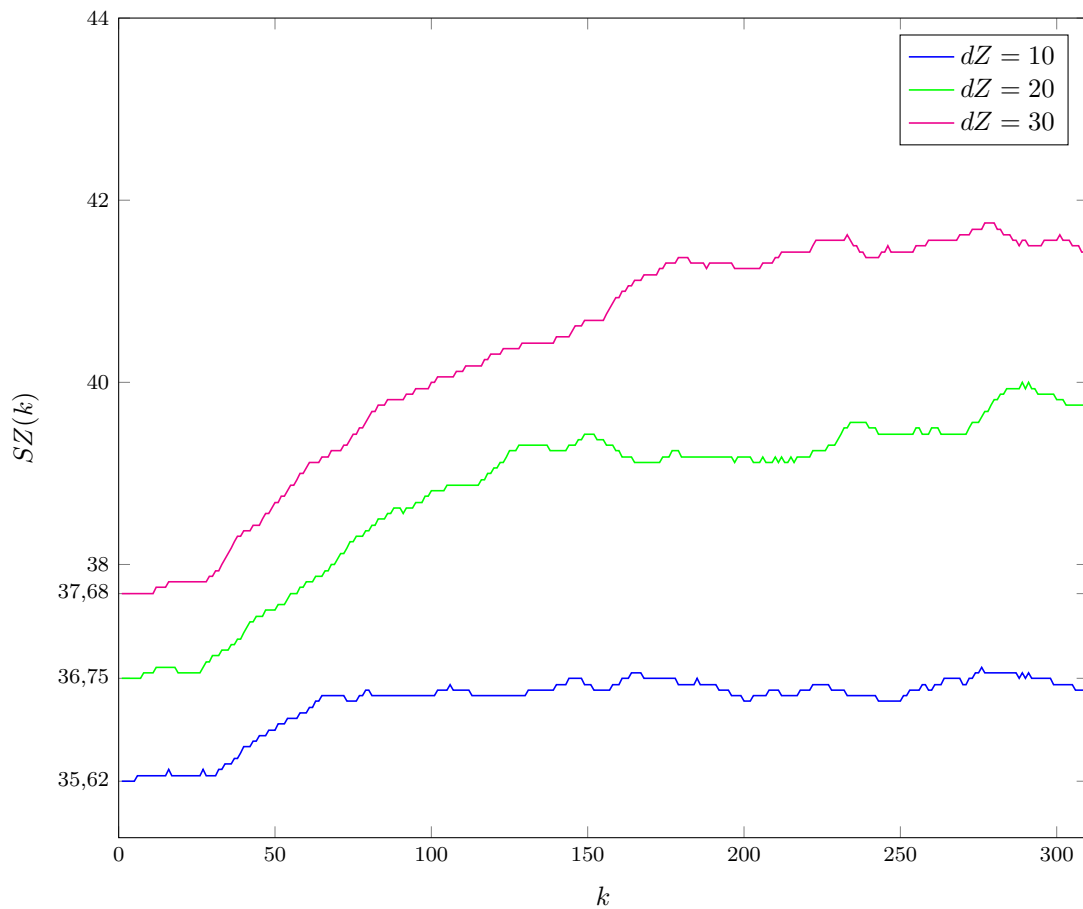
Pierwszym poleceniem było określenie wartości wyjścia obiektu Y_{pp} (pomiaru $T1$) w punkcie pracy $U_{pp} = 36$. Osiągnęliśmy ją ustawiając wartość sterowania (moc grzania grzałki $G1$) na U_{pp} i odczekując znaczną ilość czasu (powyżej 5 minut). Z powodu narastającej temperatury w ciągu zajęć, znaczącej cyrkulacji powietrza wynikającej z wentylacji nad stanowiskiem oraz przejścia do innego pomieszczenia, punkt pracy zmieniał się w czasie trwania zajęć z 35,5, aż do około 38,5. Mając na uwadze całkujące właściwości algorytmu DMC , ostatecznie przyjęliśmy wartość $Y_{pp} = 37,68$, którą udokumentowaliśmy w dalszej części sprawozdania.

