

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

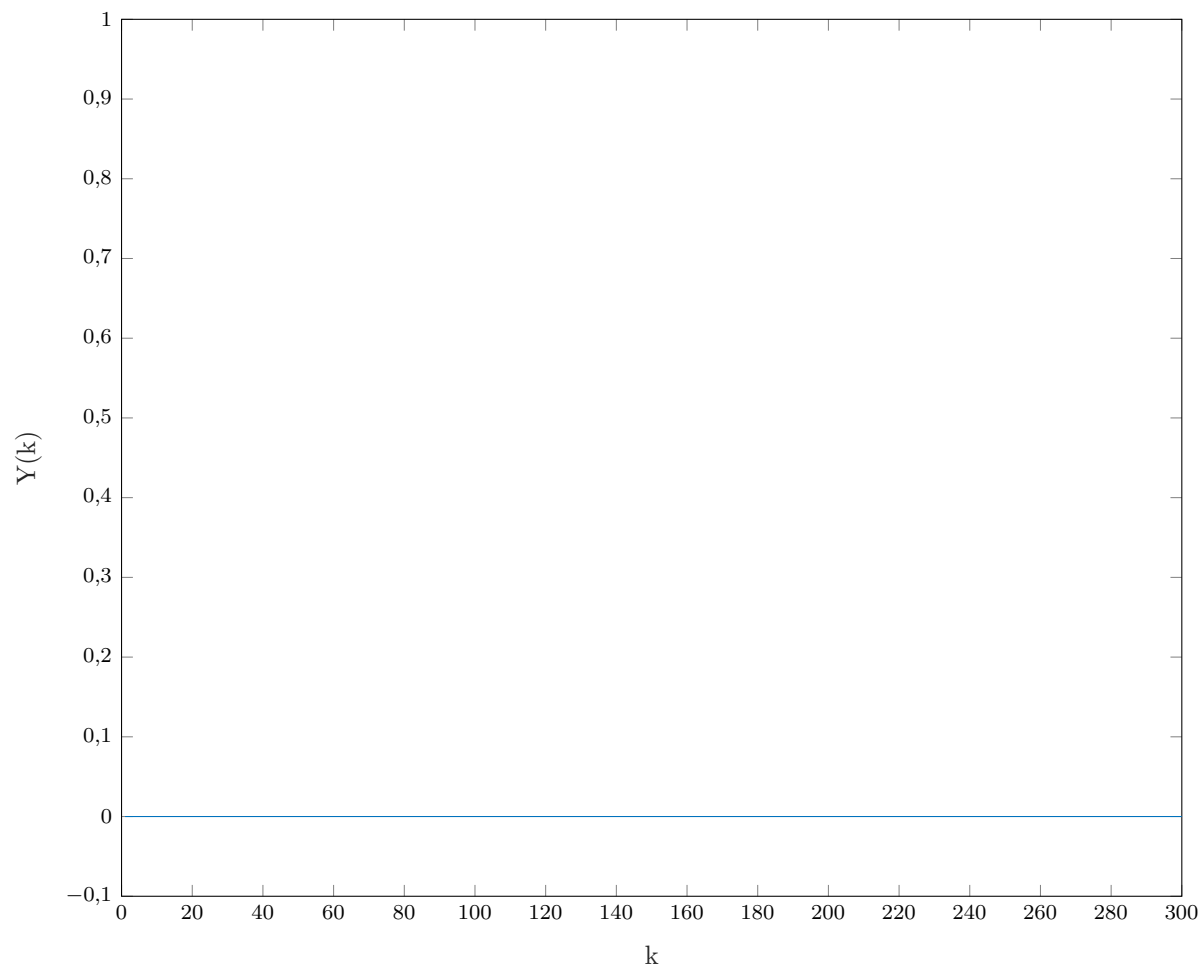
Warszawa, 2021

Spis treści

1. Sprawdzenie poprawności podanych wartości	2
2. Odpowiedzi skokowe	3
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
3. Odpowiedzi skokowe dla DMC	6
4. Algorytm DMC	8
4.1. Strojenie regulatora	8
4.2. Wyniki strojenia	9
4.3. Wnioski	13
5. Regulacja z skokowym zakłóceniem	15
5.1. Bez pomiaru zakłócenia	15
5.2. Z pomiaru zakłócenia	16
5.3. Wnioski	17
6. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym	18
6.1. Bez pomiaru zakłócenia	18
6.2. Z pomiaru zakłócenia	19
6.3. Wnioski	20
7. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym	21
7.1. Szum nałożony na zakłócenie skokowe	21
7.2. Szum nałożony na zakłócenie sinusoidalne	24
7.3. Wnioski	27
8. Laboratorium	28
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 .



