

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego  
nr 1, zadanie nr 1

Stanislau Stankevich, Rafał Bednarz, Ostrysz Jakub

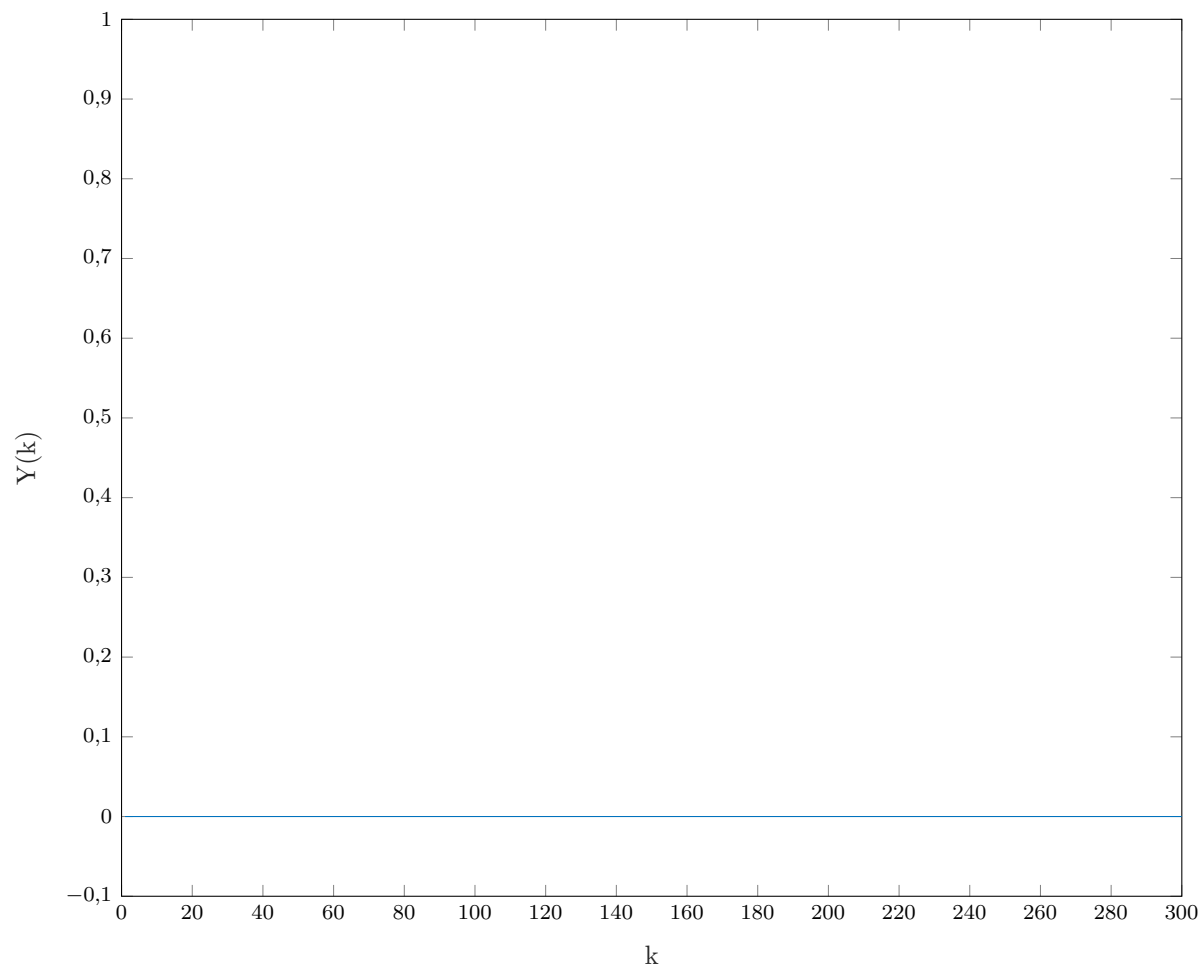
Warszawa, 2021

# Spis treści

<b>1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>2. Odpowiedzi skokowe . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1. Opowiedzi skokowe toru U-Y . . . . .	3
2.2. Opowiedzi skokowe toru Z-Y . . . . .	4
2.3. Charakterystyka statyczna . . . . .	4
2.4. Wzmocnienia statyczne . . . . .	5
<b>3. Odpowiedzi skokowe dla DMC . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>4. Algorytm DMC . . . . .</b>	<b>8</b>
4.1. Strojenie regulatora . . . . .	8
4.2. Wyniki strojenia . . . . .	9
4.3. Wnioski . . . . .	13
<b>5. Regulacja z skokowym zakłóceniem . . . . .</b>	<b>15</b>
5.1. Bez pomiaru zakłócenia . . . . .	15
5.2. Z pomiaru zakłócenia . . . . .	16
5.3. Wnioski . . . . .	17
<b>6. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym . . . . .</b>	<b>18</b>
6.1. Bez pomiaru zakłócenia . . . . .	18
6.2. Z pomiaru zakłócenia . . . . .	19
6.3. Wnioski . . . . .	20
<b>7. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym . . . . .</b>	<b>21</b>
7.1. Szum nałożony na zakłócenie skokowe . . . . .	21
7.2. Szum nałożony na zakłócenie sinusoidalne . . . . .	24
7.3. Wnioski . . . . .	27
<b>8. Laboratorium . . . . .</b>	<b>28</b>
8.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy . . . . .	28
8.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych . . . . .	28
8.3. Przekształcenie i aproksymacja odpowiedzi skokowej . . . . .	30
8.4. DMC . . . . .	32
8.5. Dobór parametru $D^z$ . . . . .	37

## 1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości

Żeby sprawdzić poprawność podanych wartości podajemy na wejście sterowanie  $u = 0$  oraz zakłócenie  $z = 0$  i patrzymy na jakiej wartości się ustali  $y$ .



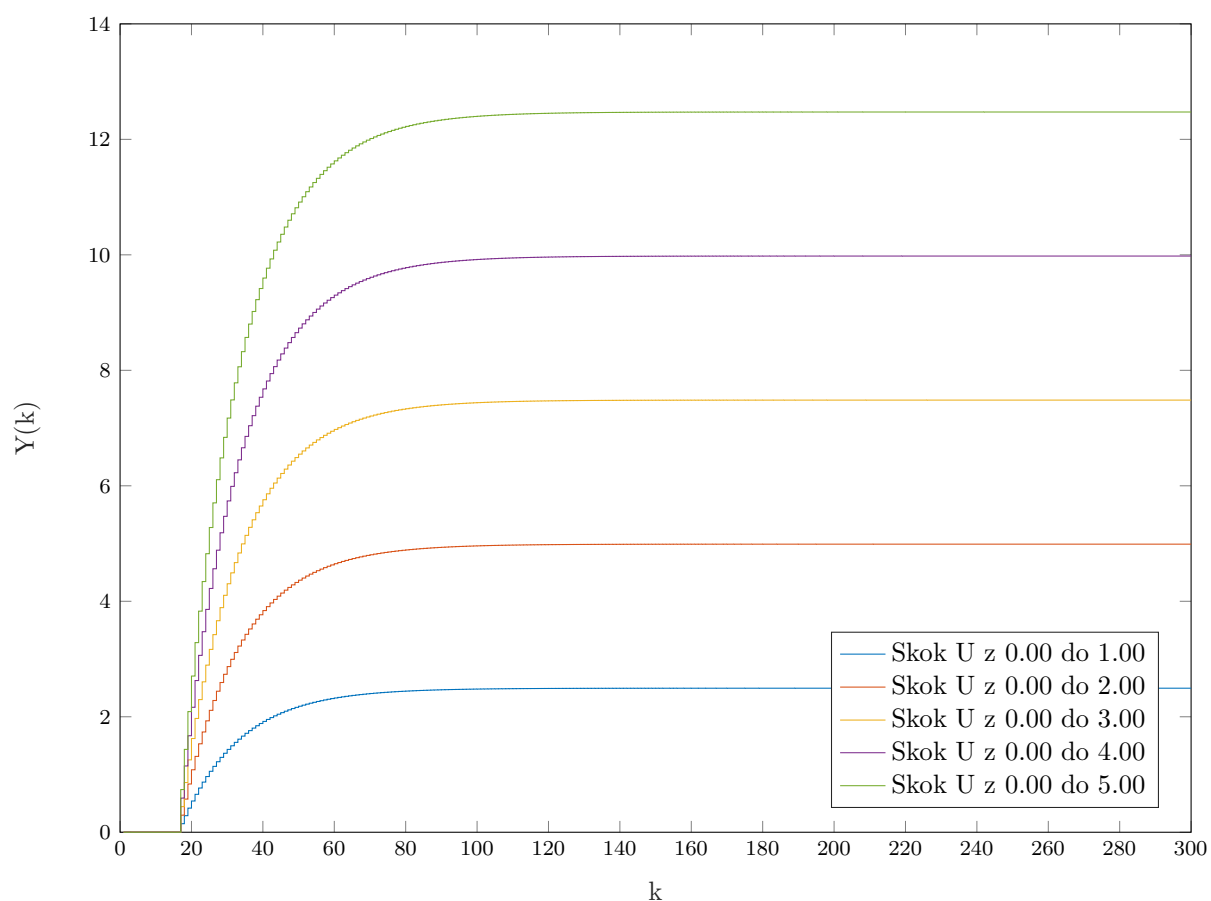
Rys. 1.1. Przebieg wyjścia obiektu przy stałym wejściu i zakłóceniu:  $u = z = 0$

Jak możemy obserwować wyjście się ustala na poprawnej wartości, czyli na 0.

## 2. Odpowiedzi skokowe

Rozważamy 5 różnych wartości skoku: 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0.

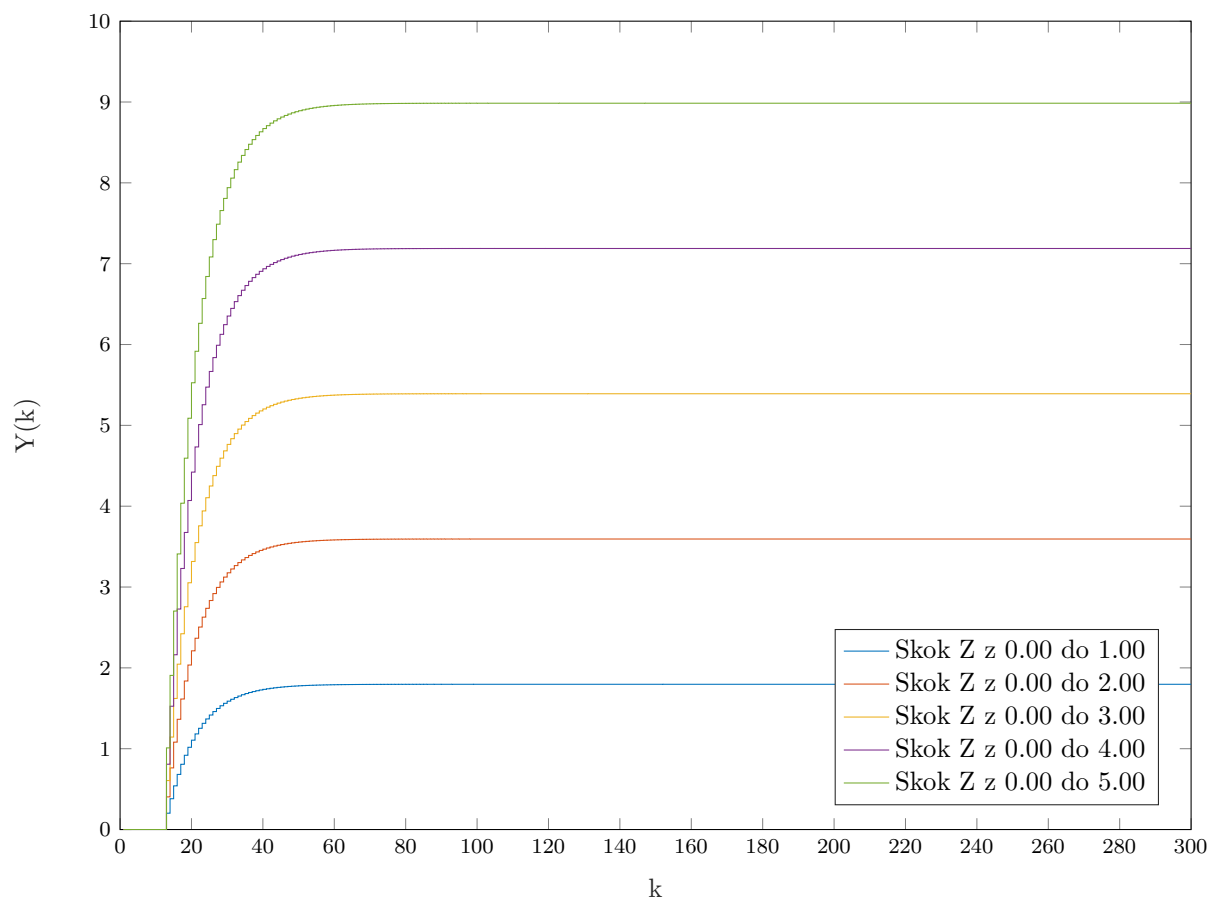
### 2.1. Odpowiedzi skokowe toru U-Y



Rys. 2.1. Wykresy odpowiedzi skokowych toru U-Y

Jak widać wartość skoku na wyjściu jest proporcjonalna wartości skoku wejścia.

## 2.2. Odpowiedzi skokowe toru Z-Y

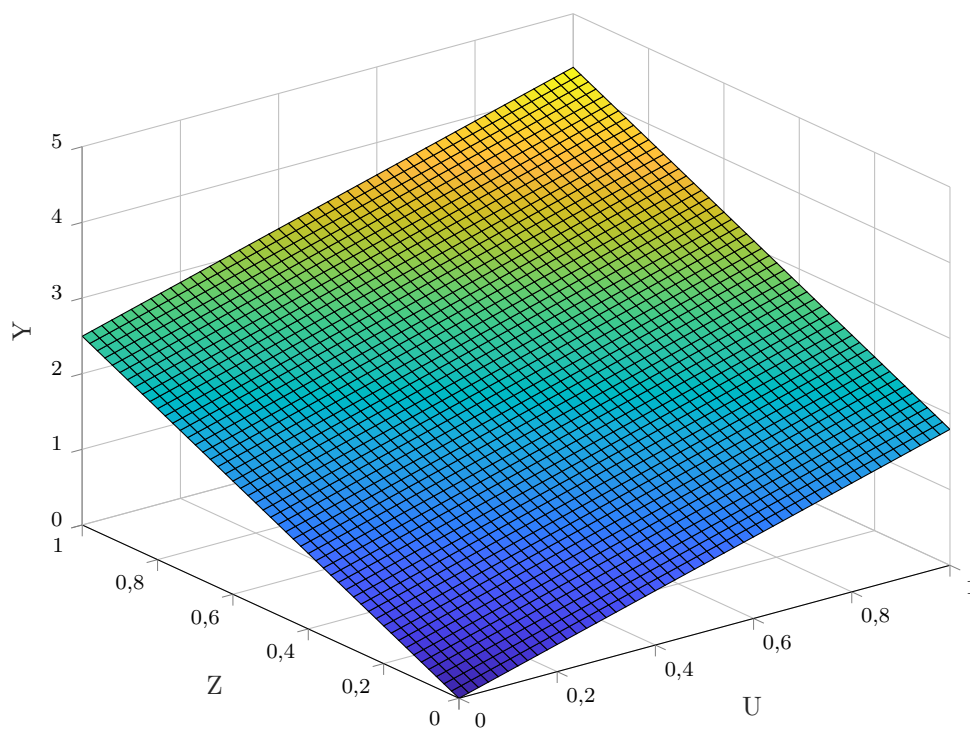


Rys. 2.2. Wykresy odpowiedzi skokowych

Jak i w przypadku toru U-Y tutaj widzimy proporcjonalność.

## 2.3. Charakterystyka statyczna

Otrzymana charakterystyka statyczna z rozdzielczością 50/1 (dla skoków 0,02, 0,04, 0,06 ...)

Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna  $y(u, y)$ 

## 2.4. Wzmocnienia statyczne

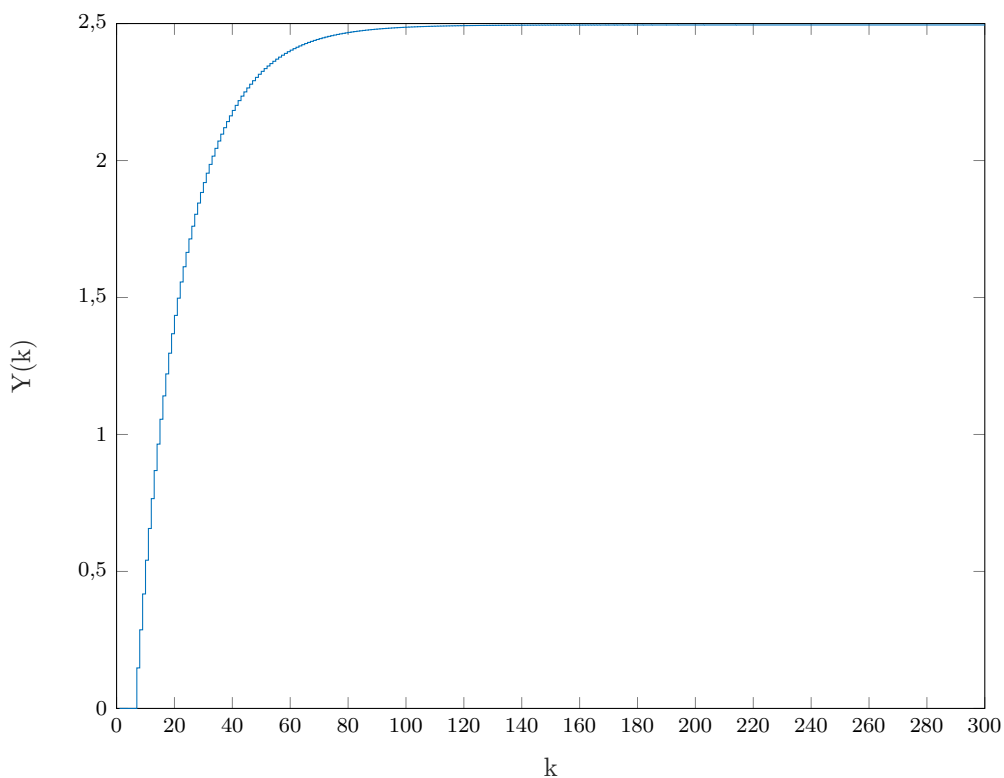
Jak widać z powyższego wykresu, charakterystyka jest prawie idealnie liniowa. Wyliczone wzmocnienia statyczne:

$$K_{U-Y}^{\text{stat}} = 2,4947 \quad (2.1)$$

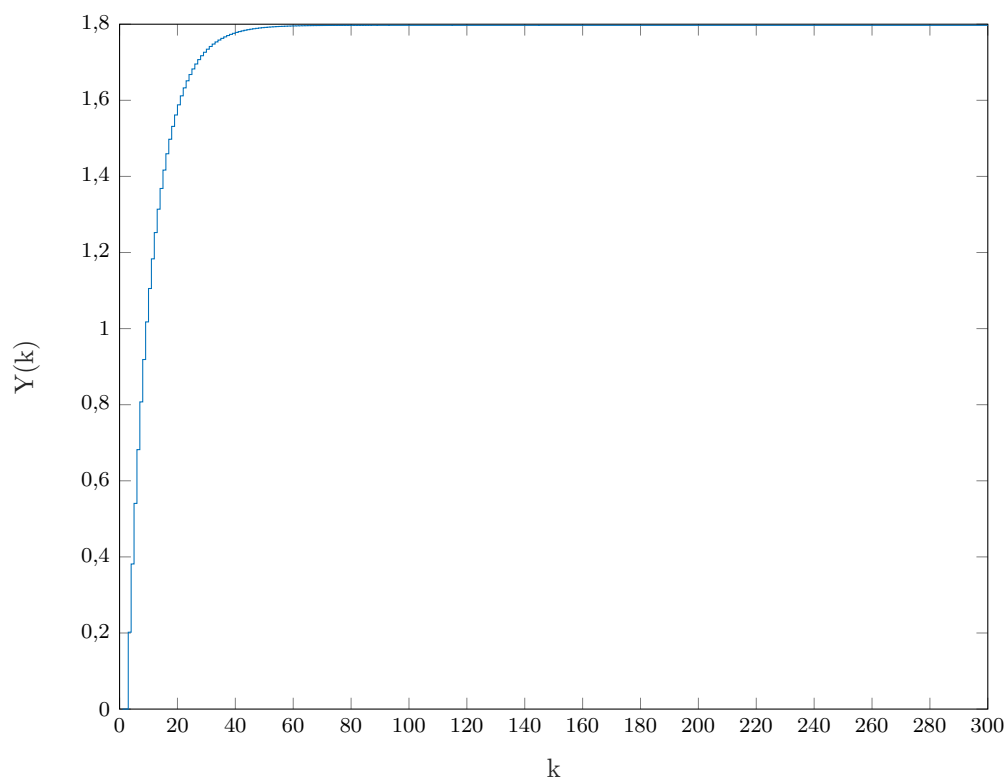
$$K_{Z-Y}^{\text{stat}} = 1,7970 \quad (2.2)$$

### 3. Odpowiedzi skokowe dla DMC

Wartość sygnałów w punkcie pracy wynosi  $U_{pp} = Y_{pp} = Z_{pp} = 0$ . Zatem wykonując skok sygnału sterującego lub zakłócenia z wartości 0 do wartości 1, mamy prawie gotową odpowiedź skokową na potrzeby algorytmu DMC. Wystarczy bowiem przysunąć wykres tak aby skok występował w chwili  $k=0$ .



Rys. 3.1. Odpowiedź skokowa toru sterowanie-wyjście



Rys. 3.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście



## 4. Algorytm DMC

Prawo regulacji DMC przedstawia się następująco:

$$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) \quad (4.1)$$

Gdzie  $\Delta U(k)$  to wektor  $N_u$  (horyzont sterowania) przyszłych wartości sterowania,  $Y^0(k)$  to przewidywana odpowiedź z modelu procesu,  $K$  - macierz policzona raz na początku ze współczynników odpowiedzi skokowej, uwzględniając wybrany współczynnik  $\lambda$  oraz horyzonty predykcji i sterowania.

W przypadku algorytmu DMC z pomiarem zakłóceń  $Y^0(k)$  oblicza się z następującego wzoru:

$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) + M^{Z^P} \Delta Z^P(k) \quad (4.2)$$

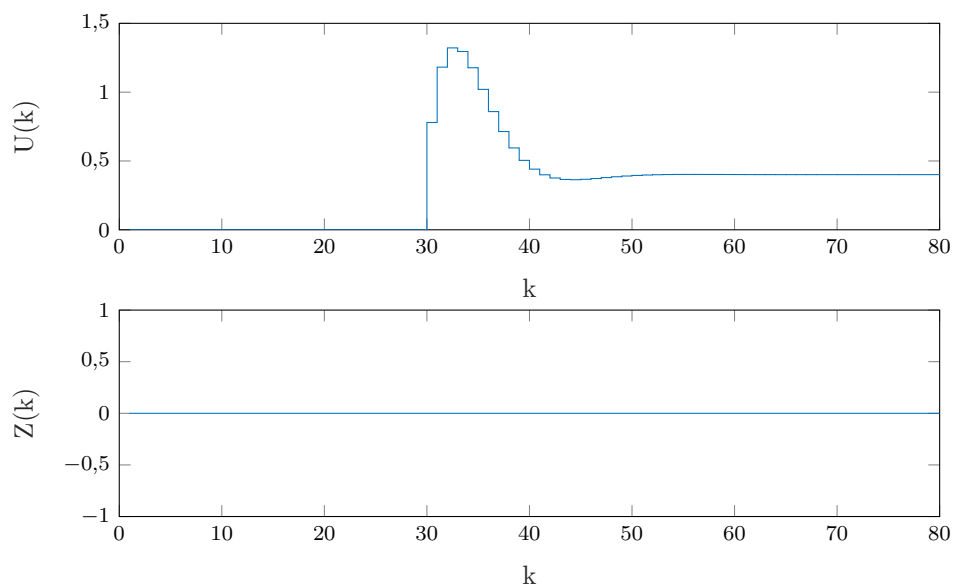
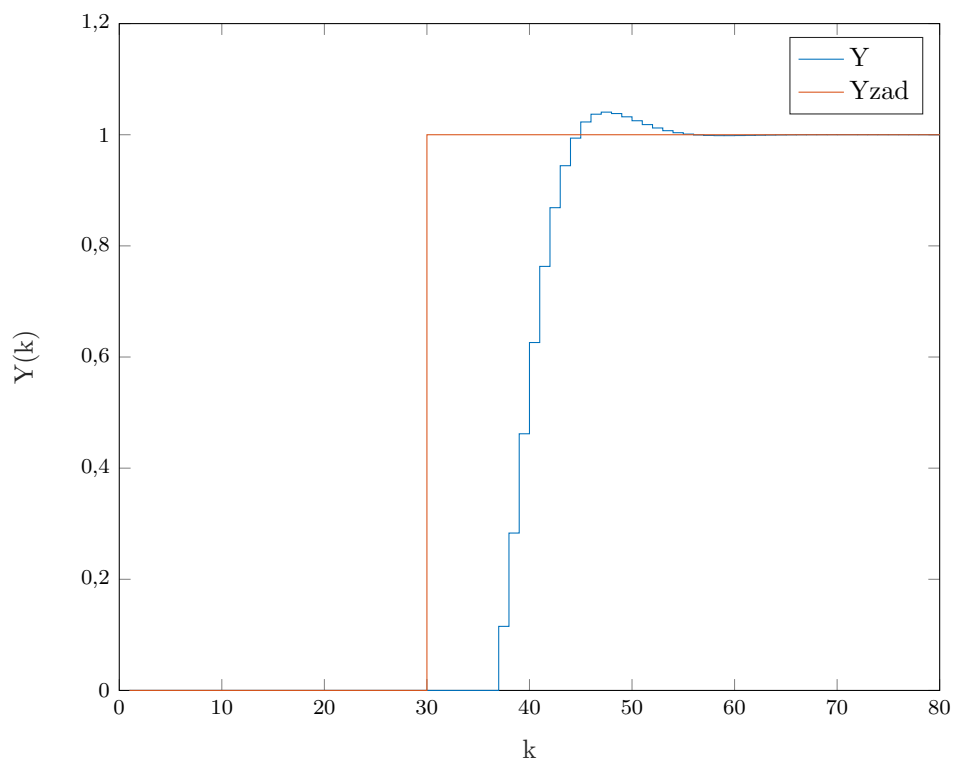
W powyższym wzorze dwa pierwsze elementy sumy odnoszą się do toru sterowanie-wyjście a ostatni element do toru zakłócenie-wyjście:  $M^{Z^P}$  macierz wyznaczana przy pomocy współczynników odpowiedzi skokowej dla zakłócenia,  $\Delta Z^P(k)$  jest wektorem przyrostów mierzanego zakłócenia.

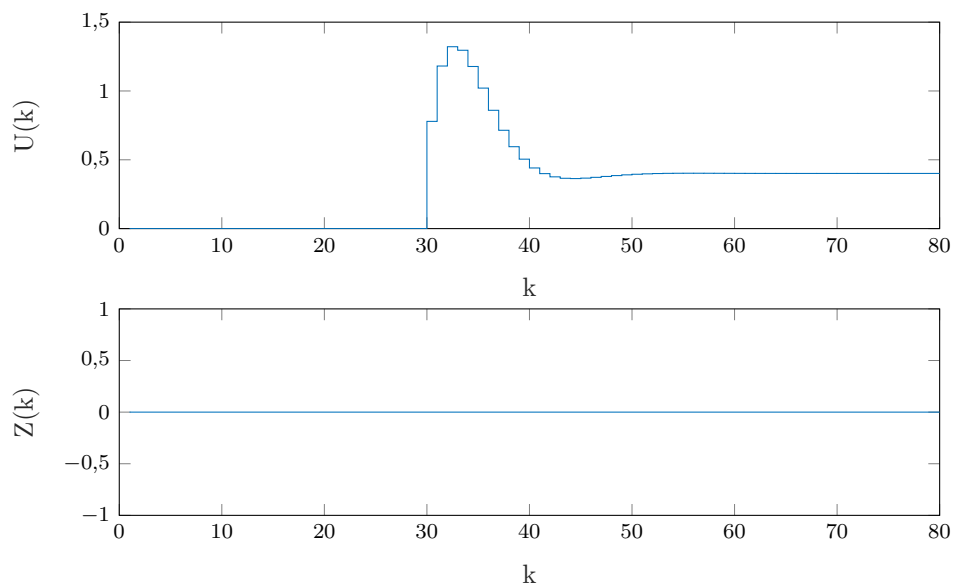
### 4.1. Strojenie regulatora

Strojenie regulatora odbywało się przy skokowej zmianie sygnału wartości zadanej z 0 do 1 (w chwili  $k=30$ ) oraz zerowym zakłóceniu.

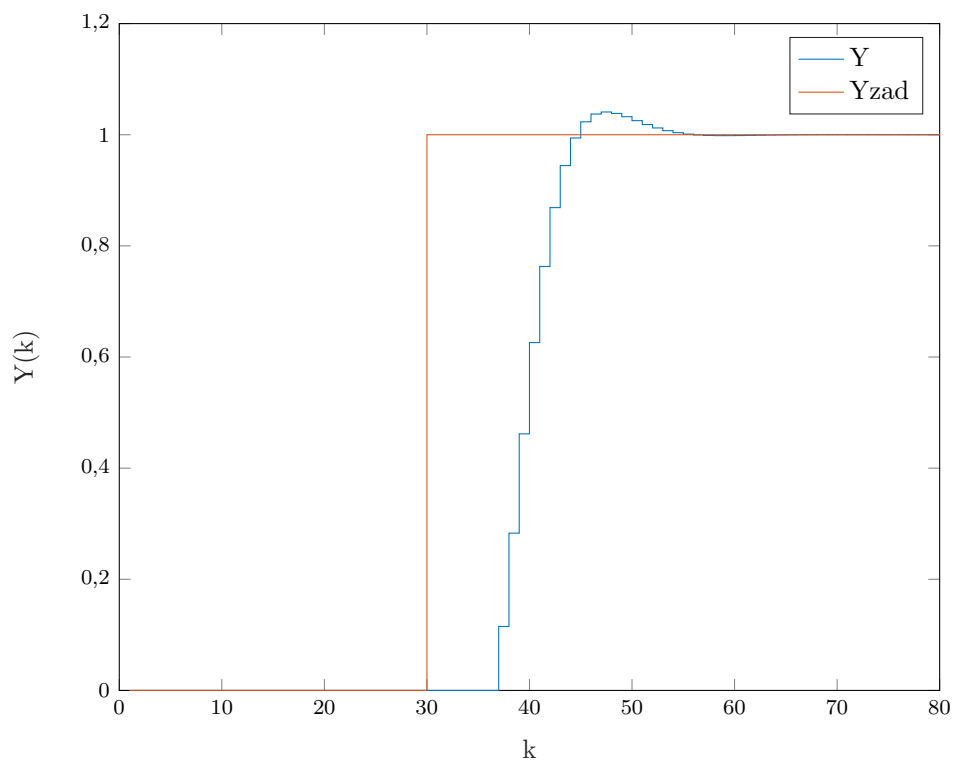
Choryzont dynamiki określono z odpowiedzi skowej toru sterowanie-wyjście ( $k$  dla którego wyjście się ustabilizowało):  $D=155$ . Kolejne parametry były modyfikowane do momentu uzyskania zadowalających efektów. Na początku przyjęto  $N = N_u = D = 155$  oraz  $\lambda = 1$ , następnie zmniejszano kolejno wartość  $N$  i  $N_u$ . Na końcu modyfikowano wartości  $\lambda$ .

## 4.2. Wyniki strojenia

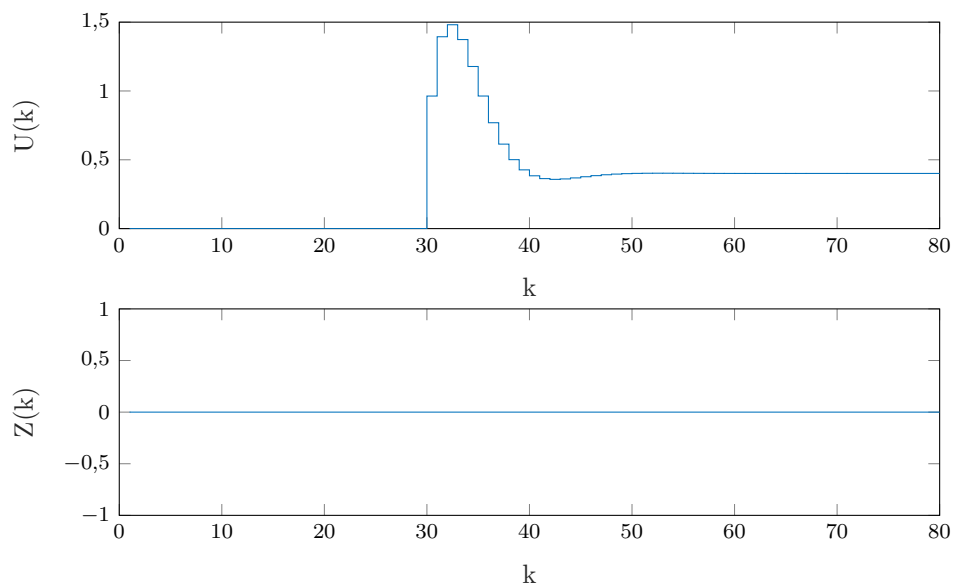
Rys. 4.1. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora:  $N = 155$   $N_u = 155$   $\lambda = 1$ Rys. 4.2. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora:  $N = 155$   $N_u = 155$   $\lambda = 1$ , błąd  $E = 8,809637$



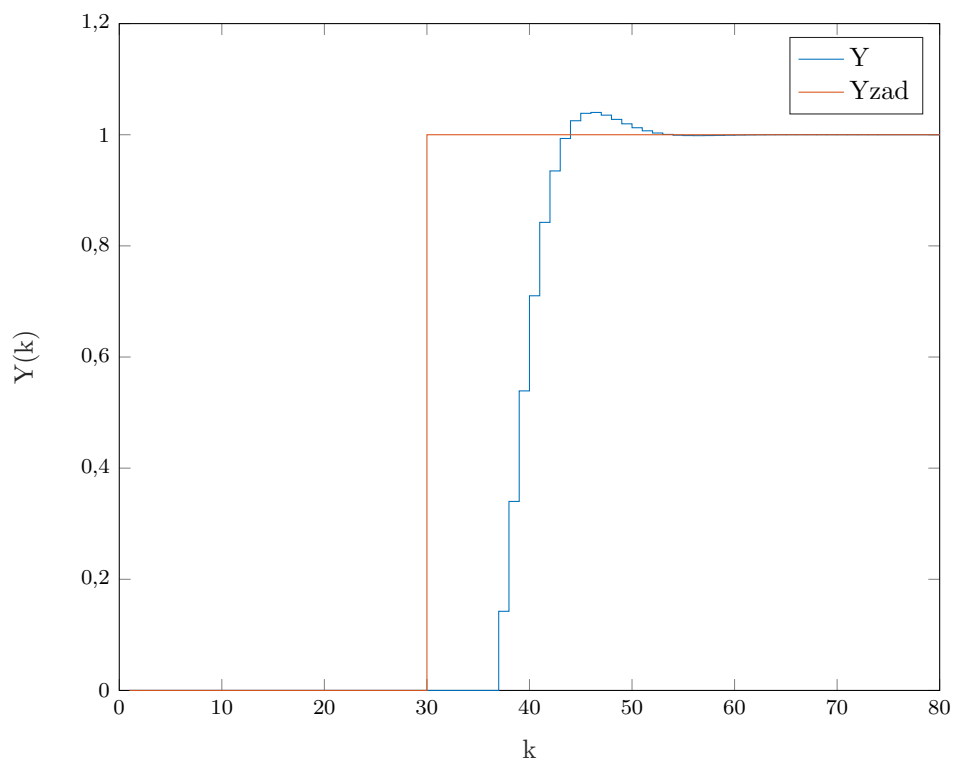
Rys. 4.3. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora:  $N = 20$   $N_u = 20$   $\lambda = 1$