3. Zadanie 2: Odpowiedzi skokowe

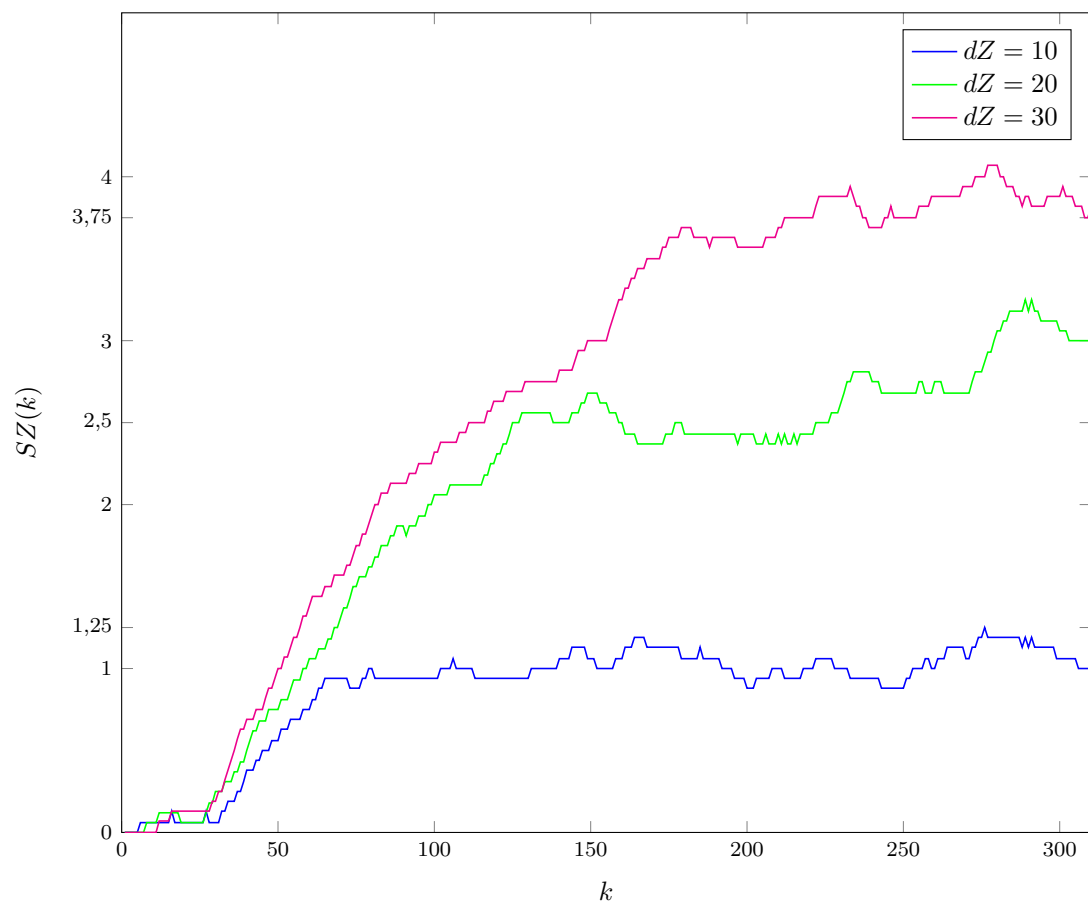
Kolejnym zadaniem było zmierzenie kilku odpowiedzi skokowych obiektu dla skoków rozpoczynających się z punktu pracy. Odpowiedź skokowa dla toru sterowanie-wyjście znajdują się na rysunku 3.1. Jest ona wynikiem naszej pracy w trakcie trwania laboratorium nr 1. Pierwszym aspektem wartym zauważenia jest inny punkt pracy, będący wynikiem innej temperatury w laboratorium podczas poprzednich zajęć. Dla przedstawionych odpowiedzi skok sterowania następował w chwili $k = 10$, co oznacza, że dopiero od $k = 11$ wykresy przedstawiają właściwe odpowiedzi skokowe. Trudności sprawiło nam określenie, czy właściwości statyczne posiadanego obiektu są liniowe. Biorąc dosłownie końcowe wartości wyjścia dla różnych odpowiedzi skokowych należałoby stwierdzić, że nie są. Pamiętając jednak, że w okolicy obiektu występowały nieuchronne zakłócenia, można zauważyć pewne prawidłowości. Przy skoku sterowania o 5% temperatura podniosła się o około 2 stopnie, a przy skoku o 15% o około 6 stopni. Jak można zauważyć, wyjście wzrosło trzykrotnie przy trzykrotnie większym skoku, więc zachowało się liniowo. Gdyby założyć, że przy skoku o 10% nastąpiły większe zakłócenia niż przy innych i zamiast 40 stopni wyjście osiągnęłoby wartość około 40,5 stopni, to można by stwierdzić, że charakterystyka statyczna obiektu jest w przybliżeniu liniowa, a jej wzmocnienie statyczne wynosi około $2/5 = 0,4$.

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

Następnie zebraliśmy odpowiedź skokową dla toru zakłócenia-wyjście (wykres 3.2). Jak widać na rysunku, punktu pracy zmieniał się trakcie trwania laboratorium - z tego powodu zebrane odpowiedzi skokowe posiadają różny początek. Najładniejszy przebieg - dla 37,68 - wykorzystaliśmy do *DMC*. Na wykresie 3.3 został przedstawiony przebieg tych samych prostych przesunięty o własny punkt pracy do 0. Na podstawie posiadanych przebiegów, nie można stwierdzić liniowości charakterystyki statycznej - różnice wartości końcowych między kolejnymi skokami nie są sobie równe. Jednak, zakładając wystąpienie znacznych zakłóceń w trakcie zbierania odpowiedzi dla $dZ = 20$ od chwili 260 (dla tej chwili widoczny jest na wykresie gwałtowny wzrost wartości odpowiedzi), stwierdzamy, że właściwości mogą być statyczne. Pomijając zakłócenia, różnica pomiędzy wartościami końcowych przebiegów mogłaby wynosić około 1,25. Wzmocnienie statyczne wynosiłoby zatem 0,125.