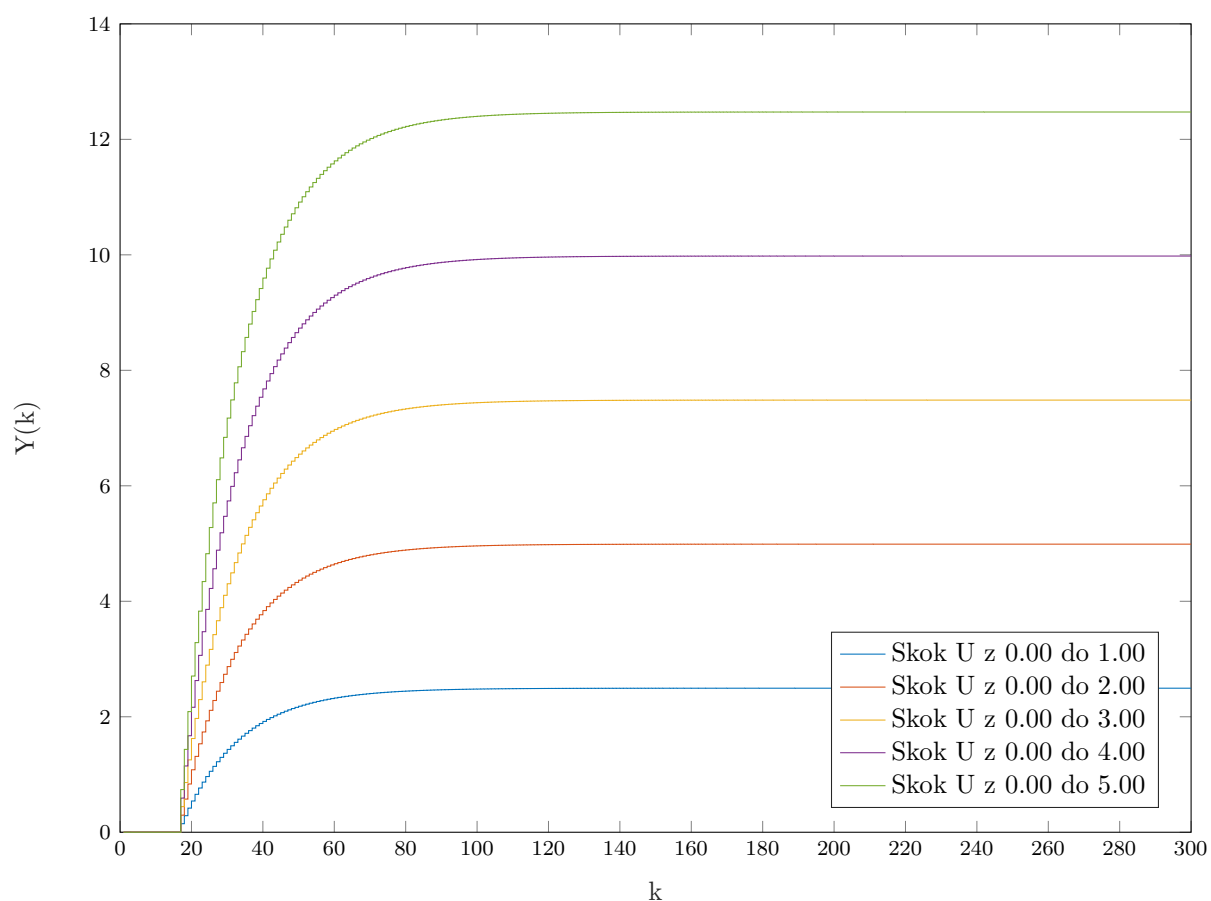
Rys. 1.1. Przebieg wyjścia obiektu przy stałym wejściu i zakłóceniu: $u = z = 0$

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.