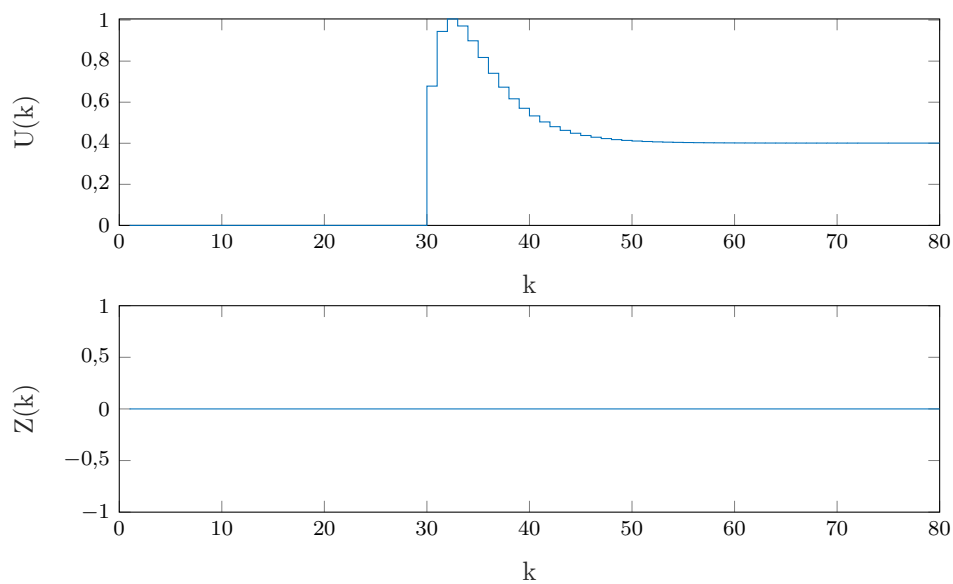
Rys. 4.4. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora:  $N = 20$   $N_u = 20$   $\lambda = 1$ , błąd  $E = 8,810337$



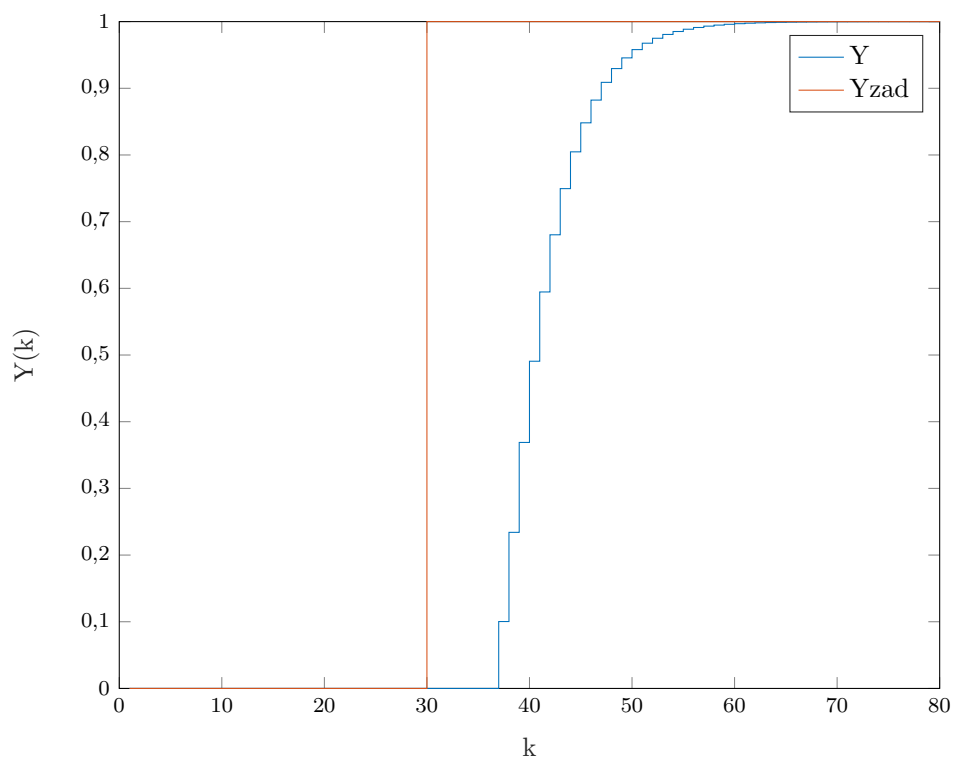
Rys. 4.5. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora:  $N = 50$   $N_u = 5$   $\lambda = 1$



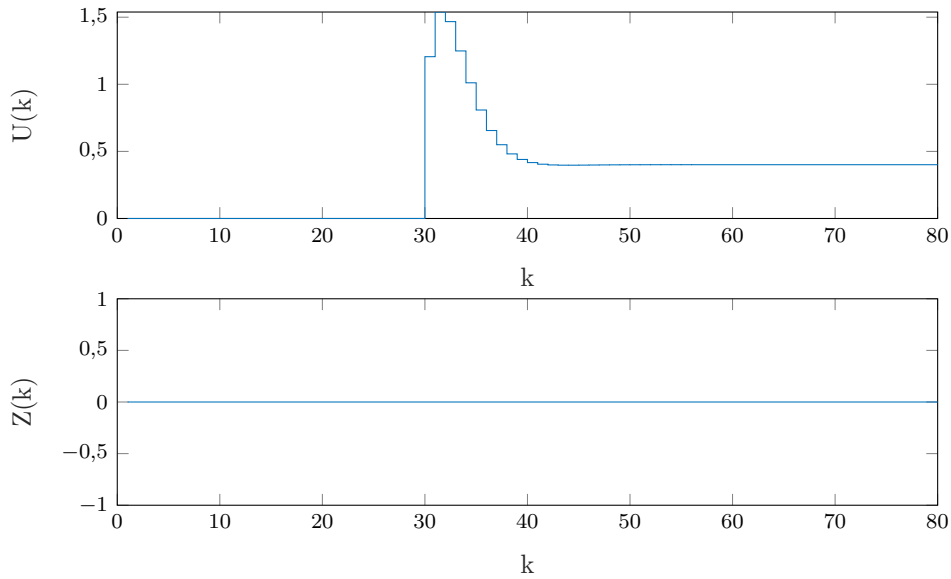
Rys. 4.6. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora:  $N = 50$   $N_u = 5$   $\lambda = 1$ , błąd  $E = 8,502866$



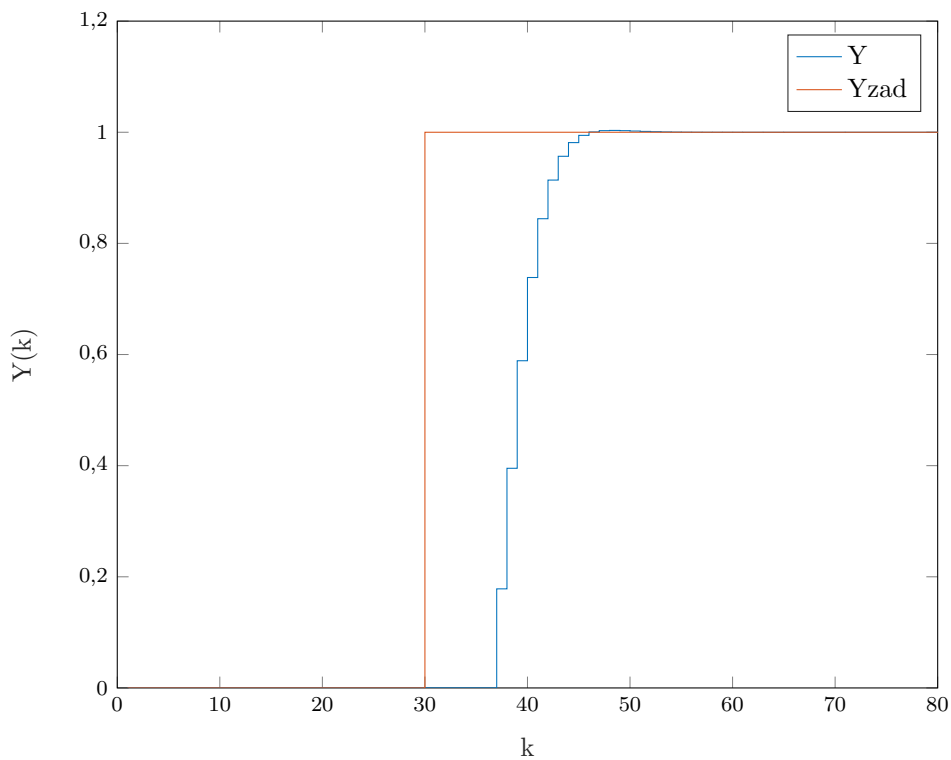
Rys. 4.7. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora:  $N = 50$   $N_u = 2$   $\lambda = 1$



Rys. 4.8. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora:  $N = 50$   $N_u = 2$   $\lambda = 1$ , błąd  $E = 9,478717$



Rys. 4.9. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora:  $N = 50$   $N_u = 2$   $\lambda = 0,4$



Rys. 4.10. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora:  $N = 50$   $N_u = 2$   $\lambda = 0,4$ , błąd  $E = 8,312159$

### 4.3. Wnioski

Jak można było powyżej zauważyć, regulator DMC od samego początku działał w sposób dobry (błąd wynosił  $E=8,809637$ ). Zmiany parametru  $N$  nie dawały przez dłuższy czas zauważalnych zmian w przebiegach jak i w błędzie (dopiero przy  $N=20$  błąd delikatnie wzrósł). Przy modyfikacji parametru  $N_U$  można było zaobserwować większą poprawę regulacji. Dla  $N_U = 5$  wskaźnik jakości regulacji oraz uchyb zmalały. Jednak aby całkiem wyeliminować uchyb zmniej-

---

szono  $N_U$  do wartości 2, co spowodowało spowolnienie regulacji i tym samym wzrost błędu. Zmniejszenie wartości współczynnika  $\lambda$  do wartości 0,4 przyspieszyło regulację.

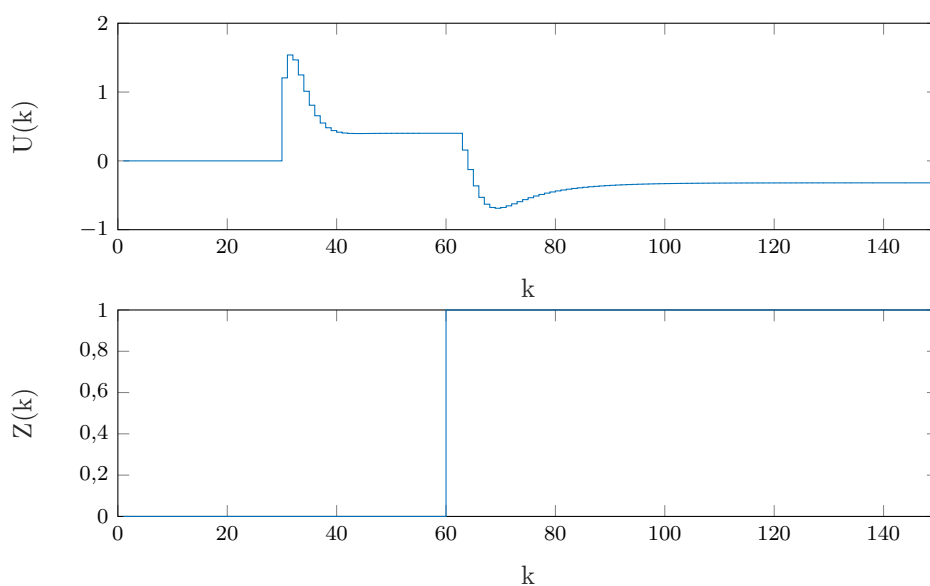
Najbardziej satysfakcjonujące wyniki uzyskano dla:  $N_U = 50$   $N = 2$   $\lambda = 0,4$ . Dla tak dobranych parametrów wskaźnik jakości regulacji wynosił  $E=8,312159$ .

## 5. Regulacja z skokowym zakłóceniem

Parametr  $D^Z$  został dobrany analogicznie do parametru D: przyjęto go jako wartość k, dla której odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście stabilizuje się:  $D^Z = 68$

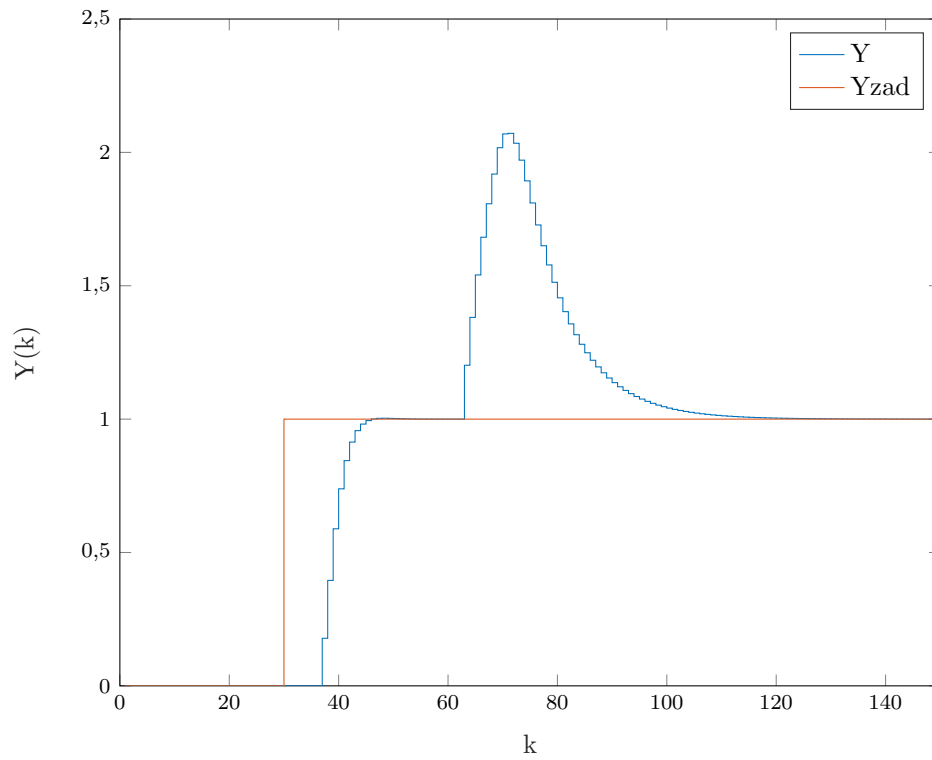
W doświadczeniach skok wartości zakłócenia następował w chwili  $k=60$  i wynosił 1. Użyto regulatora o najlepszych parametrach z poprzedniego podpunktu ( $N_U = 50$   $N = 2$   $\lambda = 0,4$ )