Rys. 3.2. Wykresy $SZ(k)$ dla różnych skoków zakłócenia dZ

Rys. 3.3. Przesunięte wykresy $SZ(k)$ do wspólnego punktu startowego, dla różnych skoków zakłócenia dZ

4. Zadanie 3: Znormalizowana odpowiedź skokowa

Kolejnym poleceniem było wyznaczyć znormalizowaną odpowiedź skokową (taką jaką wymagana jest do algorytmu DMC) i zaproksymować ją, 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). Człon jest opisany wzorami powstałymi po przekształceniu jego transmitancji:

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

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

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

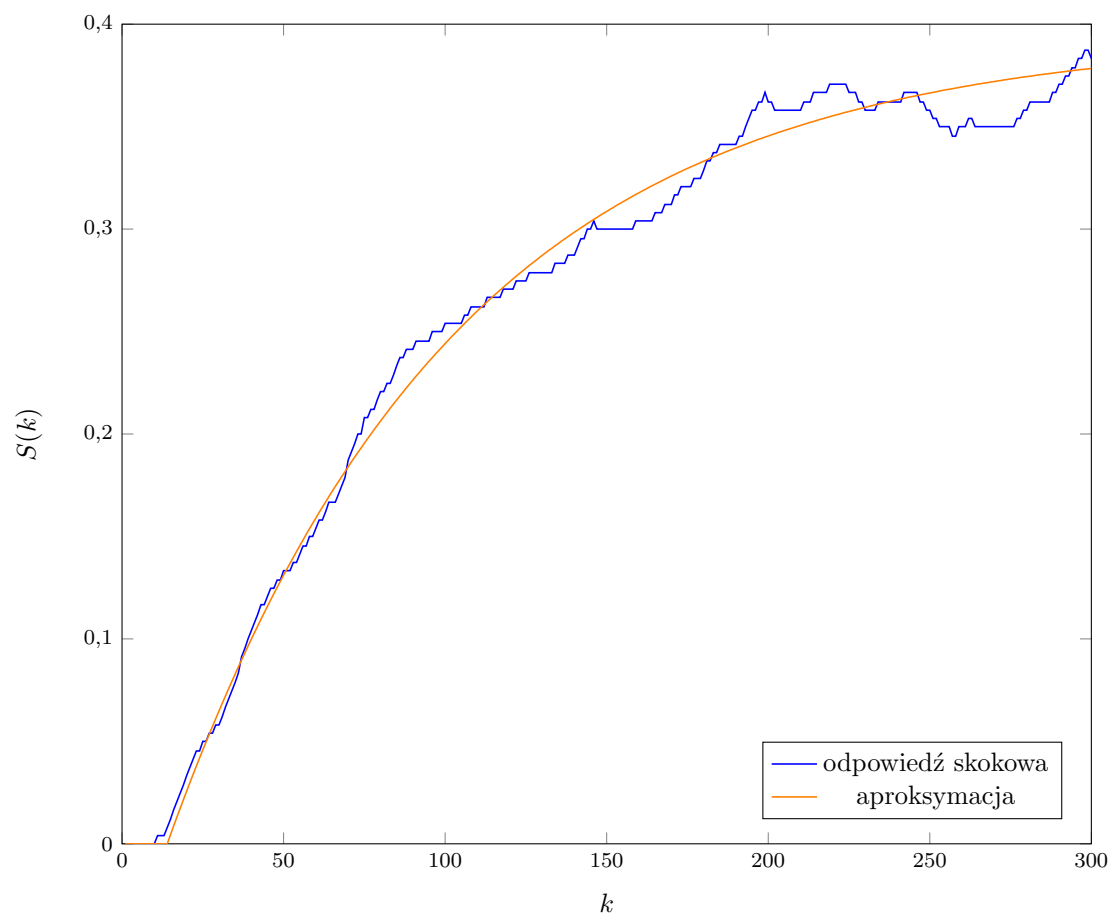
$$a_2 = \alpha_1 \alpha_2 \quad (4.4)$$

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

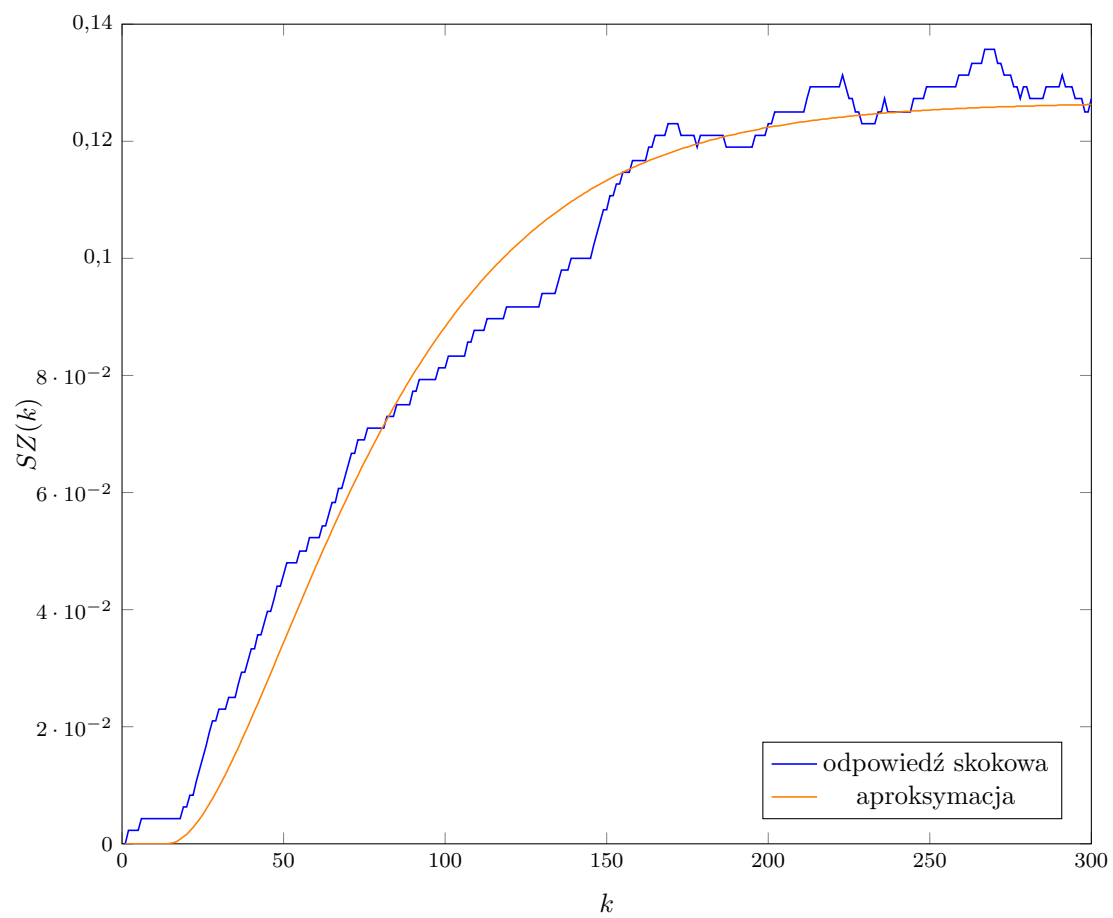
$$b_2 = \frac{K_p}{T_1 - T_2} [\alpha_1 T_2(1 - \alpha_2) - \alpha_2 T_1(1 - \alpha_1)] \quad (4.6)$$

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

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 przez tyle czasu przy skoku o 15 wartości odpowiedzi skokowej nie wzrastają powyżej 0. 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 toru sterowanie-wyjście do znormalizowania wybraliśmy tę dla skoku o 15, a dla toru zakłócenie-wyjście tę dla skoku o 30. W wyniku normalizacji przekształciliśmy je do odpowiedzi, jakie otrzymalibyśmy po skoku jednostkowym. Następnie, po wykonaniu aproksymacji, uzyskaliśmy parametry członu równe $T_1 = 89,0864$, $T_2 = 0,00031814$, $K_p = 0,39431$ i $TD = 14$, przy błędzie optymalizacji $e = 0,040621$ dla toru sterowanie-wyjście oraz $T_1 = 40,0697$, $T_2 = 30,9178$, $K_p = 0,1266$ i $TD = 14$ przy błędzie optymalizacji $e = 0,012445$ dla toru zakłócenie-wyjście. Znormalizowane odpowiedzi i ich aproksymację przedstawiliśmy na wykresach 4.1 i 4.2.