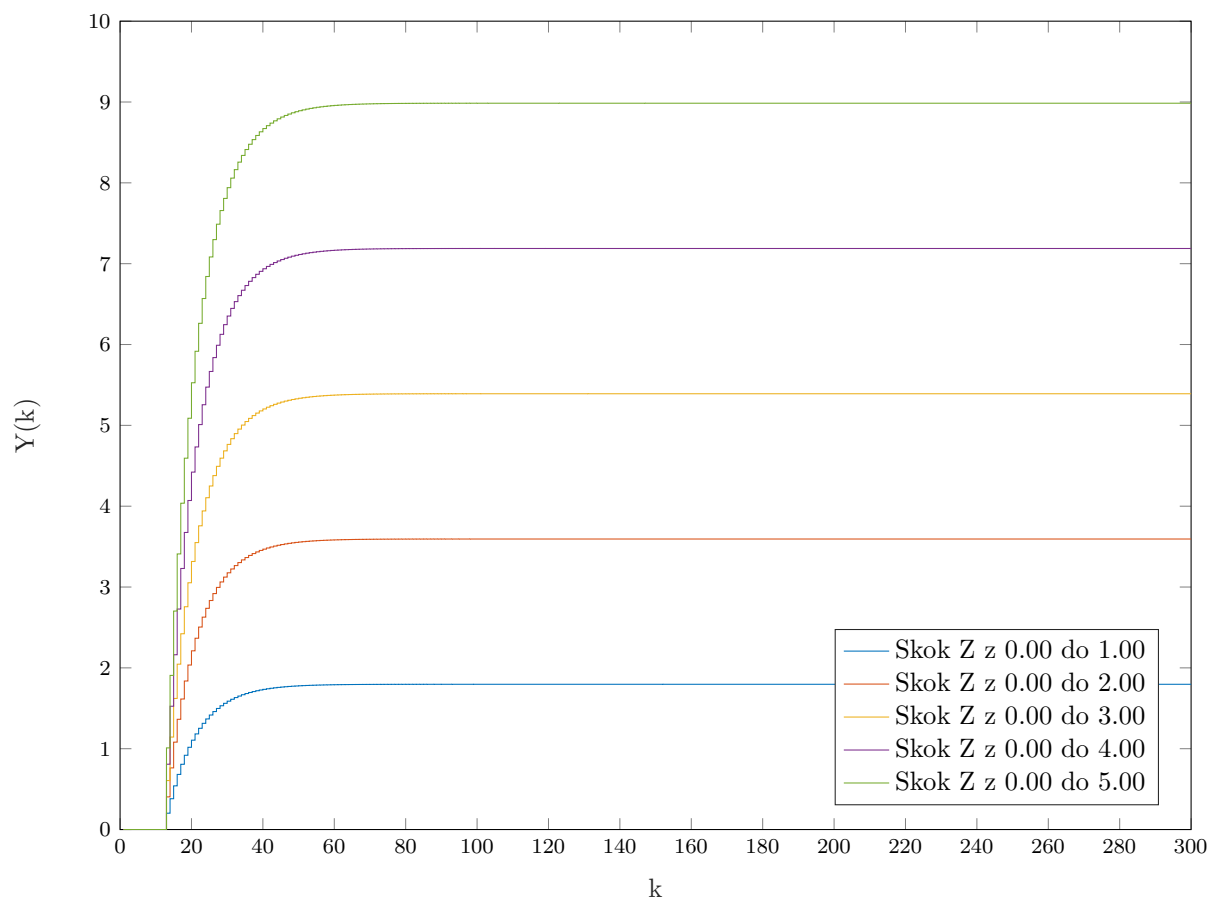
2.1. Odpowiedzi skokowe toru U-Y



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

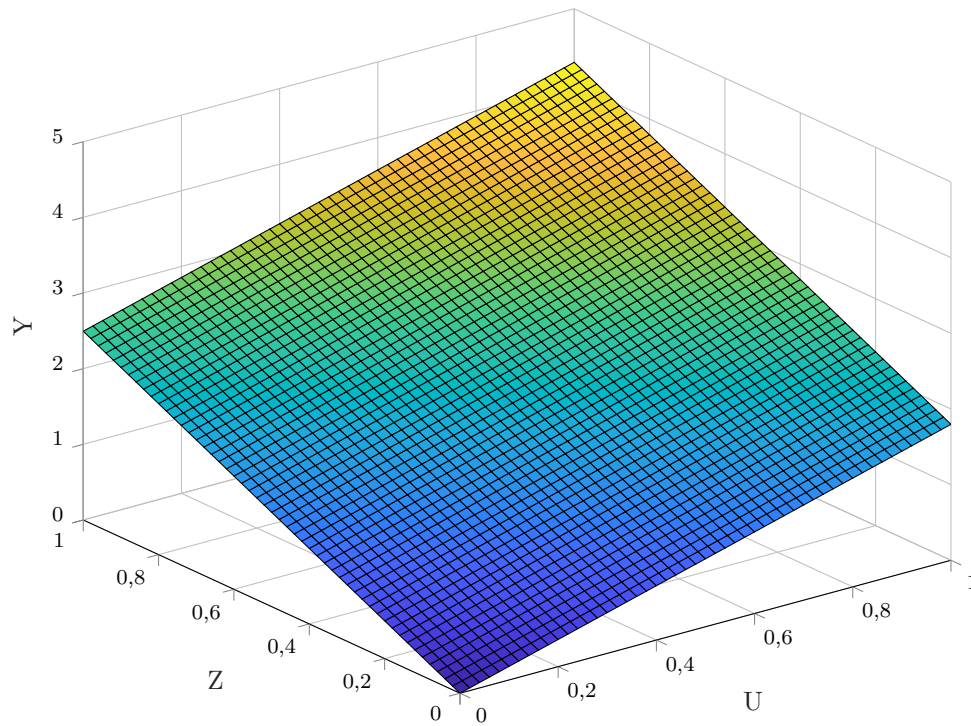


Rys. 2.2. Wykresy odpowiedzi skokowych

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

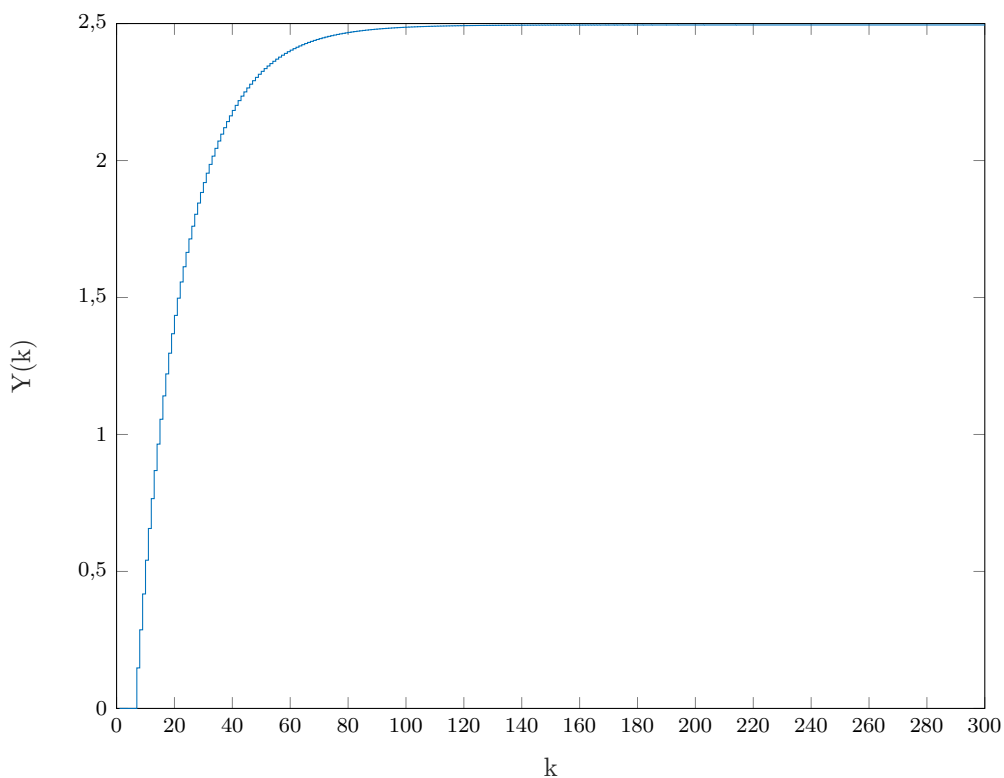
Jak widać z powyższego wykresu, charakterystyka jest prawie idealnie liniowa. Wyliczone wzmocnienia statyczne:

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

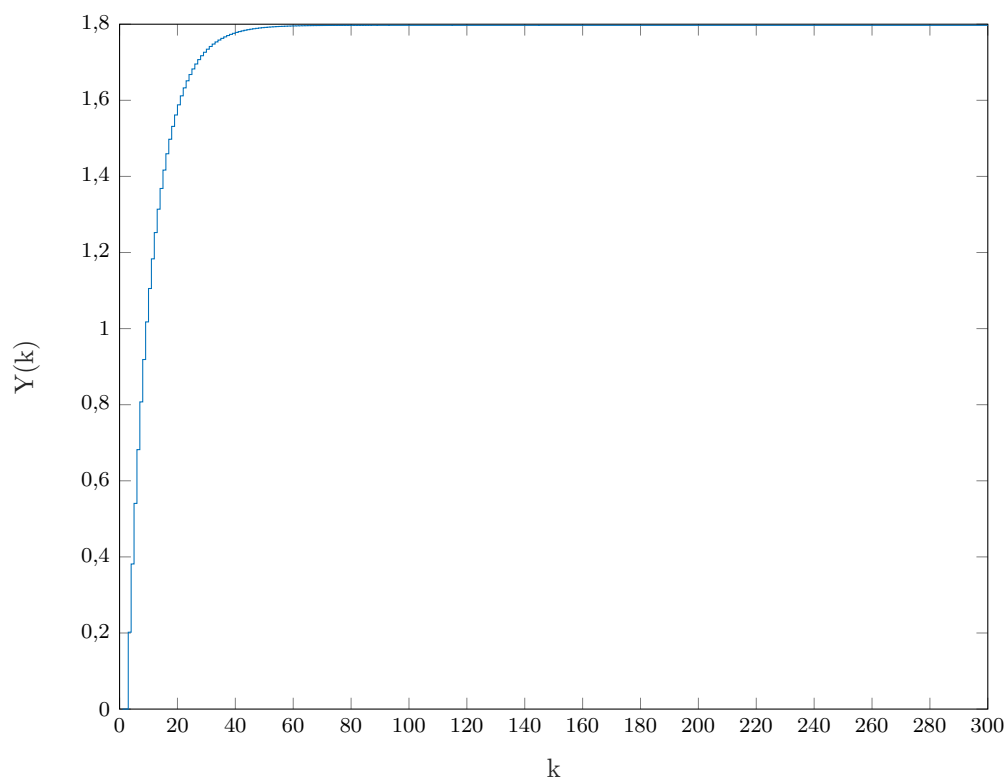
$$K_{Z-Y}^{\text{stat}} = 1,7970 \quad (2.2)$$

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 λ oraz horyzonty predykcji i sterowania.

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

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

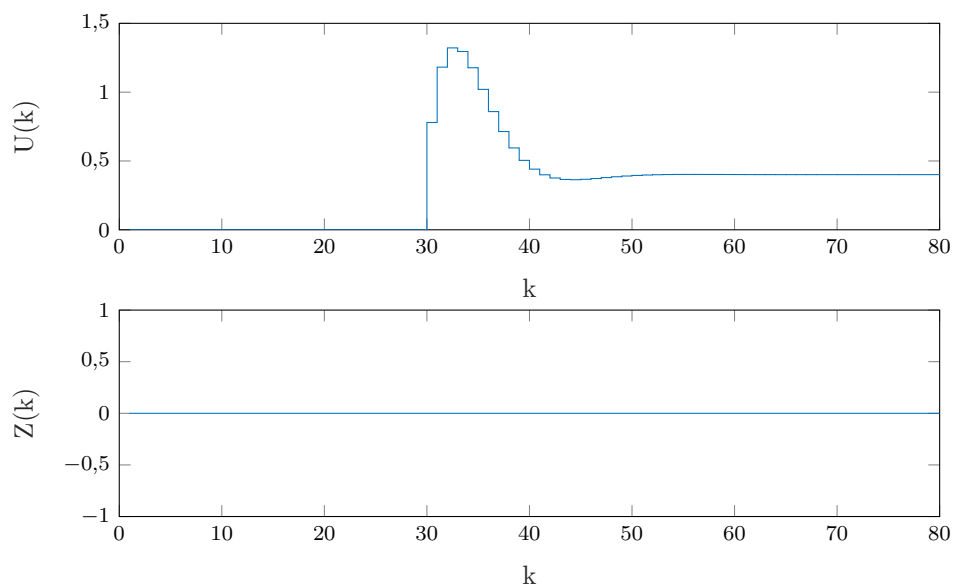
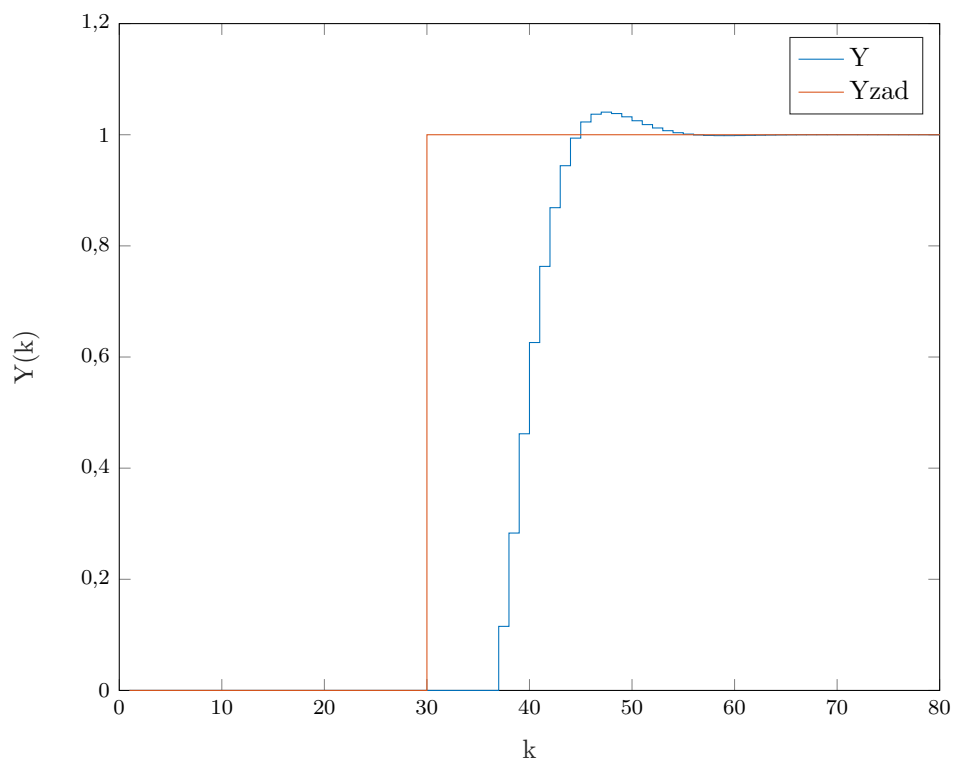
W powyższym wzorze dwa pierwsze elementy sumy odnoszą się do toru sterowanie-wyjście a ostatni element do toru zakłócenie-wyjście: M^{Z^P} macierz wyznaczana przy pomocy współczynników odpowiedzi skokowej dla zakłócenia, $\Delta Z^P(k)$ jest wektorem przyrostów mierzanego zakłócenia.