### 5.1. Bez pomiaru zakłócenia

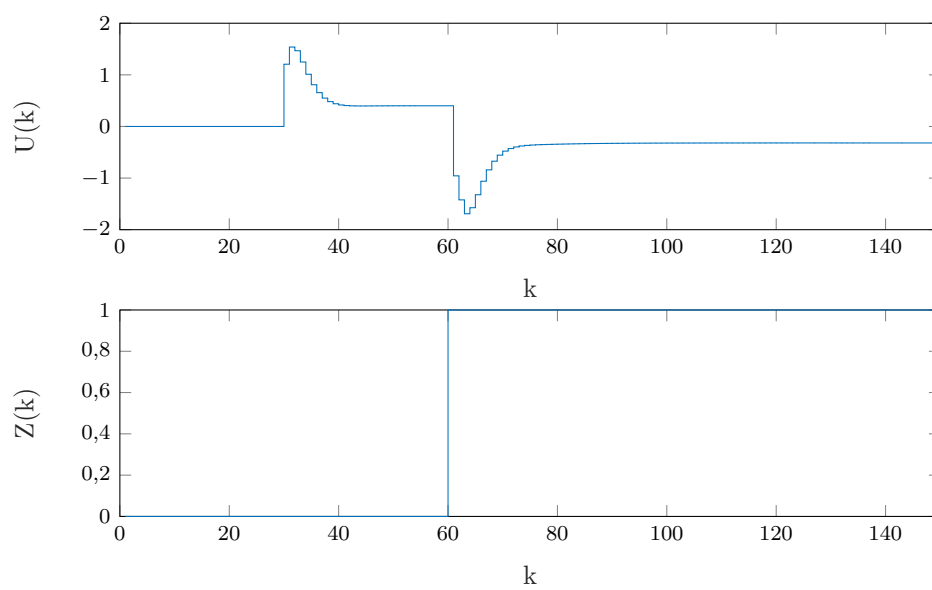


Rys. 5.1. Zakłócenie i sygnał sterujący

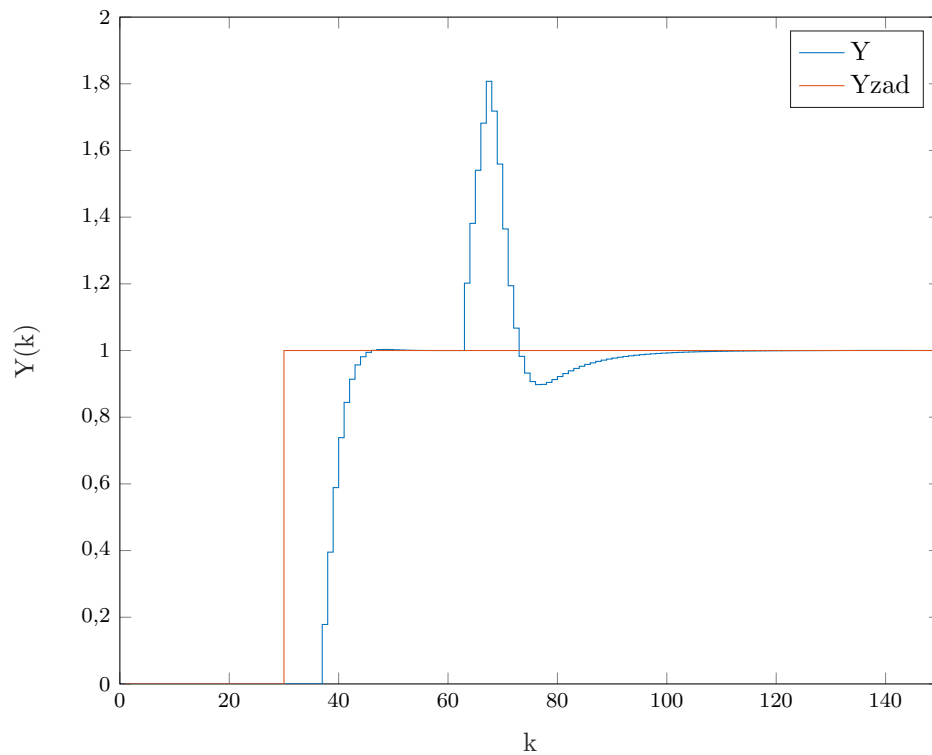


Rys. 5.2. Wyjście obiektu bez pomiaru zakłócenia błąd  $E = 20,06103$ 

## 5.2. Z pomiaru zakłócenia



Rys. 5.3. Zakłócenie i sygnał sterujący

Rys. 5.4. Wyjście obiektu z pomiarem zakłócenia błąd  $E = 10,98983$ 

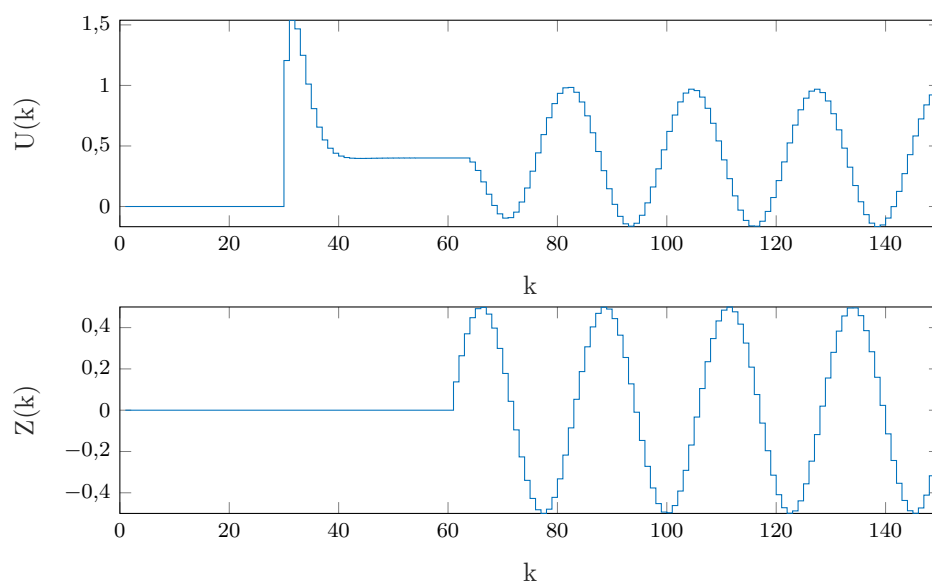
### 5.3. Wnioski

Pomiar zakłóceń znacznie polepszył regulację. Bez niego błąd wynosił  $E=20,06103$ , natomiast z pomiarem błąd zmalał prawie dwukrotnie ( $E=10,98983$ ).

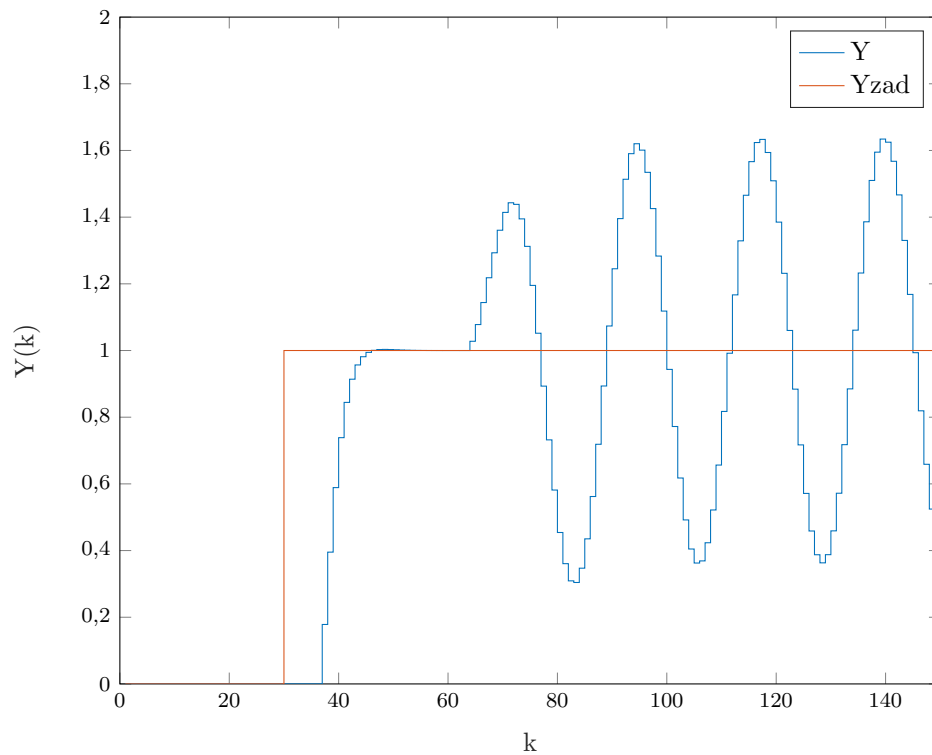
## 6. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym

W tym podpunkcie zakłócenie pojawia się w chwili  $k=60$  i posiada ono charakter sinusoidalny.

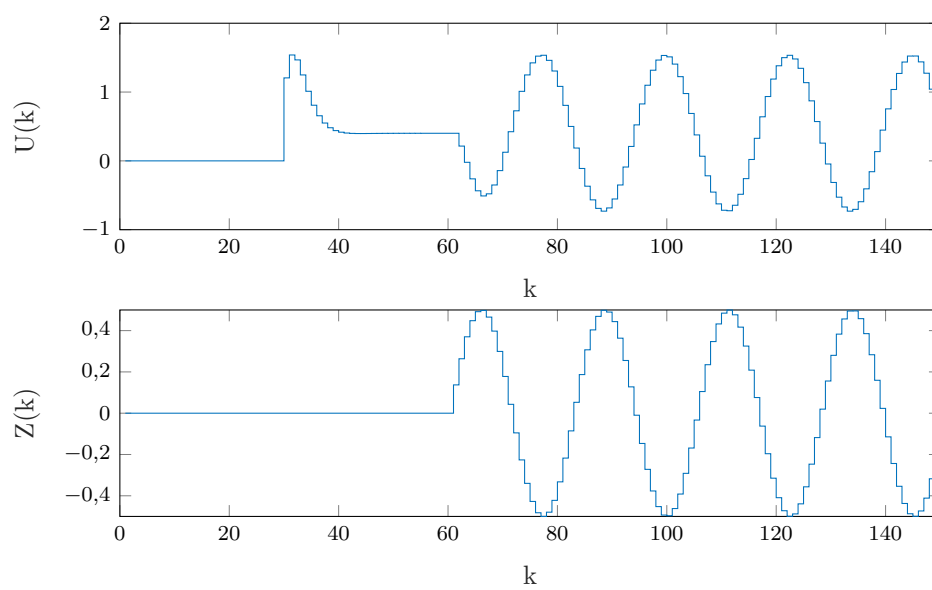
### 6.1. Bez pomiaru zakłócenia



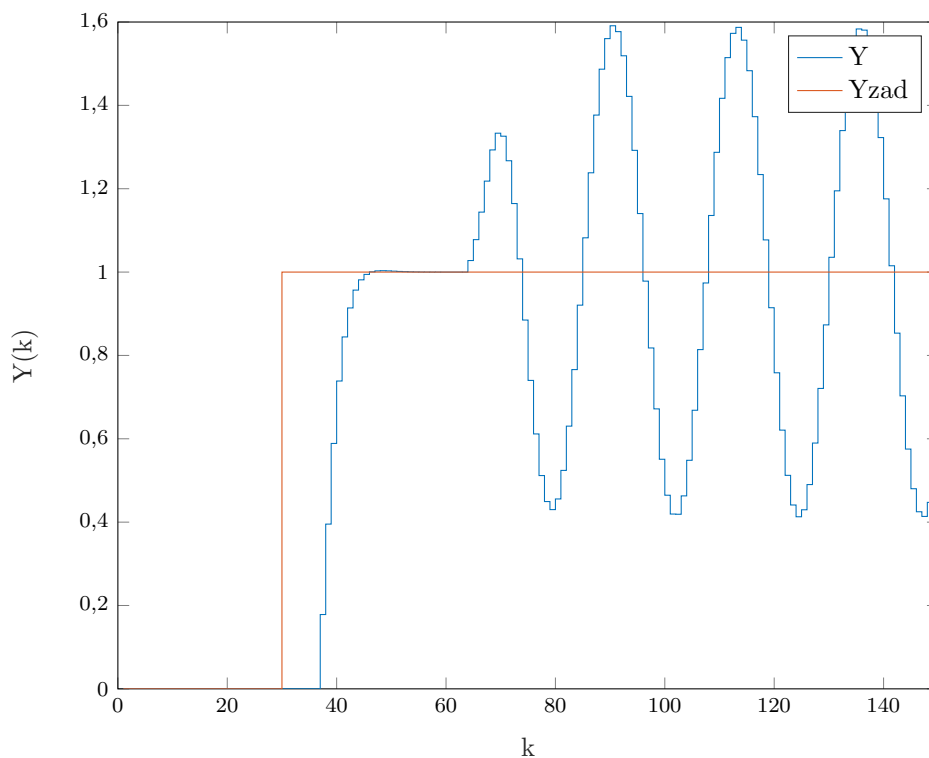
Rys. 6.1. Zakłócenie i sygnał sterujący

Rys. 6.2. Wyjście obiektu bez pomiaru zakłócenia błąd  $E = 24,84831$ 

## 6.2. Z pomiaru zakłócenia



Rys. 6.3. Zakłócenie i sygnał sterujący

Rys. 6.4. Wyjście obiektu z pomiarem zakłócenia błąd  $E = 22,30000$ 

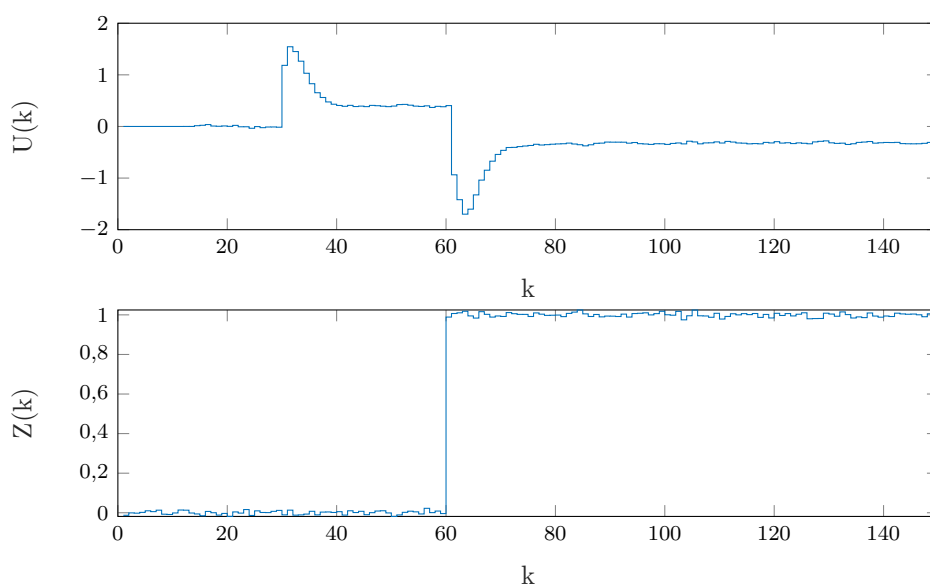
### 6.3. Wnioski

Z powyższych przebiegów można stwierdzić, że w przypadku pomiaru zakłócenia sinusoidalnego regulator działa lepiej niż bez (współczynnik jakości regulacji z pomiarem zakłócenia wynosi  $E=22,30000$ , natomiast bez  $E=24,84831$ ).

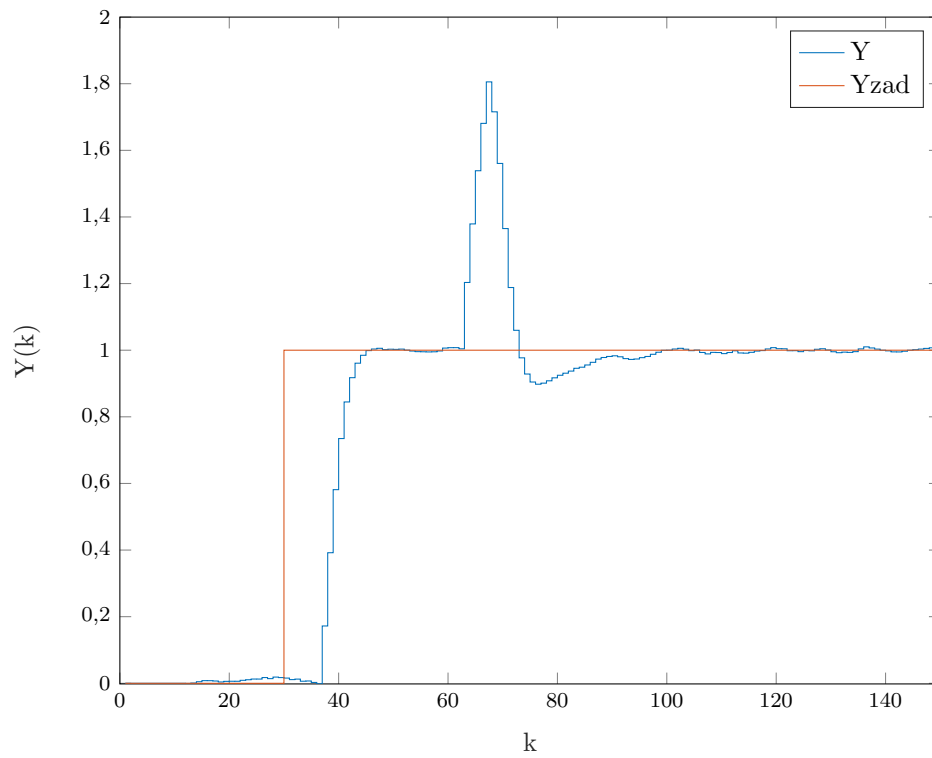
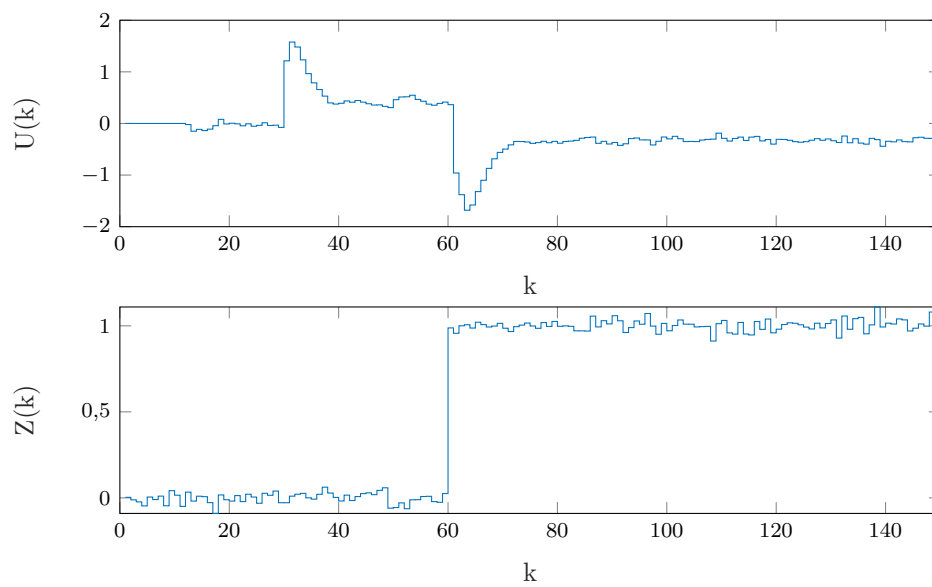
## 7. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym

Szum pomiarowy generowano poleceniem `wgn()` i dodawano go do ustawionej wartości zakłócenia