Rys. 4.1. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji toru sterowanie-wyjście



Rys. 4.2. Wykres znormalizowanej odpowiedzi skokowej i jej aproksymacji toru zakłócenie-wyjście

5. Zadanie 4: Algorytm DMC

5.1. Analityczny algorytm DMC

Do obliczeń wykorzystujemy następujące wzory:

$$\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} Y^{\text{zad}}(k) \\ \vdots \\ Y^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (5.2)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k + N_u - 1|k) \end{bmatrix}_{N_u \times 1} \quad (5.3)$$

$$\Delta \mathbf{U}^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k - (D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times 1} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{N \times N_u} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{M}^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \dots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix}_{N \times D-1} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{Y}^0(k) = \mathbf{Y}(k) + \mathbf{M}^P \Delta \mathbf{U}^P(k) \quad (5.7)$$

$$\mathbf{K} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda * \mathbf{I})^{-1} \mathbf{M}^T \quad (5.8)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \mathbf{K}(\mathbf{Y}^{\text{zad}}(k) - \mathbf{Y}^0(k)) \quad (5.9)$$

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:

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - k_u \Delta \mathbf{U}^P \quad (5.10)$$

gdzie:

$$e(k) = Y^{zad}(k) - Y(k) \quad (5.11)$$

$$k_e = \sum_{i=1}^N K(1, i) \quad (5.12)$$

$$k_u = kM^P \quad (5.13)$$

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

5.2. Dobieranie nastaw analitycznego regulatora DMC

Regulator *DMC* korzysta z odpowiedzi skokowej s uzyskanej w punkcie 3. Nastawy regulatora *DMC* zostały dobrane eksperymentalnie. Poniżej przedstawiamy nasz tok rozumowania podczas doboru każdego parametru.