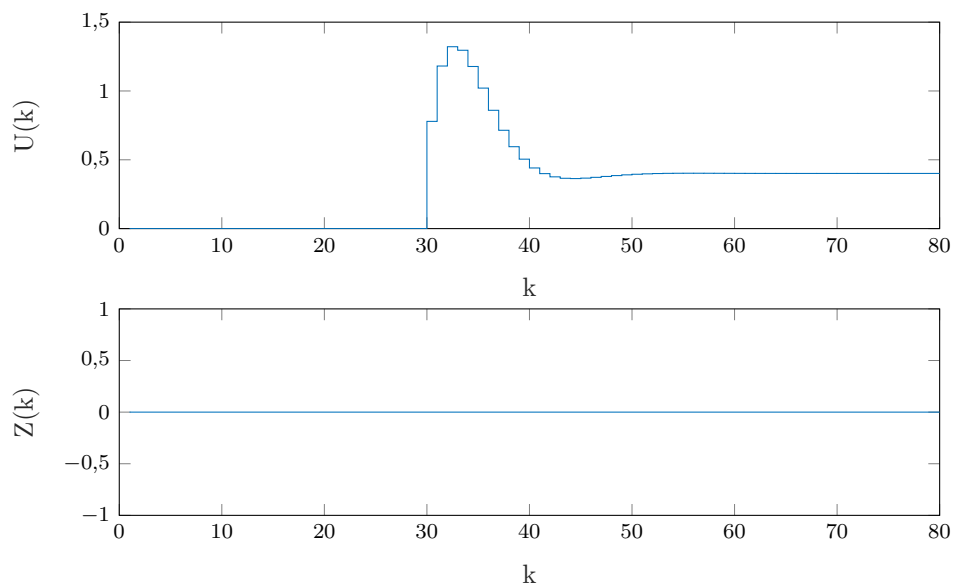
4.1. Strojenie regulatora

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

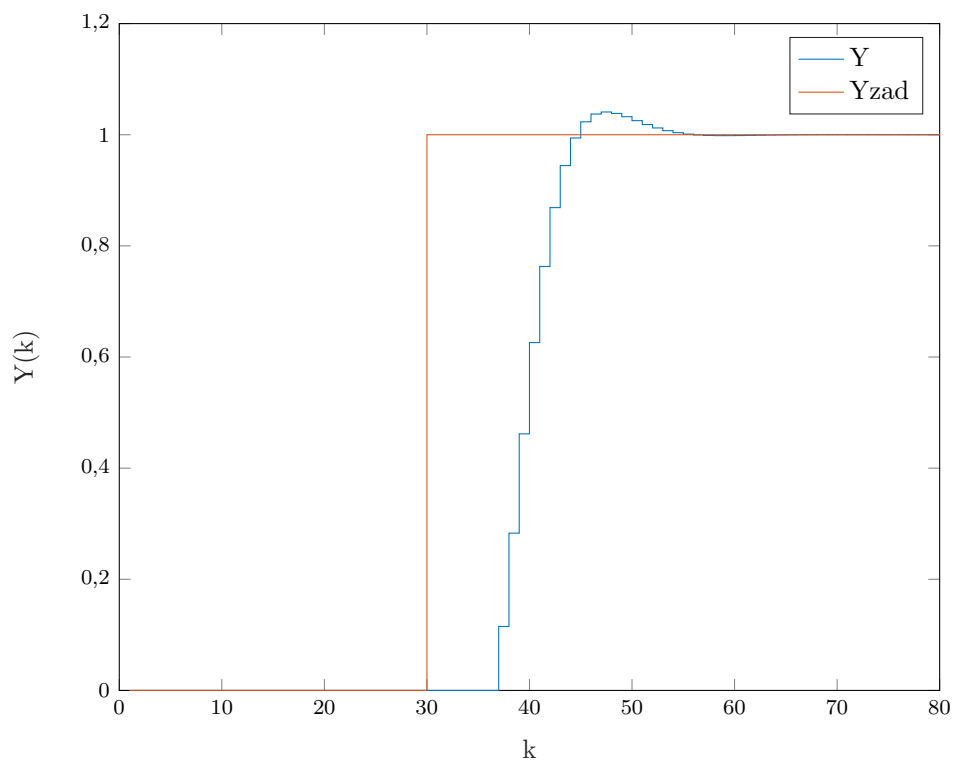
Choryzont dynamiki określono z odpowiedzi skowej toru sterowanie-wyjście (k dla którego wyjście się ustabilizowało): $D=155$. Kolejne parametry były modyfikowane do momentu uzyskania zadowalających efektów. Na początku przyjęto $N = N_u = D = 155$ oraz $\lambda = 1$, następnie zmniejszano kolejno wartość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