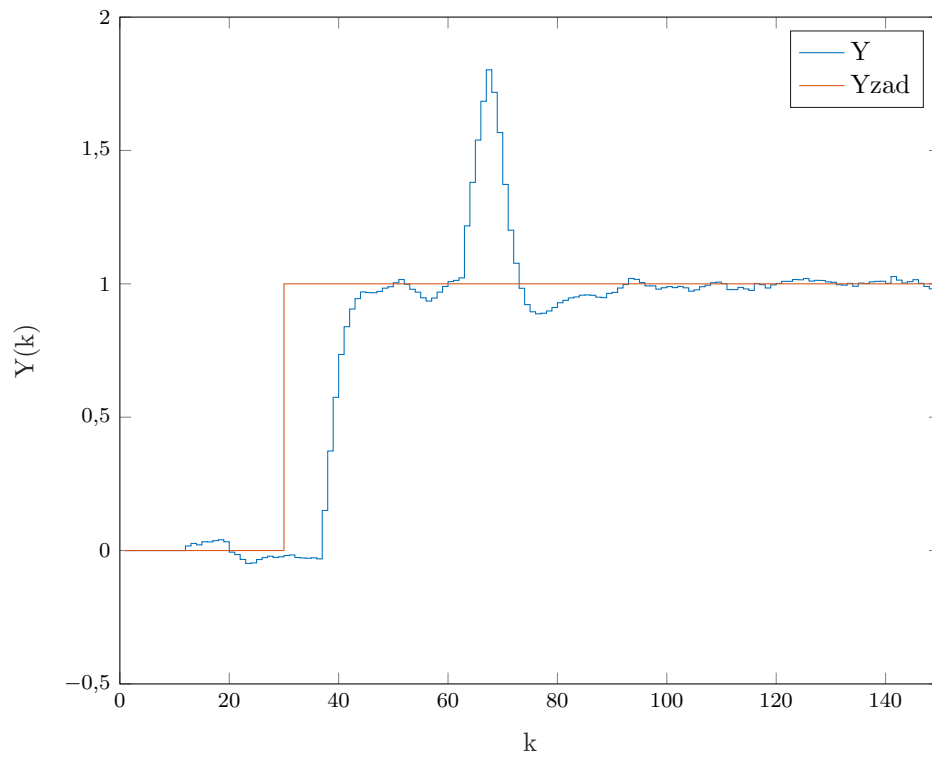
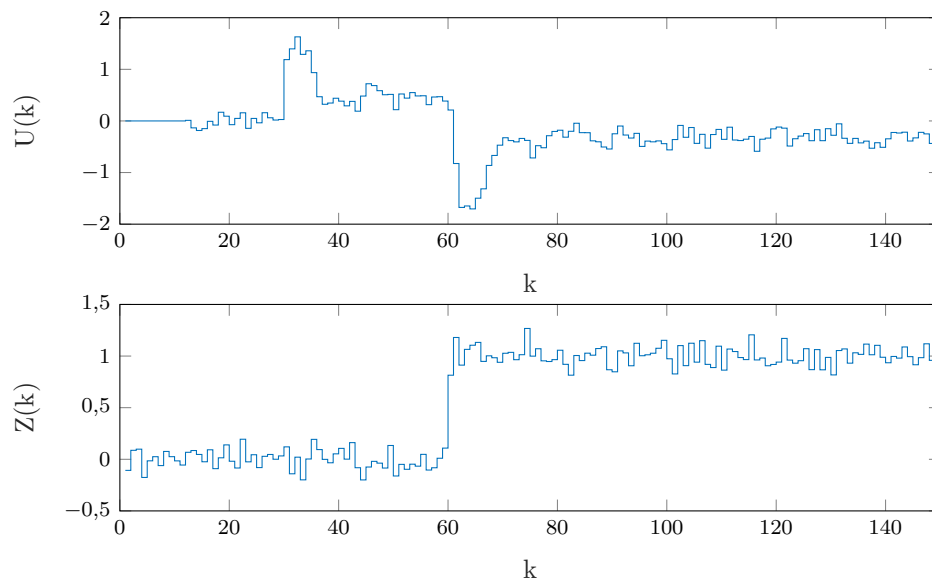
### 7.1. Szum nałożony na zakłócenie skokowe



Rys. 7.1. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum mały

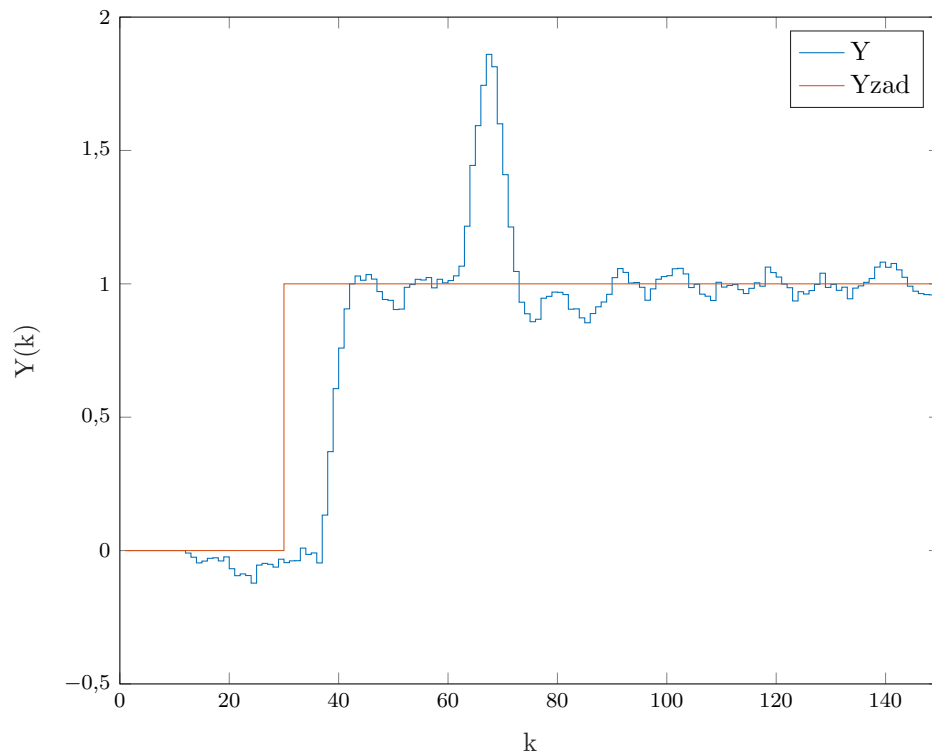
Rys. 7.2. Wyjście dla pomiaru z szumem małym błąd ( $E = 10, 8966$ )

Rys. 7.3. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum średni

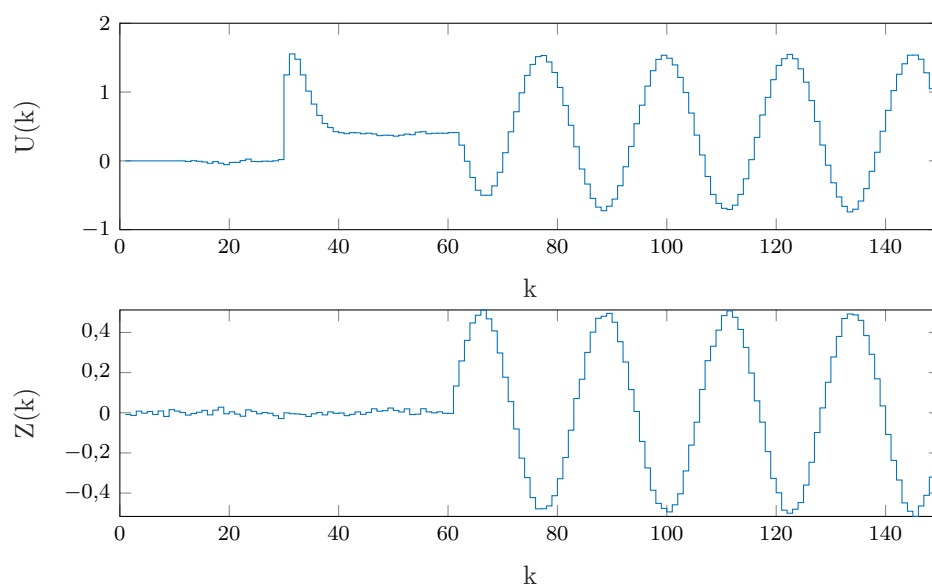
Rys. 7.4. Wyjście dla pomiaru z szumem średnim ( $E = 11,5103$ )

Rys. 7.5. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum duży

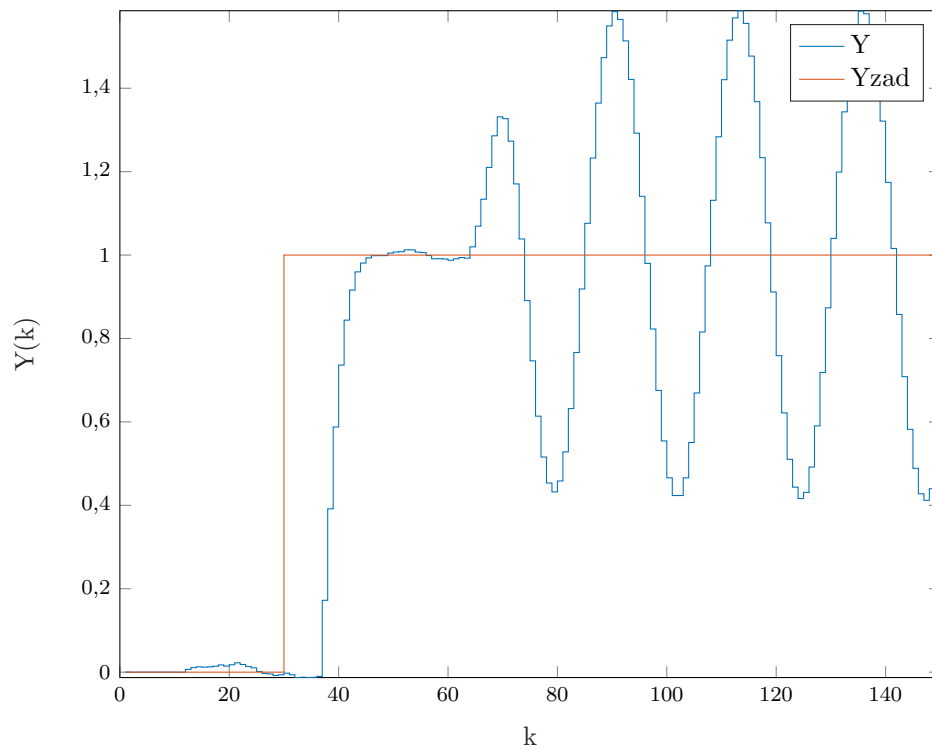
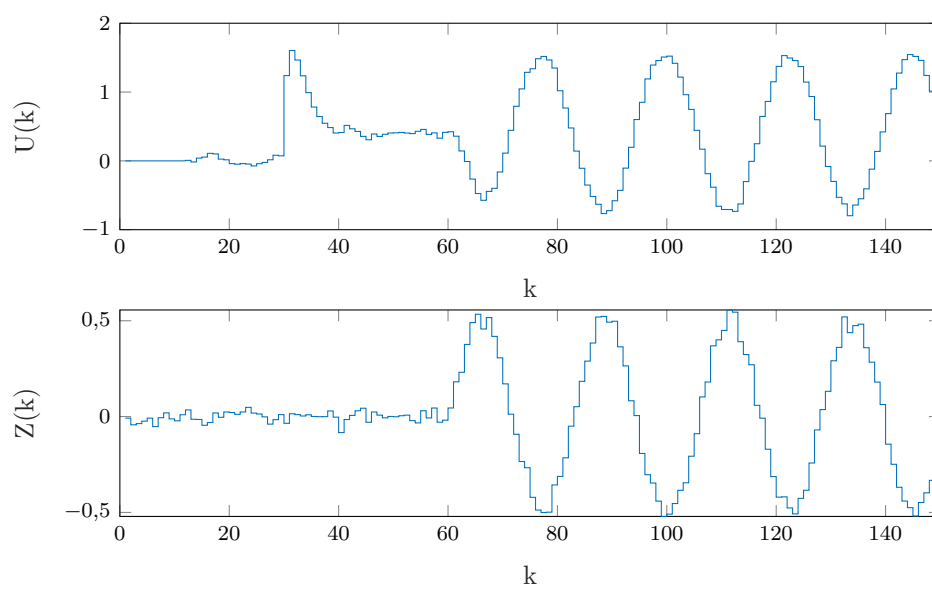


Rys. 7.6. Wyjście dla pomiaru z szumem dużym (błąd  $E = 12, 1956$ )

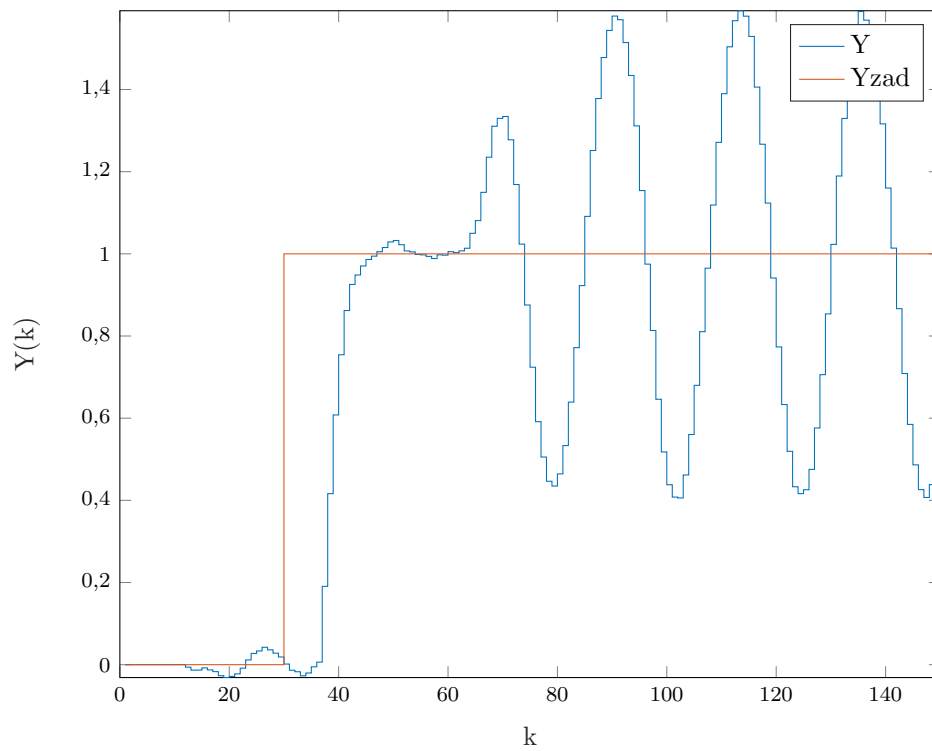
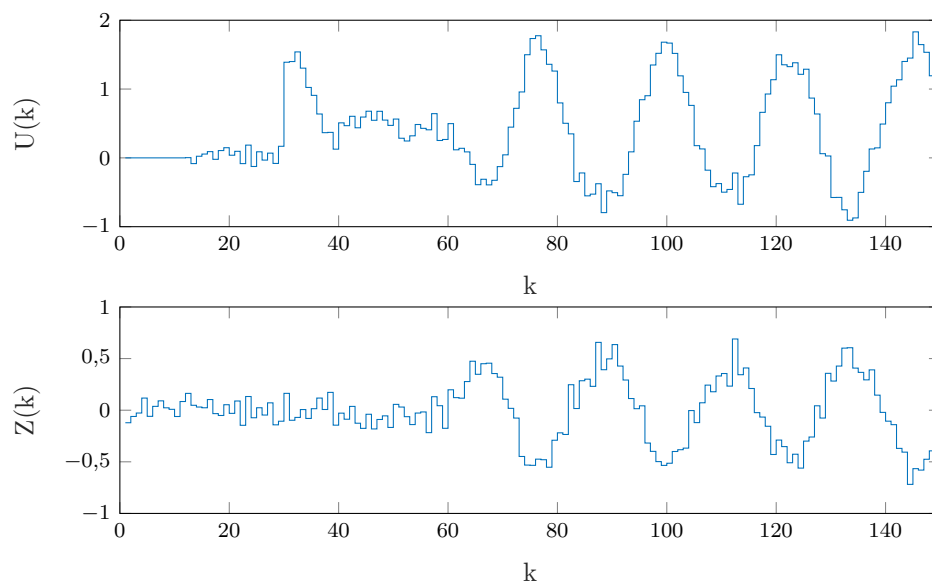
## 7.2. Szum nałożony na zakłócenie sinusoidalne



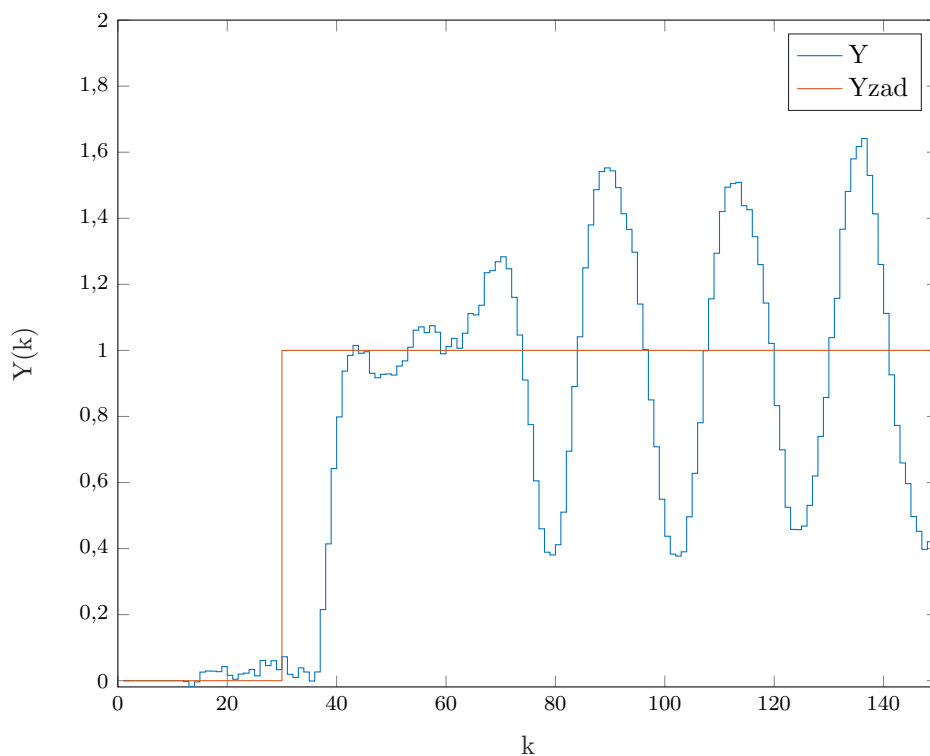
Rys. 7.7. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum mały