Obserwując obiekt doszliśmy do wniosku, że jego horyzont dynamiki jest równy $D = 300$. Taką również przyjęliśmy wartość początkową N , N_u zainicjowaliśmy pierwotną wartością $N_u = 100$, natomiast λ na początku jest równe $\lambda = 1$.

5.2.1. Horyzont predykcji N

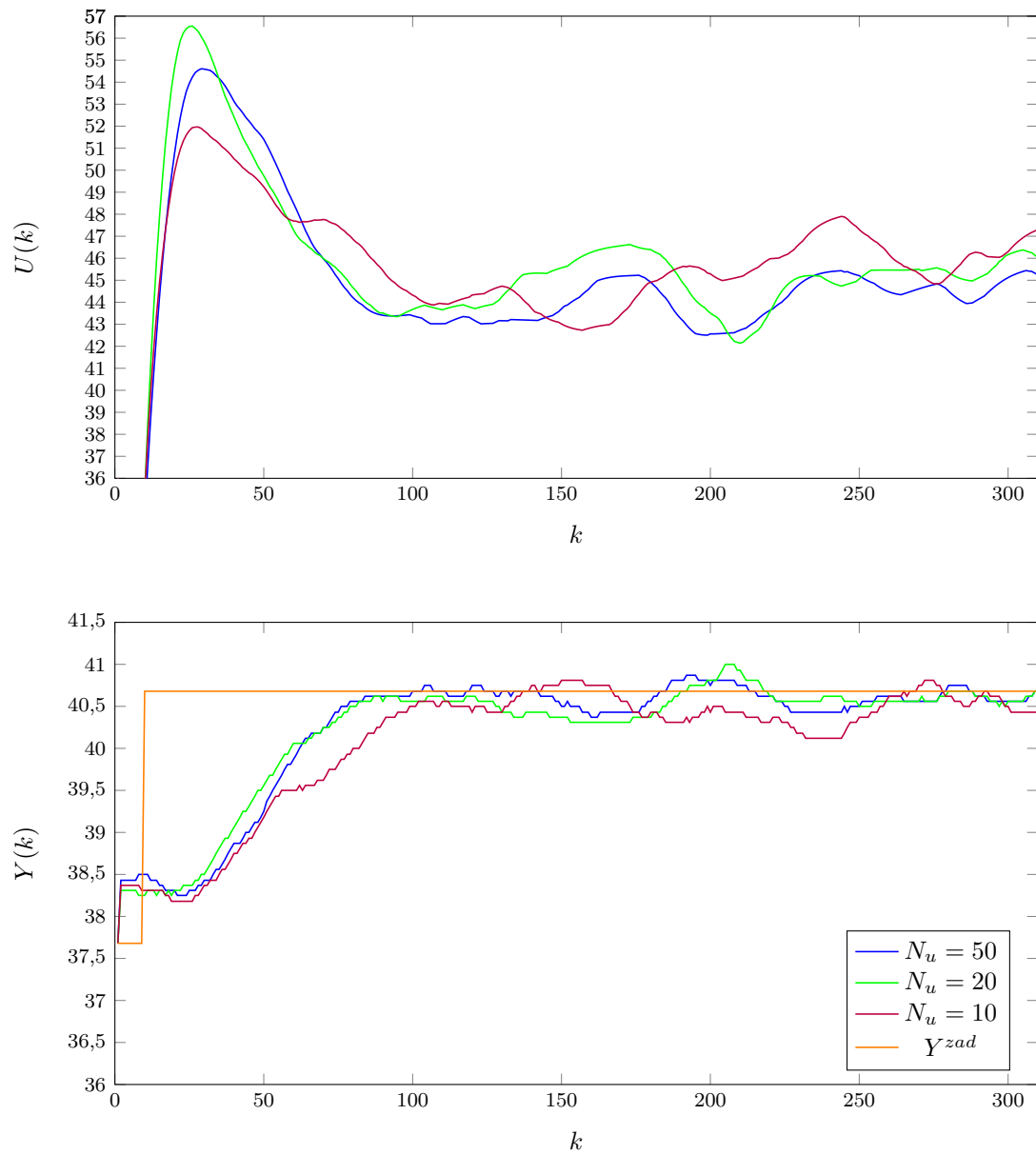
Sugerując się ograniczonym czasem trwania laboratorium, oraz wiedzą teoretyczną jak i doświadczeniami z układem sterowania (obiektem grzewczym) w laboratorium, z których wynika, że zmniejszanie parametru N skutkuje minimalnymi różnicami w jakości regulacji, postanowiliśmy nie zmieniać wartości horyzontu predykcji. Jego wielkość wpływa znacząco na złożoność obliczeniową, a ta, w obiekcie tak powolnym jak stanowisko grzewcze z okresem $T_p = 1s$, nie ma krytycznego znaczenia.

Tak więc $N = 300$.