4.2. Wyniki strojenia

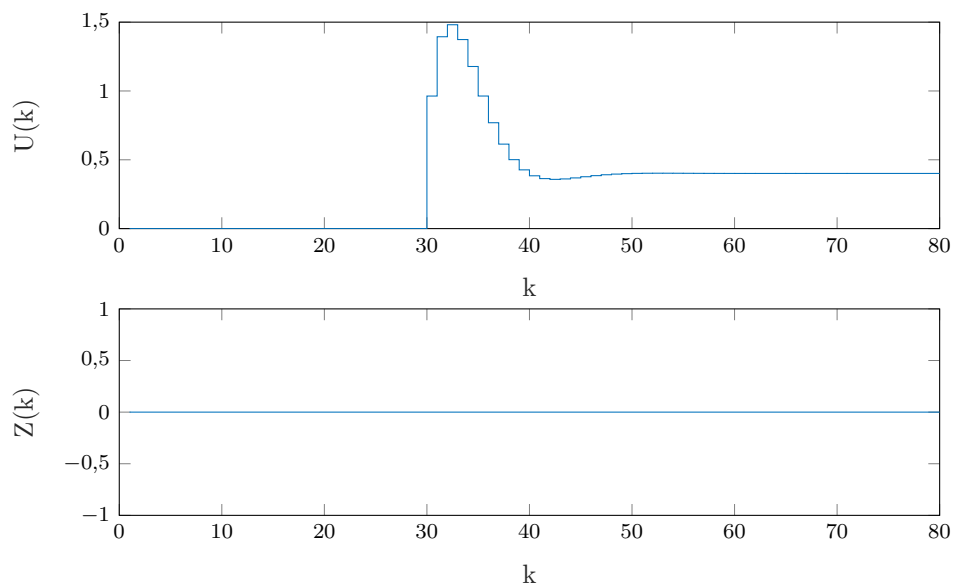
Rys. 4.1. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora: $N = 155$ $N_u = 155$ $\lambda = 1$ Rys. 4.2. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora: $N = 155$ $N_u = 155$ $\lambda = 1$, błąd $E = 8,809637$



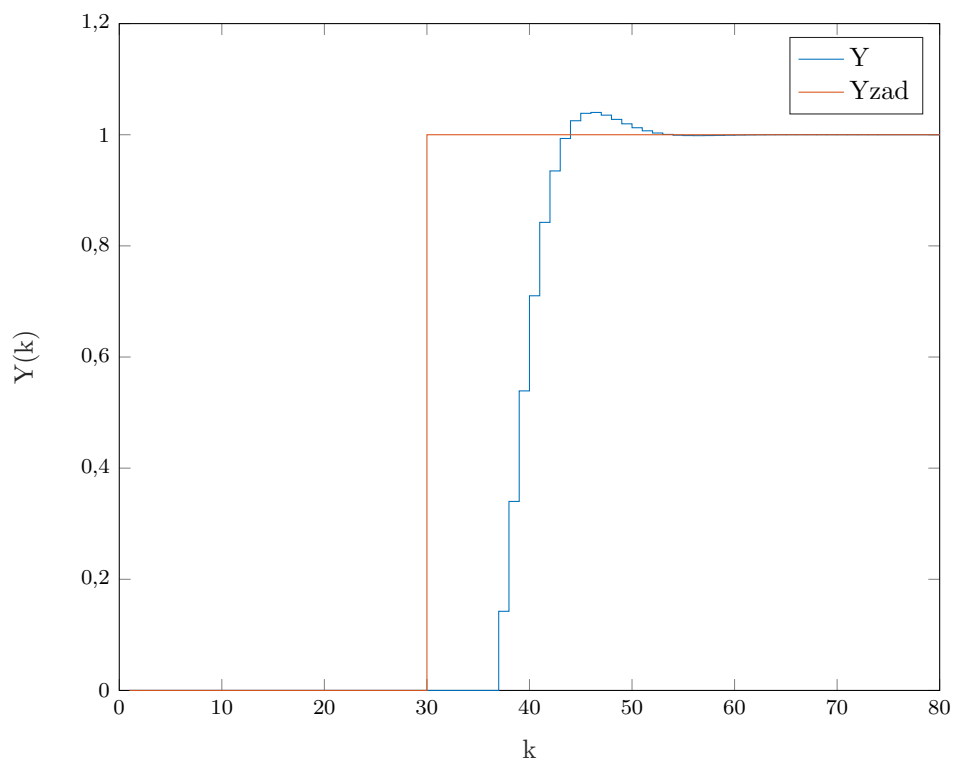
Rys. 4.3. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora: $N = 20$ $N_u = 20$ $\lambda = 1$