Rys. 7.8. Wyjście dla pomiaru z szumem małym (błąd  $E = 22, 3174$ )

Rys. 7.9. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum średni

Rys. 7.10. Wyjście dla pomiaru z szumem średnim (błąd  $E = 22,5508$ )

Rys. 7.11. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum duży

Rys. 7.12. Wyjście dla pomiaru z szumem dużym (błąd  $E = 21,8056$ )

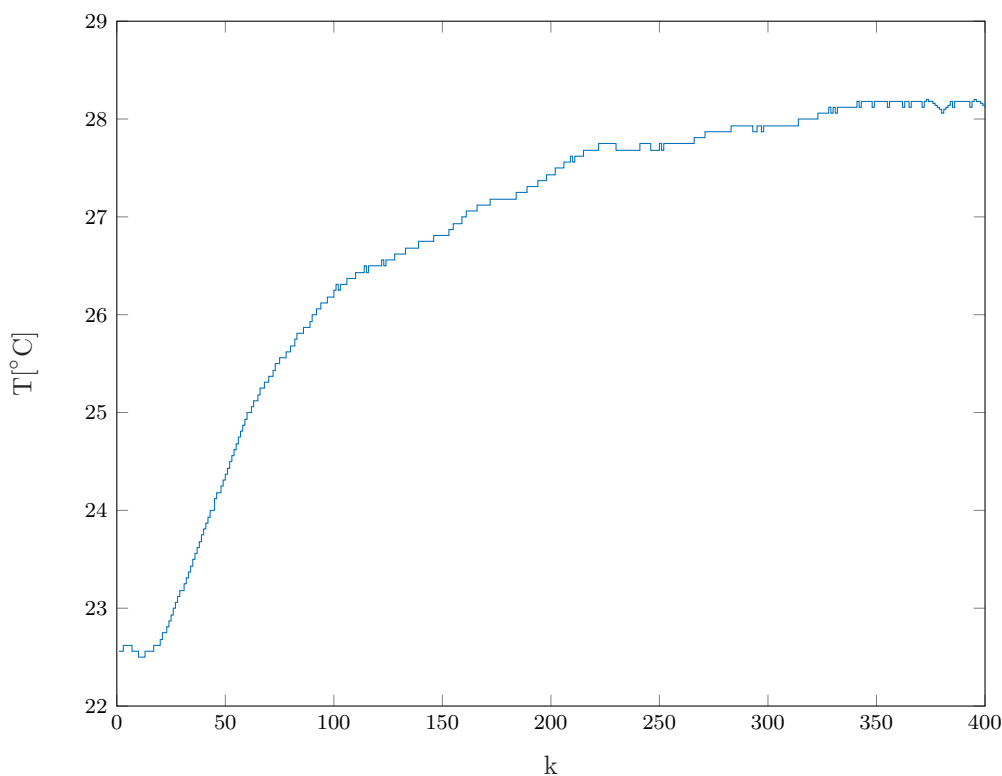
### 7.3. Wnioski

Występowanie szumu pomiarowego pogarsza jakość regulacji. Szum jest generowany w sposób losowy, dlatego też zwiększanie wartości błędów szumu pomiarowego, nie zawsze będzie skutkowało pogorszeniem regulacji. Widać to na przykładzie zakłócenia sinusoidalnego: nałożenie dużego szumu skutkowało mniejszym błędem niż w przypadku małego i średniego szumu.

## 8. Laboratorium

### 8.1. Określenie wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy

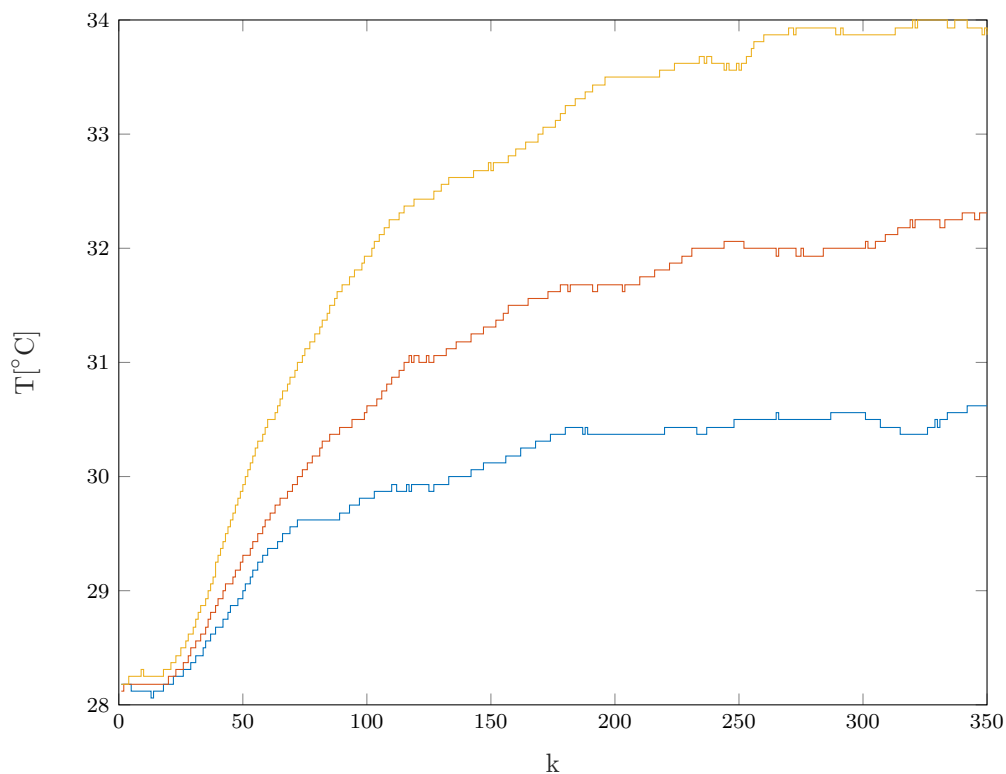
W celu określenia wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy ustawiono moc wentylatora  $W1 = 50\%$ , a moc grzałki  $G1 = 25\%$ . Po czasie około 5 minut temperatura odczytywana przez czujnik temperatury zaczęła się stabilizować na poziomie  $T1 = 28,2^{\circ}\text{C}$ . Niestety z powodu ciągłego ruchu powietrza związanego z przemieszczaniem się osób w sali i dużej ilości tych osób wpływających na temperaturę sali oraz czułość stanowiska pomiarowego temperatura odczytywana przez czujnik zaczęła odbiegać i lekko oscylować wokół tej temperatury.



Rys. 8.1. Pomiar temperatury w punkcie pracy

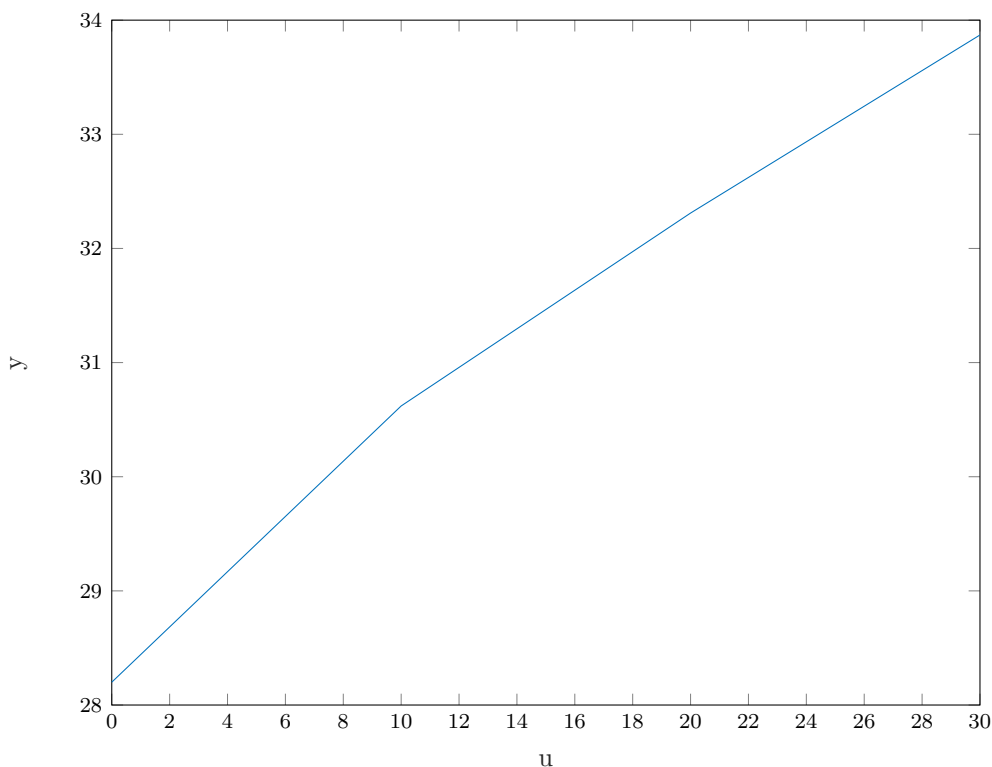
### 8.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych

Rozpoczynając z punktu pracy wyznaczono odpowiedzi skokowe dla trzech różnych skoków sygnału zakłócenia  $Z = 10\%$   $Z = 20\%$  i  $Z = 30\%$ .



Rys. 8.2. Odpowiedzi skokowe dla trzech różnych wartości sygnału sterującego

Analizując otrzymane wykresy można wywnioskować, że właściwości statyczne procesu są w przybliżeniu liniowe, zmiany wartości odpowiedzi skokowej dla tych samych chwil są w przybliżeniu proporcjonalne jak również sam kształt wykresów jest w przybliżeniu podobny. W celu sprawdzenia założeń narysowano charakterystykę statyczną procesu.



Rys. 8.3. Charakterystyka statyczna procesu

Która potwierdziła przypuszczenia, na jej podstawie można stwierdzić, że właściwości statyczne procesu są w dobrym przybliżeniu liniowe i w konsekwencji postanowiono wyznaczyć wzmocnienie statyczne procesu.

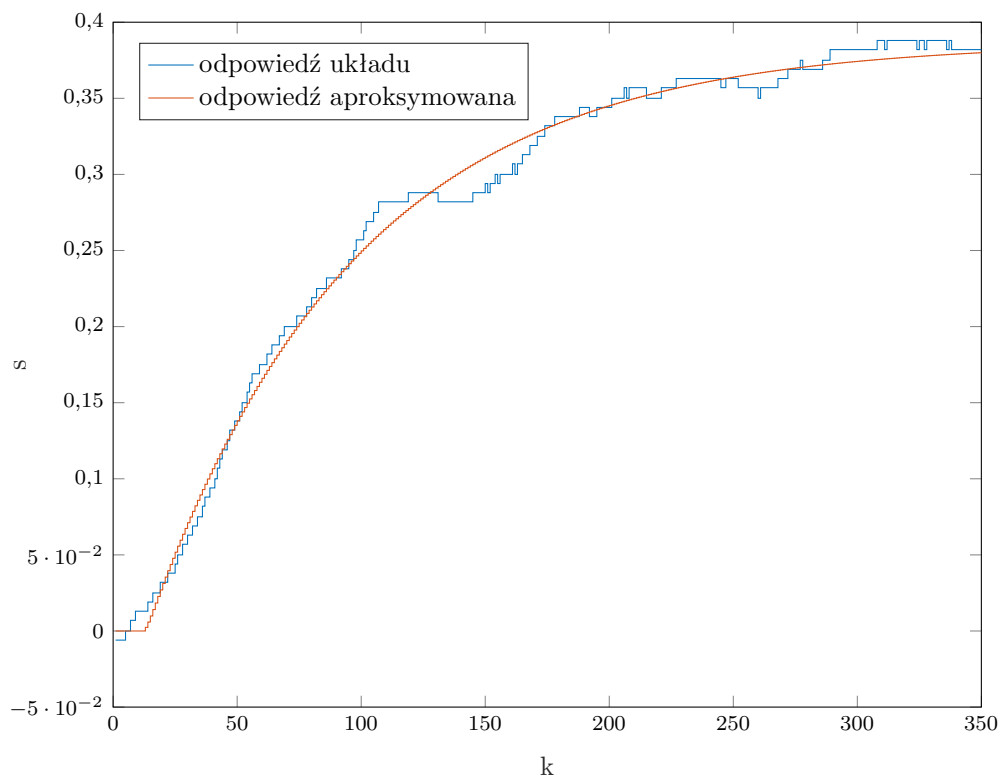
$$K_{stat} = 0,1890 \quad (8.1)$$

### 8.3. Przekształcenie i aproksymacja odpowiedzi skokowej

W celu przekształcenia odpowiedzi skokowej w taki sposób aby można ją było wykorzystać w algorytmie DMC skorzystano z poniższego wzoru:

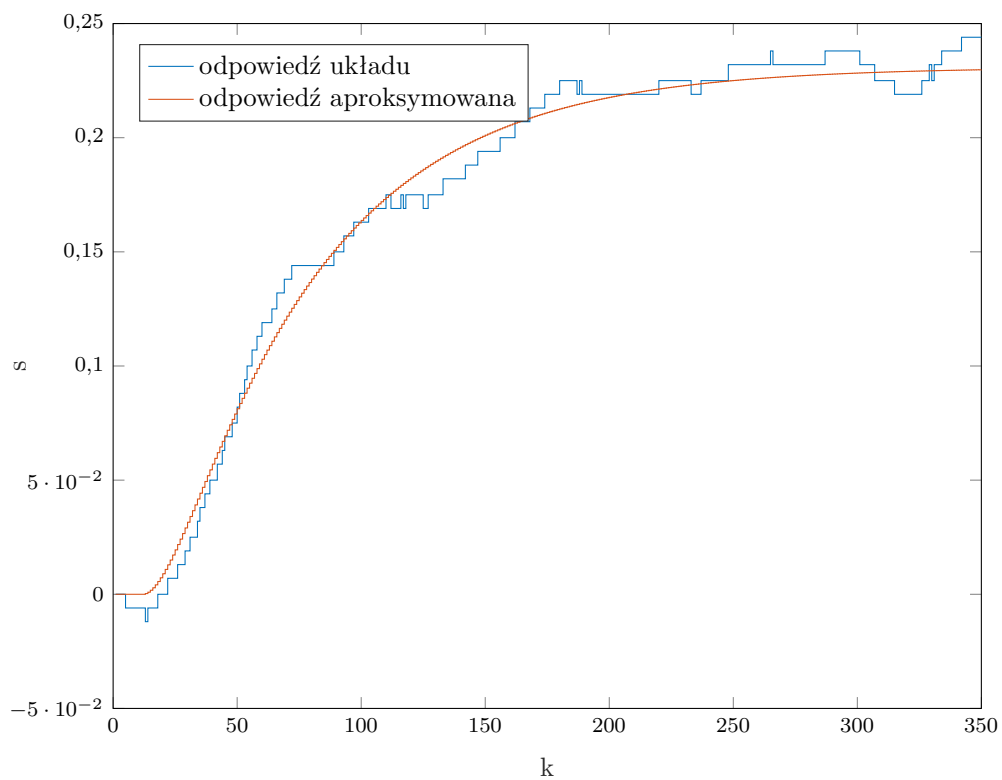
$$S_i = \frac{Y(i) - Y_{pp}}{\Delta U}, \text{ dla } i = 1, 2 \dots D \quad (8.2)$$

Dla odpowiedzi skokowej na torze wejście-wyjście otrzymanej w wyniku zmiany sygnału sterującego z  $G1 = 25\%$  na  $G1 = 35\%$  a następnie dokonano jej aproksymacji używając członu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem.



Rys. 8.4. Aproksymacja odpowiedzi skokowej U-Y

Taki sam proces aproksymacji przeprowadzony został dla toru zakłócenie-wyjście dla skoku zakłócenia od  $Z = 0$  do  $Z = 10$ .



Rys. 8.5. Aproksymacja odpowiedzi skokowe Z-Y



Do wyznaczenia optymalnych parametrów aproksymacji posłużono się algorytmem genetycznym o losowej populacji początkowej tak aby zminimalizować błąd dopasowania.

#### 8.4. DMC

Prawo regulacji DMC przedstawia się następująco:

$$\Delta U(k) = K(Y^{zad}(k) - Y^0(k)) \quad (8.3)$$

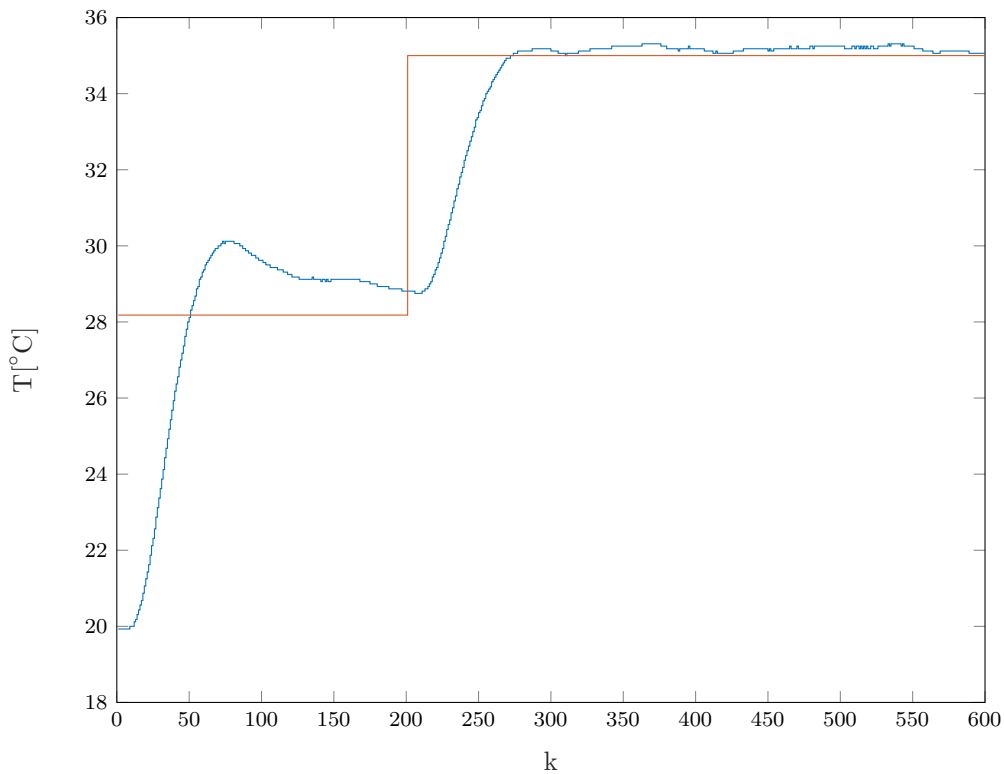
Gdzie  $\Delta U(k)$  to wektor  $N_u$  (horyzont sterowania) przyszłych wartości sterowania,  $Y^0(k)$  to przewidywana odpowiedź z modelu procesu,  $K$  - macierz policzona raz na początku ze współczynników odpowiedzi skokowej, uwzględniając wybrany współczynnik  $\lambda$  oraz horyzonty predykcji i sterowania.