5.2.2. Horyzont sterowania N_u

Następnie dobraliśmy parametr N_u : po wykonaniu szeregu testów, wskaźnik jakości regulacji był najkorzystniejszy dla wartości 20, natomiast sterowanie, na tle pozostałych pomiarów, niewiele ostrzejsze. Wskaźnik regulacji E dla tych nastaw :

- $N_u = 50$: $E = 207,7379$
- $N_u = 20$: $E = 190,5666$
- $N_u = 10$: $E = 256,8455$

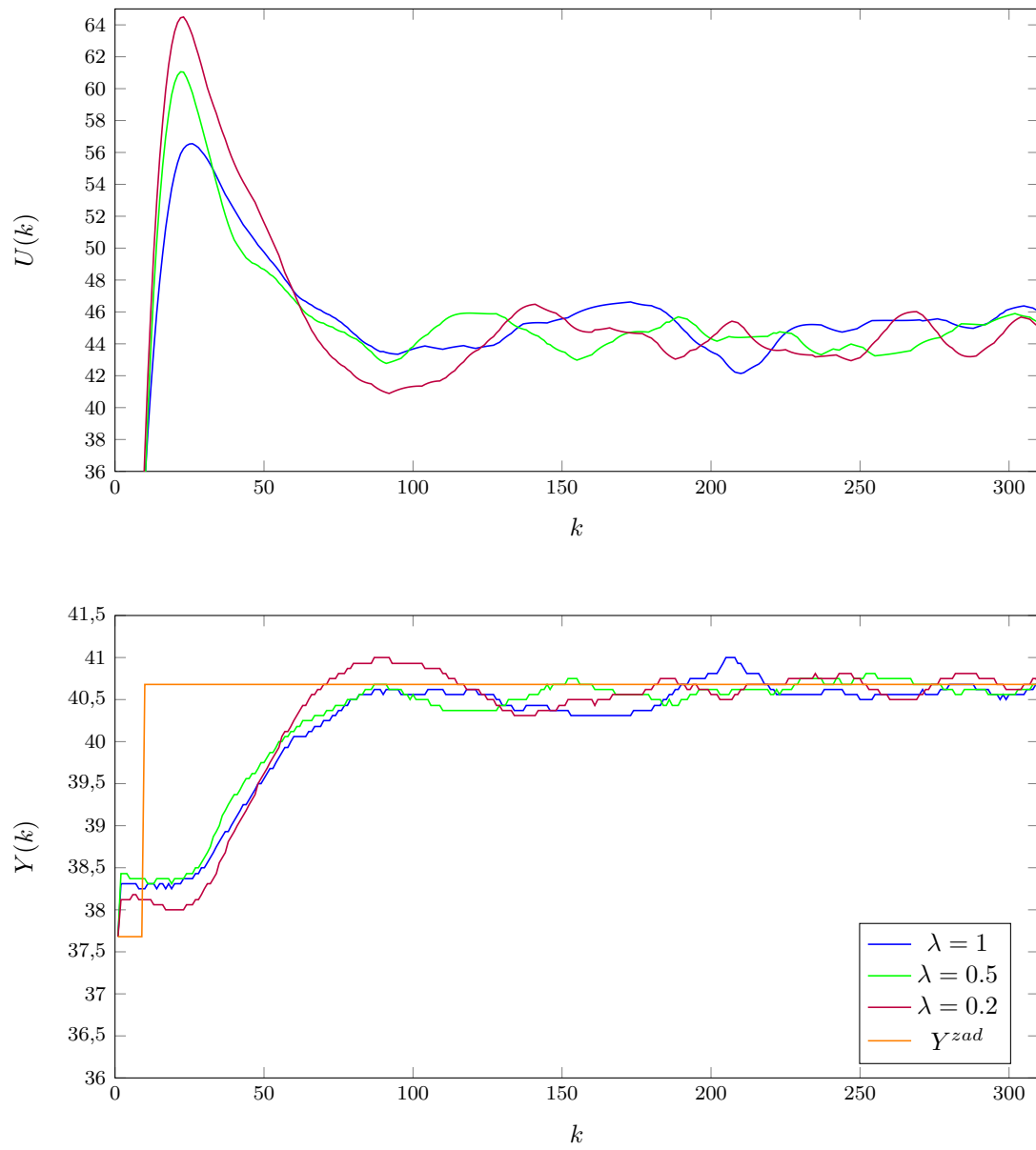
Rys. 5.1. Dobór parametru N_u

5.2.3. Parametr λ

Zmniejszając λ , uzyskujemy drastyczną poprawę jakości regulacji, jednakże kosztem sterowania. Choć aproksymowany obiekt, stanowisko grzewcze, nie ma podatnych na uszkodzenia elementów wykonawczych, to bardzo ostre skoki sterowania z pewnością nie wpływają korzystnie na żywotność obiektu. Bazując na tym wniosku, jak i na spostrzeżeniu, że dla wartości $\lambda = 0,2$ obiekt wpada w oscylacje i jakość regulacji się pogarsza, postanowiliśmy przyjąć wartość $\lambda = 0,5$.

Wskaźnik jakości regulacji E :

- $\lambda = 1$: $E = 190,5666$
- $\lambda = 0,5$: $E = 164,4191$
- $\lambda = 0,2$: $E = 220,9310$

Rys. 5.2. Dobór parametru λ

6. Zadanie 5: Regulacja obiektu z uwzględnieniem wpływu zakłóceń

6.1. Zmiany w stosunku do podstawowej wersji regulatora analitycznego

Uwzględnienie zakłóceń w regulatorze *DMC* wymaga wprowadzenia kilku zmian w jego algorytmie.