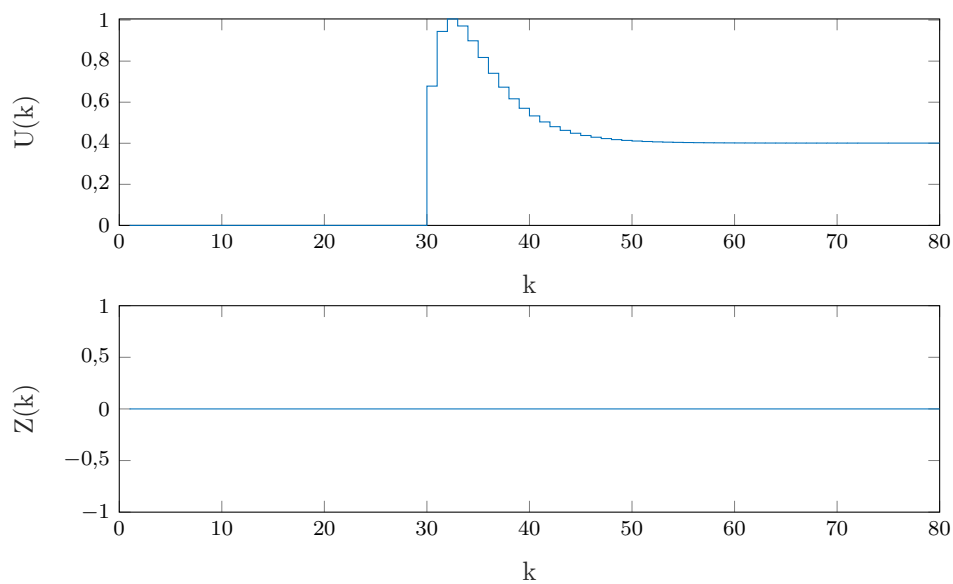
Rys. 4.4. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora: $N = 20$ $N_u = 20$ $\lambda = 1$, błąd $E = 8,810337$



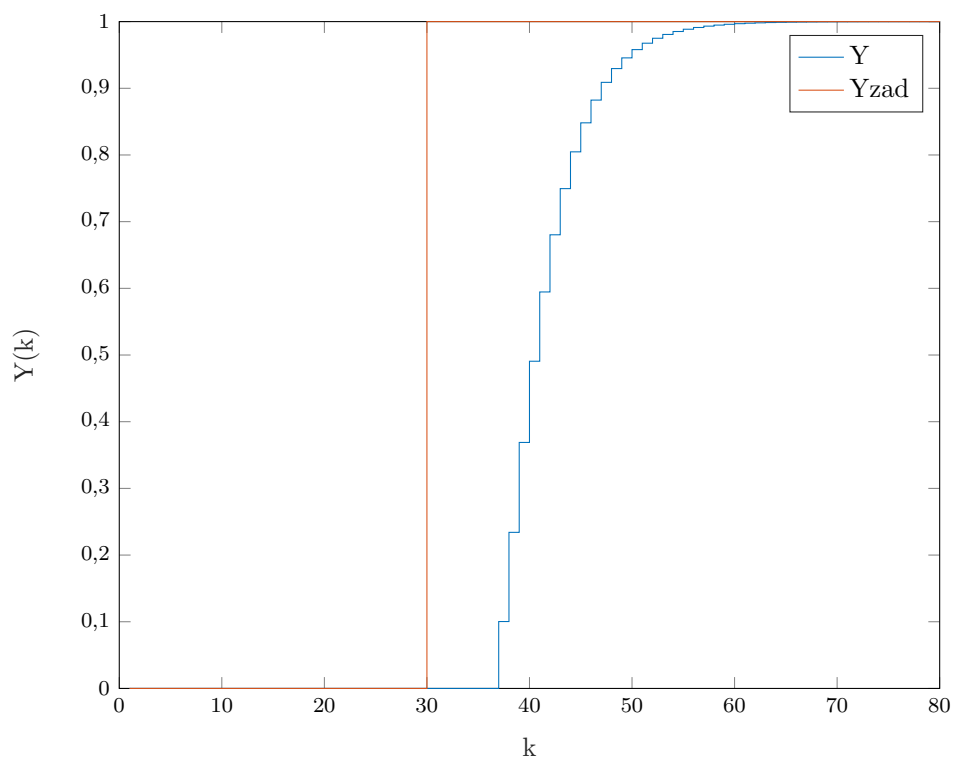
Rys. 4.5. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora: $N = 50$ $N_u = 5$ $\lambda = 1$



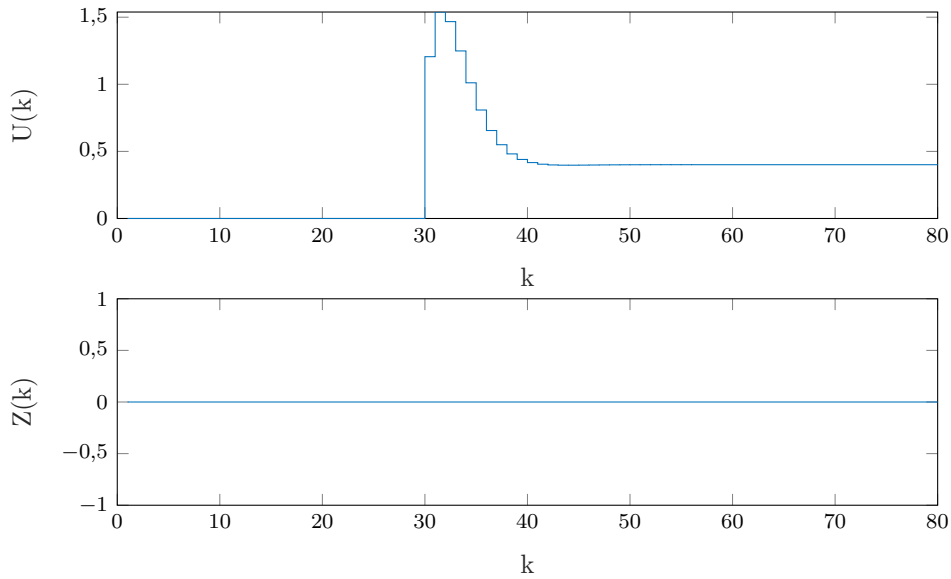
Rys. 4.6. Wyjście obiektu przy parametrach regulatora: $N = 50$ $N_u = 5$ $\lambda = 1$, błąd $E = 8,502866$