W przypadku algorytmu DMC z pomiarem zakłóceń  $Y^0(k)$  oblicza się z następującego wzoru:

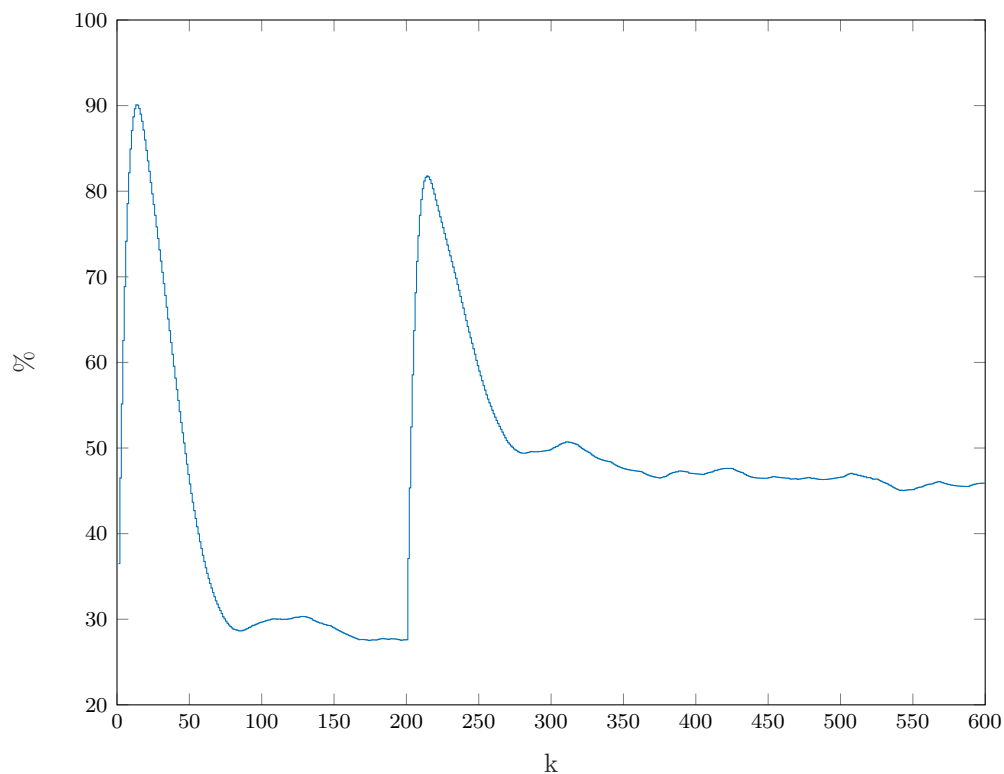
$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) + M^{Z^P} \Delta Z^P(k) \quad (8.4)$$

W powyższym wzorze dwa pierwsze elementy sumy odnoszą się do toru sterowanie-wyjście a ostatni element do toru zakłócenie-wyjście:  $M^{Z^P}$  macierz wyznaczana przy pomocy współczynników odpowiedzi skokowej dla zakłócenia,  $\Delta Z^P(k)$  jest wektorem przyrostów mierzalnego zakłócenia.

Poniżej przedstawione są wyniki działania programu dla skoku wartości zadanej z punktu pracy 28,18 do 35 dla różnych parametrów regulatora:

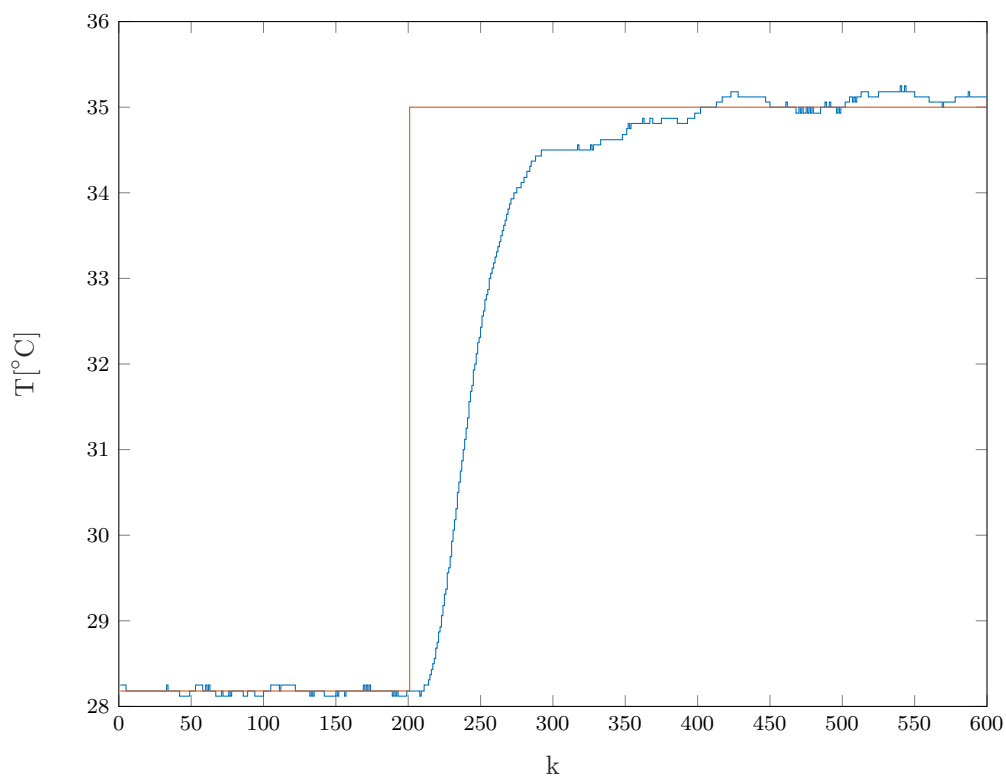


Rys. 8.6. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 90$ ,  $N_u = 10$ ,  $\lambda = 0.4$

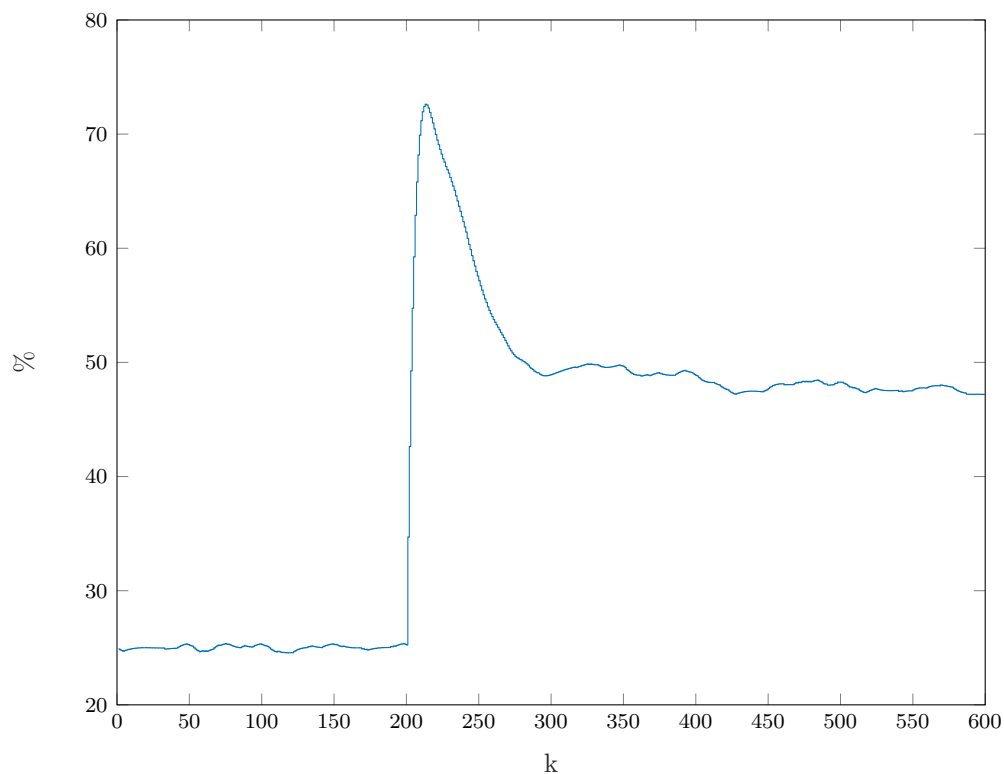


Rys. 8.7. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 90$ ,  $N_u = 10$ ,  $\lambda = 0,4$

$$E = 3,1023 \cdot 10^3 \quad (8.5)$$

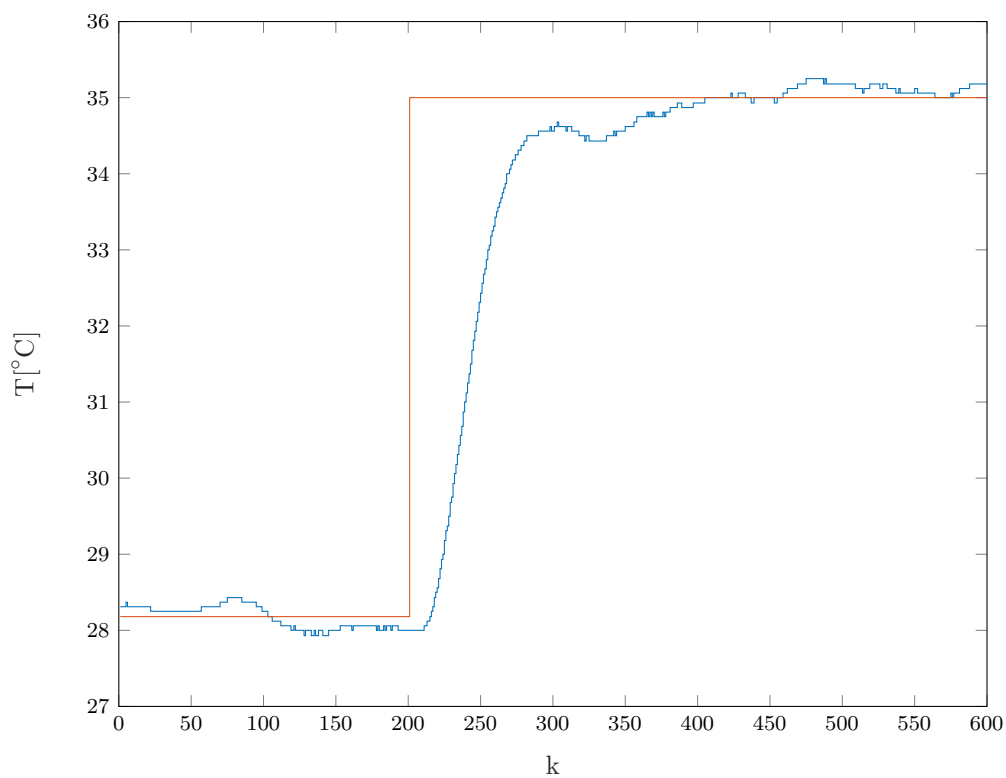


Rys. 8.8. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 60$ ,  $N_u = 5$ ,  $\lambda = 1$

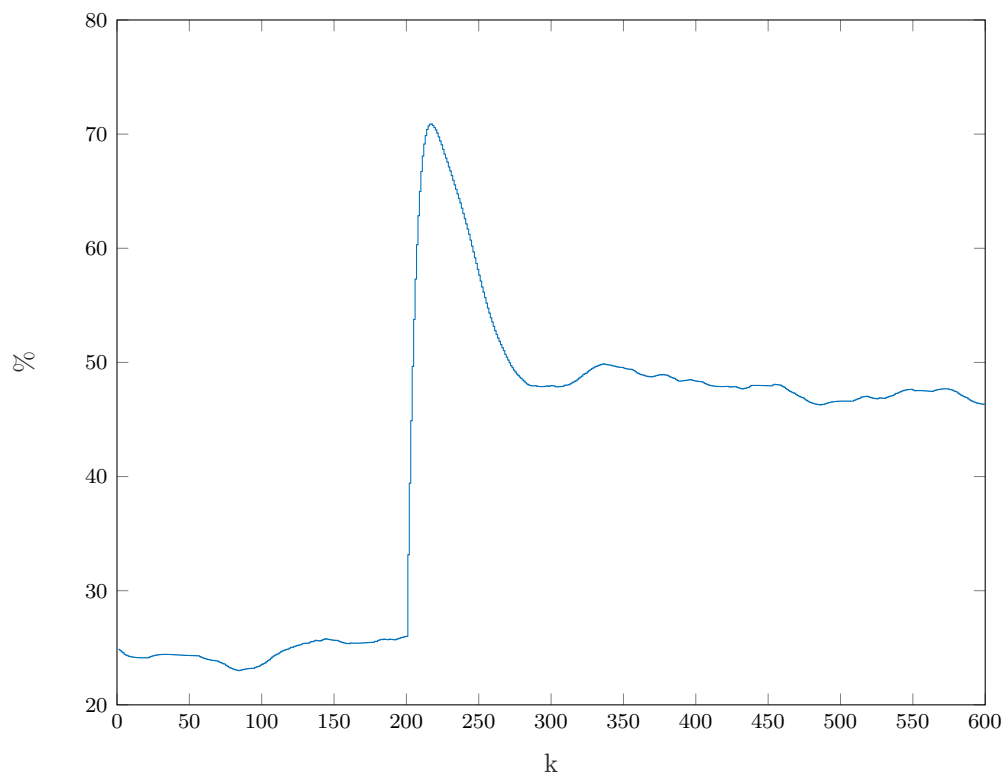


Rys. 8.9. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 60$ ,  $N_u = 5$ ,  $\lambda = 1$

$$E = 1,5950 * 10^3 \quad (8.6)$$

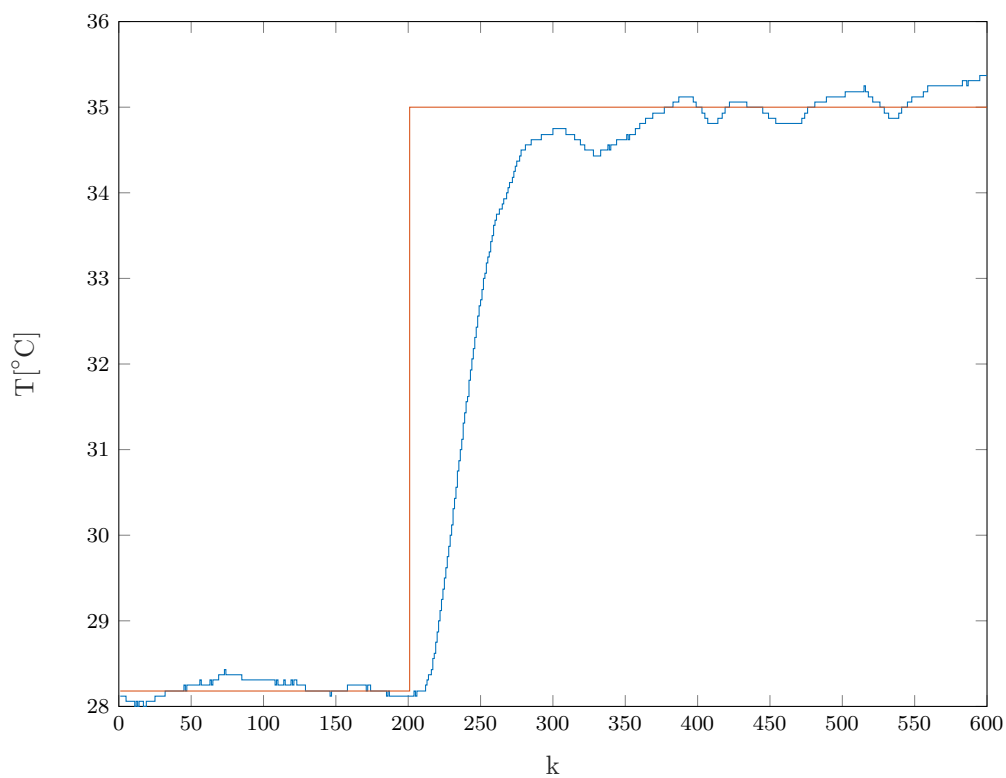


Rys. 8.10. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 60$ ,  $N_u = 5$ ,  $\lambda = 2$