Konieczne będzie obliczenie macierzy M^{zP} , danej wzorem:

$$M^{zP} = \begin{bmatrix} sz_1 & sz_2 - sz_1 & sz_3 - sz_2 & \dots & sz_{D_z} - sz_{D_z-1} \\ sz_2 & sz_3 - sz_1 & sz_4 - sz_2 & \dots & sz_{D_z+1} - sz_{D_z-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ sz_N & sz_{N+1} - sz_1 & sz_{N+2} - sz_2 & \dots & sz_{N+D_z-1} - sz_{D_z-1} \end{bmatrix}_{N \times D_z} \quad (6.1)$$

Macierz ta posłuży nam do wyznaczenia wektora k_z :

$$k_z = k M^{zP} \quad (6.2)$$

Uwzględnienie zakłóceń w algorytmie zmienia sposób obliczania $\Delta u(k|k)$ - we wzorze zawarta jest teraz obliczoną powyżej wartość k_z :

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - k_u \Delta U^P - k_z \Delta Z^P \quad (6.3)$$

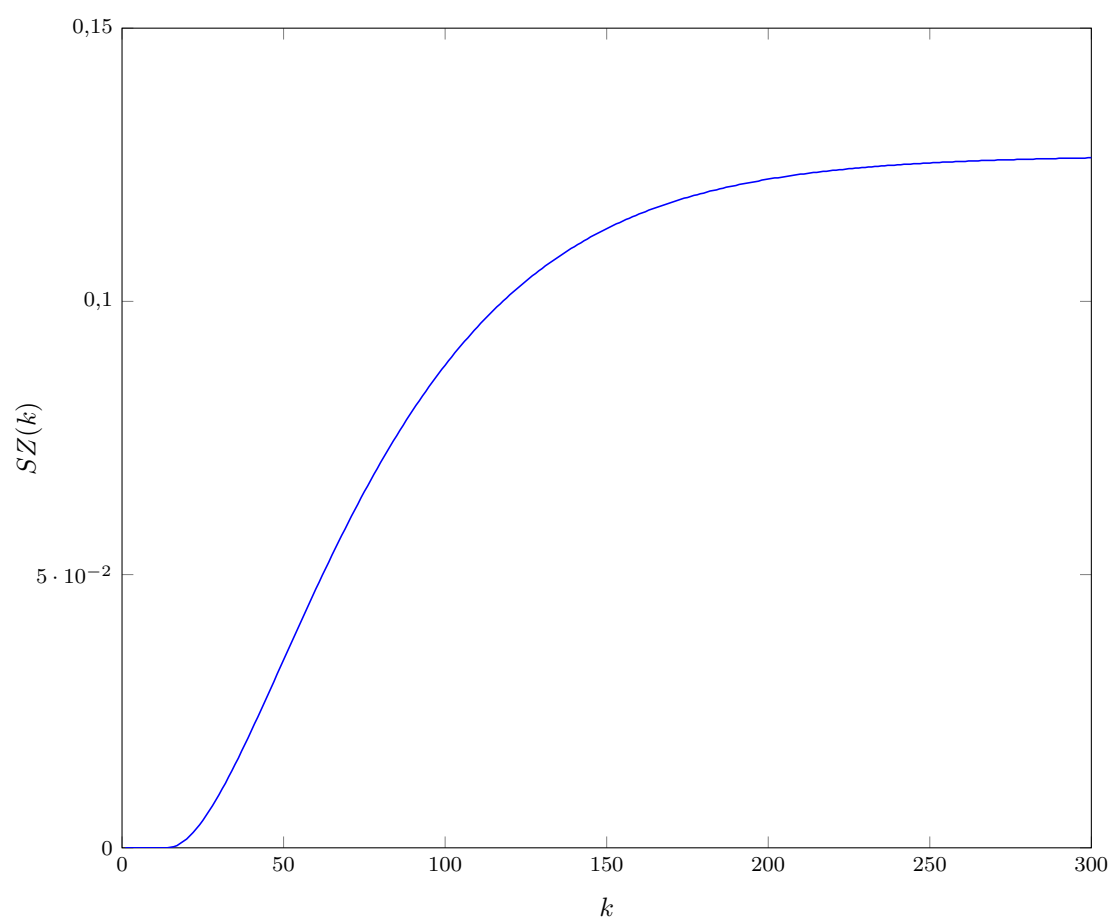
Powyższa zmiana wynika bezpośrednio ze zmiany w obliczaniu Y^0 :

$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) + M^{zP} \Delta Z^P(k) \quad (6.4)$$

6.2. Dobór parametru Dz

Wartość parametru Dz regulatora *DMC* odczytaliśmy z wykresu aproksymowanej odpowiedzi skokowej toru zakłócenie-wyjscie procesu:

Widać na nim, że wartość funkcji aproksymującej dla $k > 250$ zmienia się w sposób nieznaczny. Z tego powodu przyjęliśmy wartość horyzontu dynamiki $Dz = 250$.