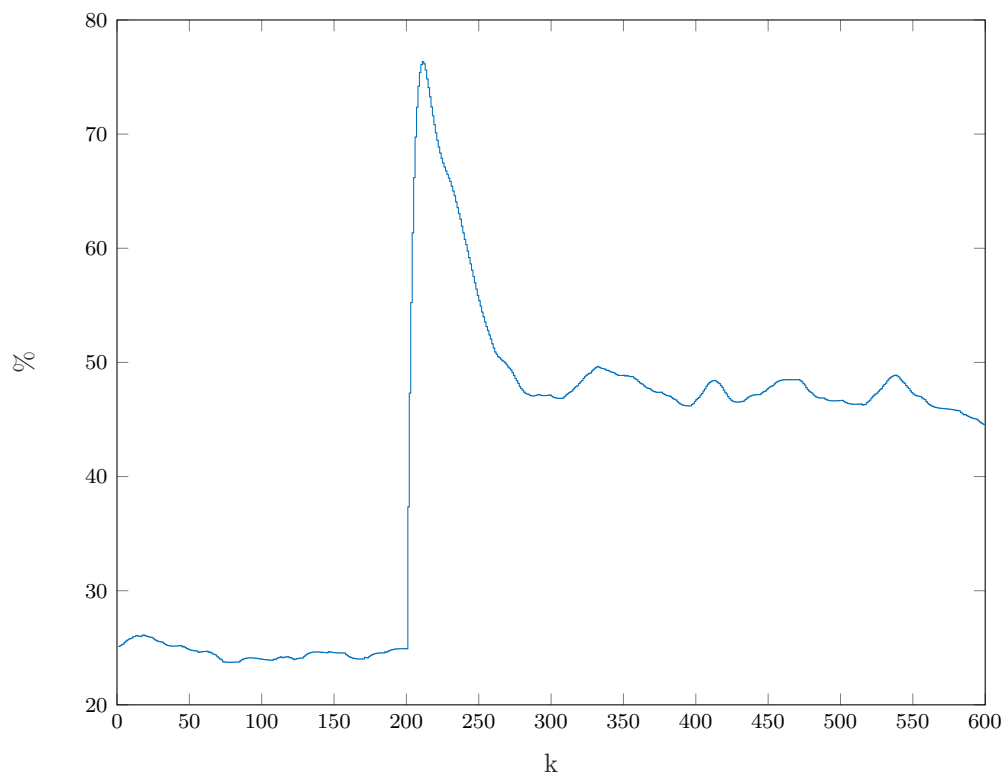


Rys. 8.11. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 60$ ,  $N_u = 5$ ,  $\lambda = 2$

$$E = 1,6698 * 10^3 \quad (8.7)$$

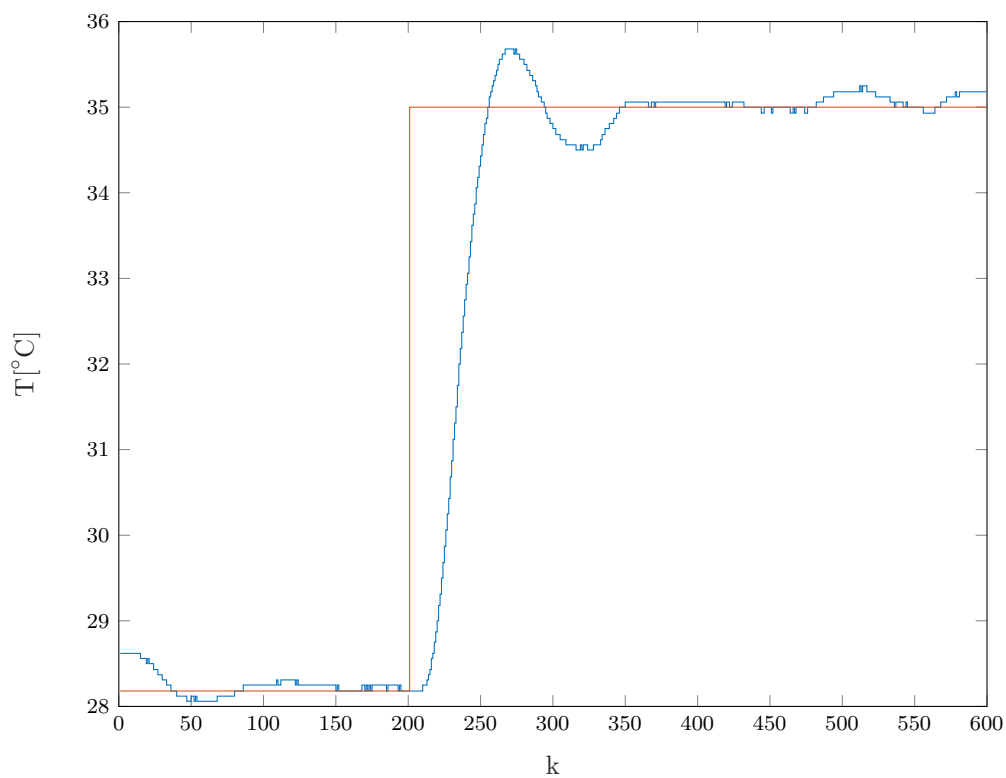


Rys. 8.12. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 60$ ,  $N_u = 5$ ,  $\lambda = 0,4$

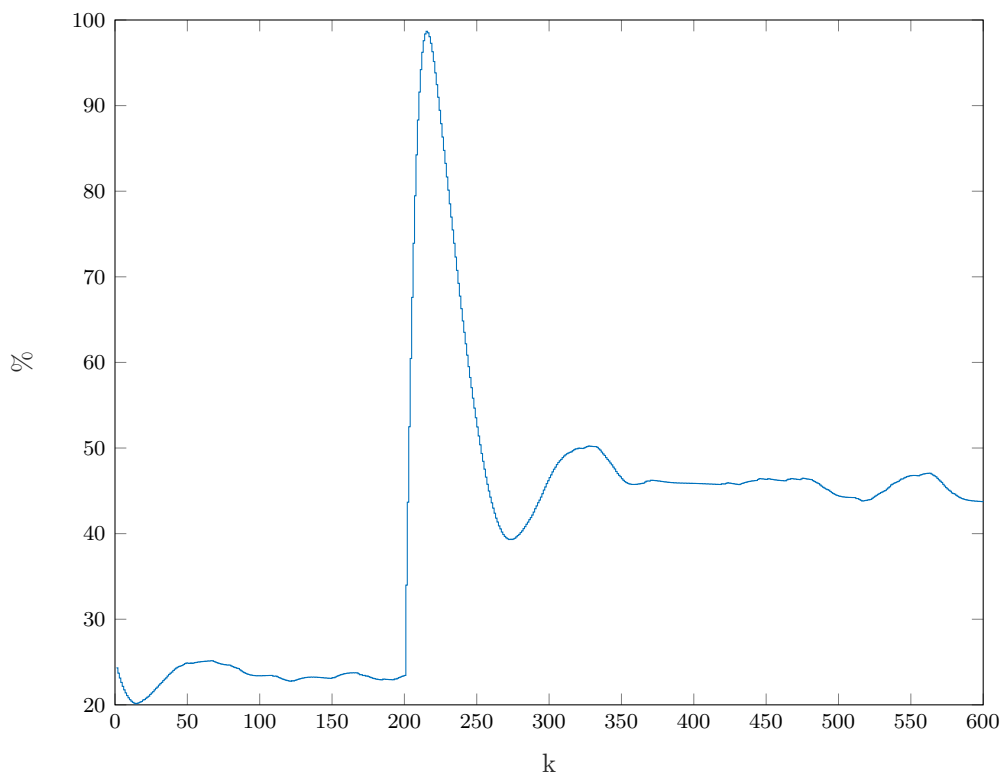


Rys. 8.13. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 60$ ,  $N_u = 5$ ,  $\lambda = 0,4$

$$E = 1,5041 * 10^3 \quad (8.8)$$



Rys. 8.14. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 30$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 0,4$



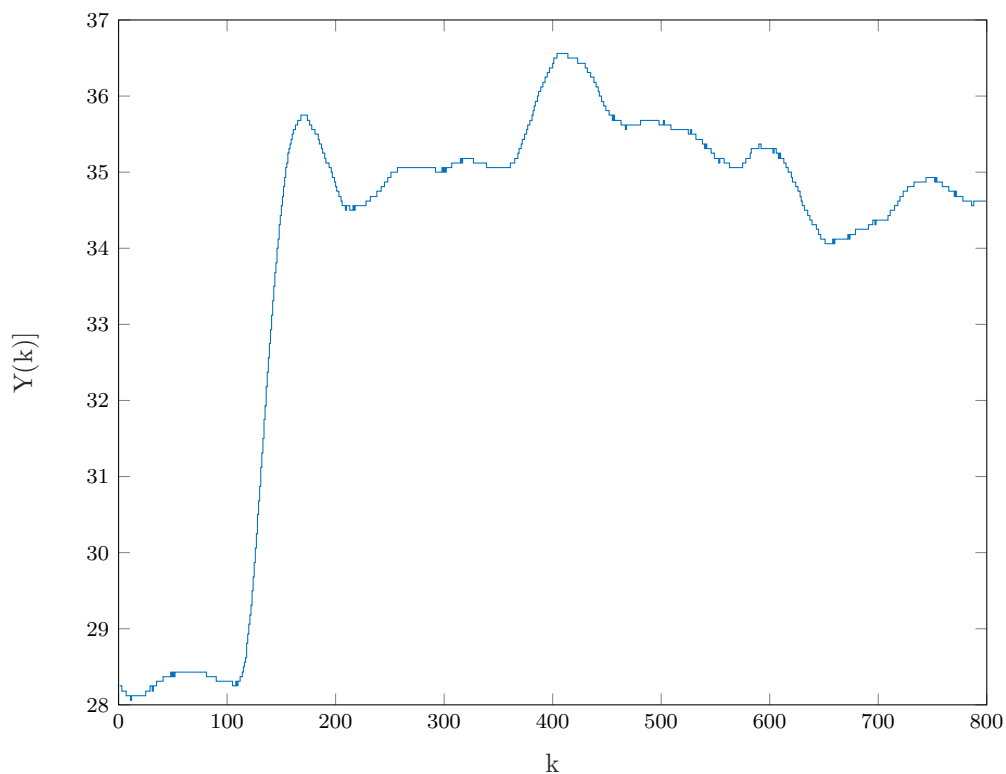
Rys. 8.15. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 30$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 0,4$

$$E = 1,2676 * 10^3 \quad (8.9)$$

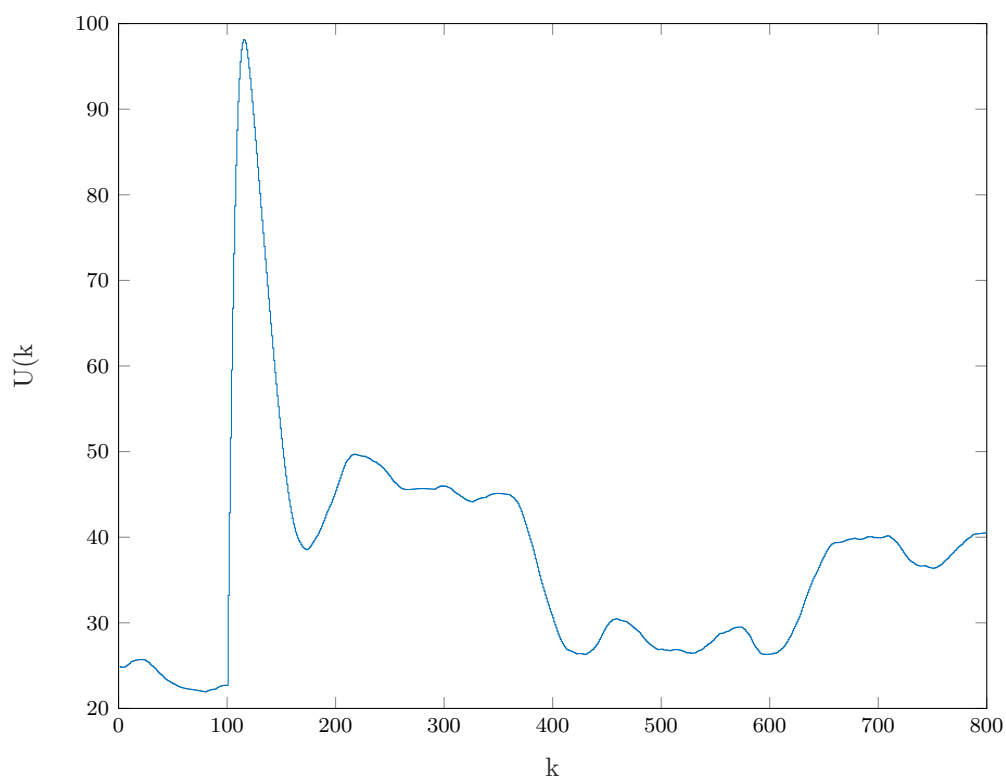
### 8.5. Dobór parametru $D^z$

W wyniku eksperymentów dobraliśmy wartość  $D^z = 320$ .

Poniżej są przedstawione wyniki regulacji najpierw bez pomiaru zakłócenia, a potem z pomiarem dla skoków sygnału zakłócenia w chwili  $k=350$  z wartości 0 do 30 oraz w  $k=600$  z 30 do 10.



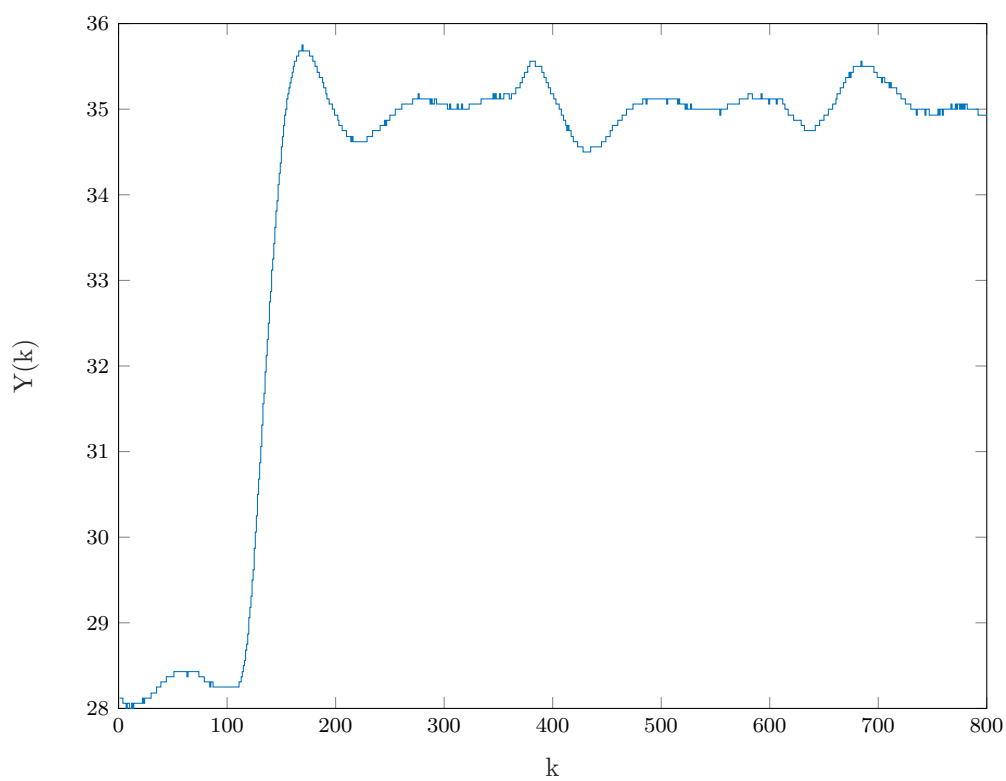
Rys. 8.16. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 30$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 0,4$  bez pomiaru zakłócenia



Rys. 8.17. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 30$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 0,4$  bez pomiaru zakłócenia

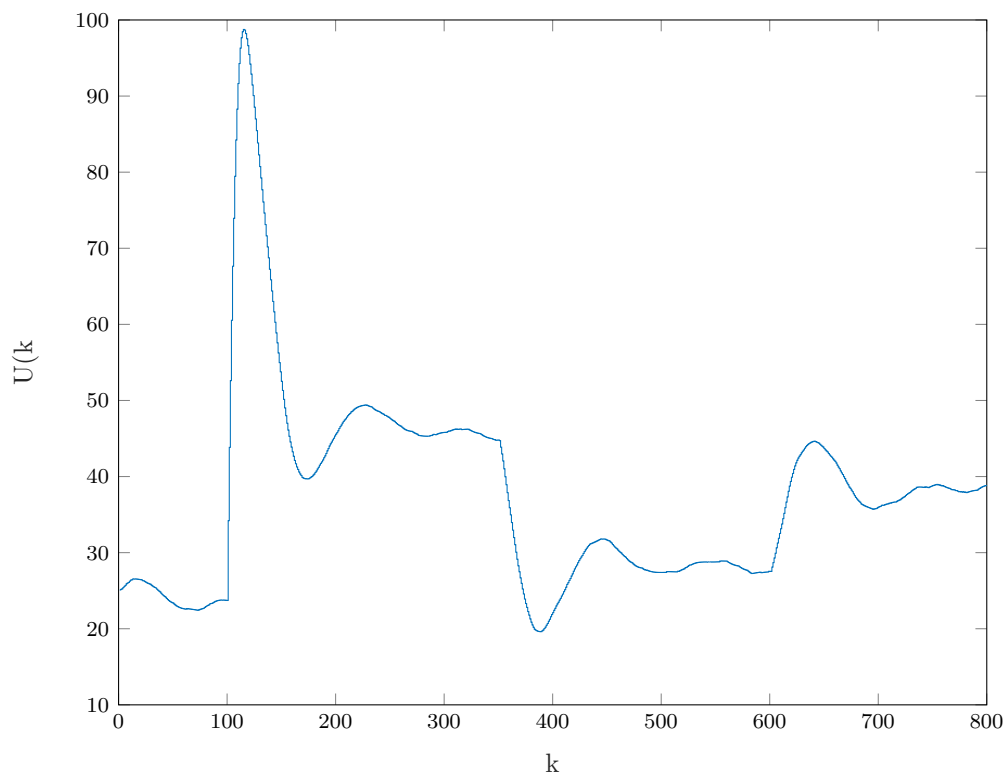
$$E = 1,4576 * 10^3 \quad (8.10)$$

Włączamy pomiar zakłóceń.



Rys. 8.18. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 30$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 0,4$  z pomiarem zakłócenia





Rys. 8.19. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów  $D = 340$ ,  $N = 30$ ,  $N_u = 1$ ,  $\lambda = 0,4$  z pomiarem zakłócenia

$$E = 1,2734 * 10^3 \quad (8.11)$$

Jak widać, regulacja z pomiarem jest bardziej precyzyjna.