Rys. 6.1. Aproxymowana odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście

6.3. Porównanie jakości regulacji z i bez uwzględnienia zakłóceń

Regulator *DMC* korzysta z aproksymowanych odpowiedzi skokowych s i sz uzyskanych w punkcie 3.

Wykres 6.2 przedstawia przebiegi wejścia i wyjścia obiektu sterowanego przy pomocy regulatora *DMC* w wersji z kolejno nieuwzględnieniem $(U(k), Y(k))$ i uwzględnieniem $(Uz(k), Yz(k))$ mierzonych zakłóceń.

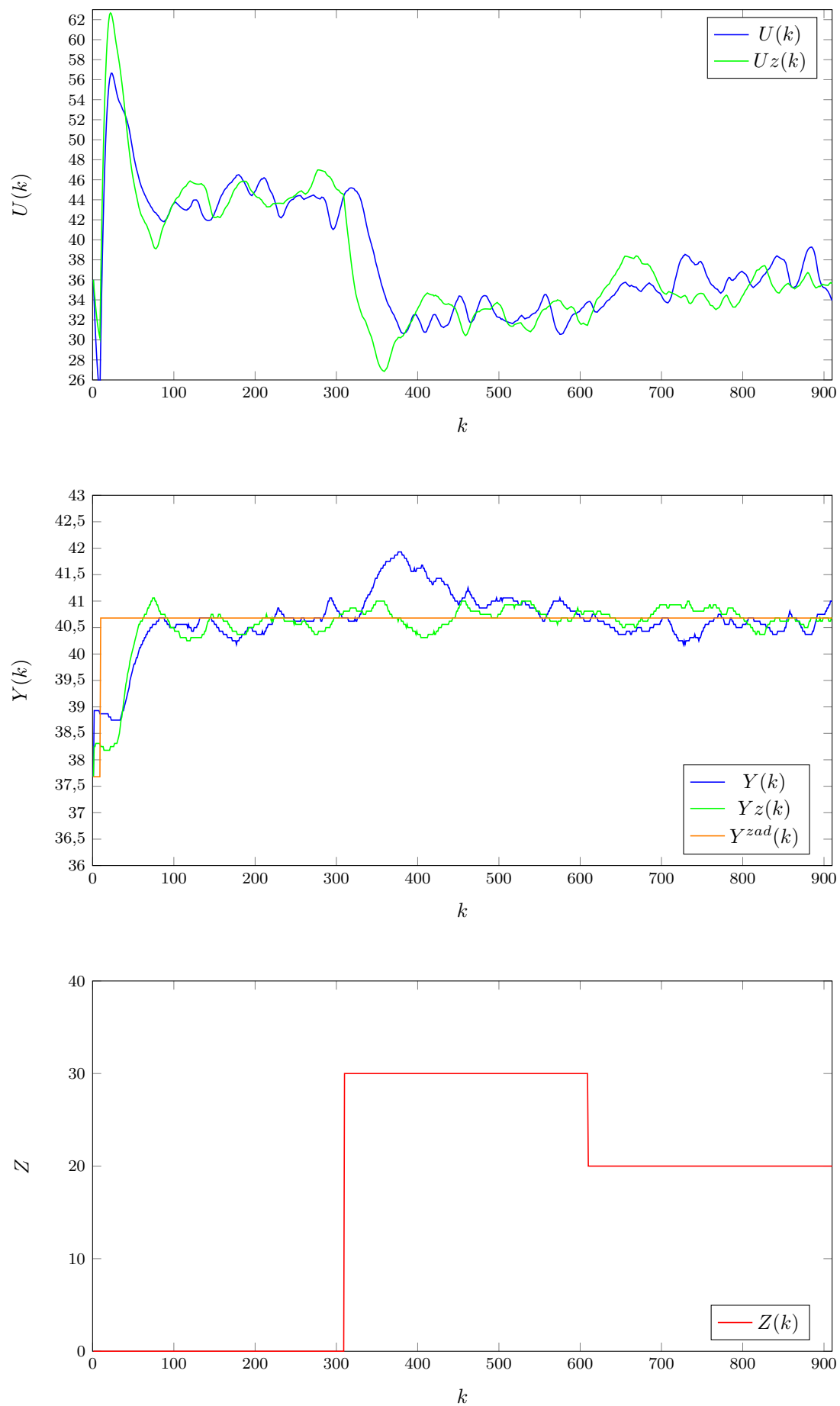
Widać znaczącą poprawę sterowania, gdy zakłócenia są uwzględniane w algorytmie *DMC*. Wizualnie oceniając przebiegi, w okresach następujących po zmianie sygnału zakłócenia, dla algorytmu, który nie uwzględnia zakłóceń, widoczne są duże przeregulowania, których brak w wersji uwzględniającej te zakłócenia.

Potwierdzają to poniższe wartości błędów:

Wskaźnik regulacji, gdy zakłócenia nie są brane pod uwagę: $E = 260,5226$

Wskaźnik regulacji, gdy zakłócenia są brane pod uwagę: $E = 202,2884$

Stąd wniosek, że gdy jest to możliwe, należy stosować wersję regulatora uwzględniającą zakłócenia.



Rys. 6.2. Porównanie regulacji z i bez uwzględniania zakłóceń w algorytmie sterowania