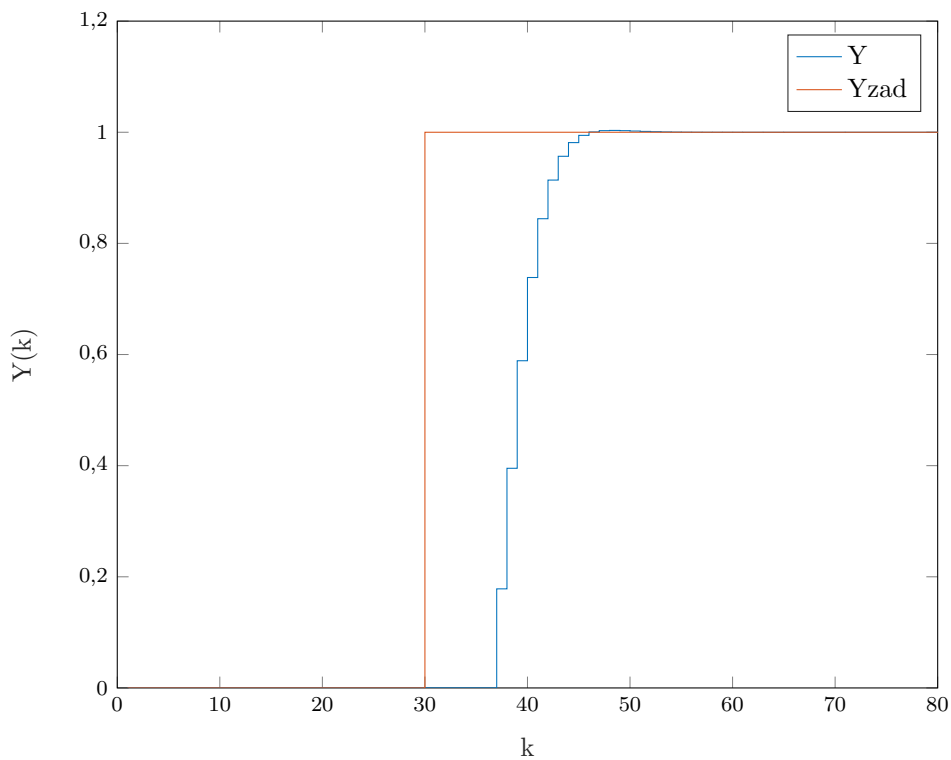
Rys. 4.7. Zakłócenie i sygnał sterujący przy parametrach regulatora: $N = 50$ $N_u = 2$ $\lambda = 1$



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 zmniejsz-

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

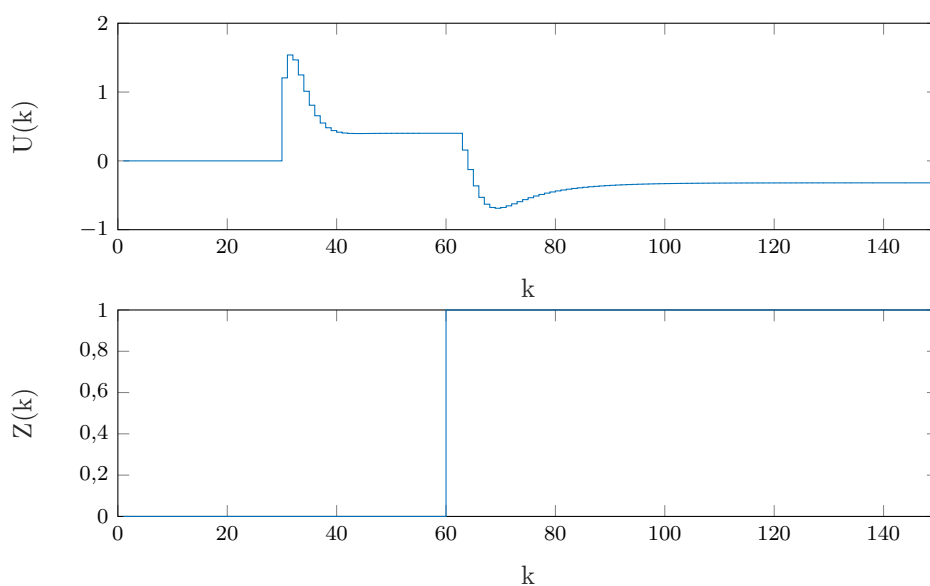
Najbardziej satysfakcjonujące wyniki uzyskano dla: $N_U = 50$ $N = 2$ $\lambda = 0,4$. Dla tak dobranych parametrów wskaźnik jakości regulacji wynosił $E=8,312159$.

5. Regulacja z skokowym zakłóceniem

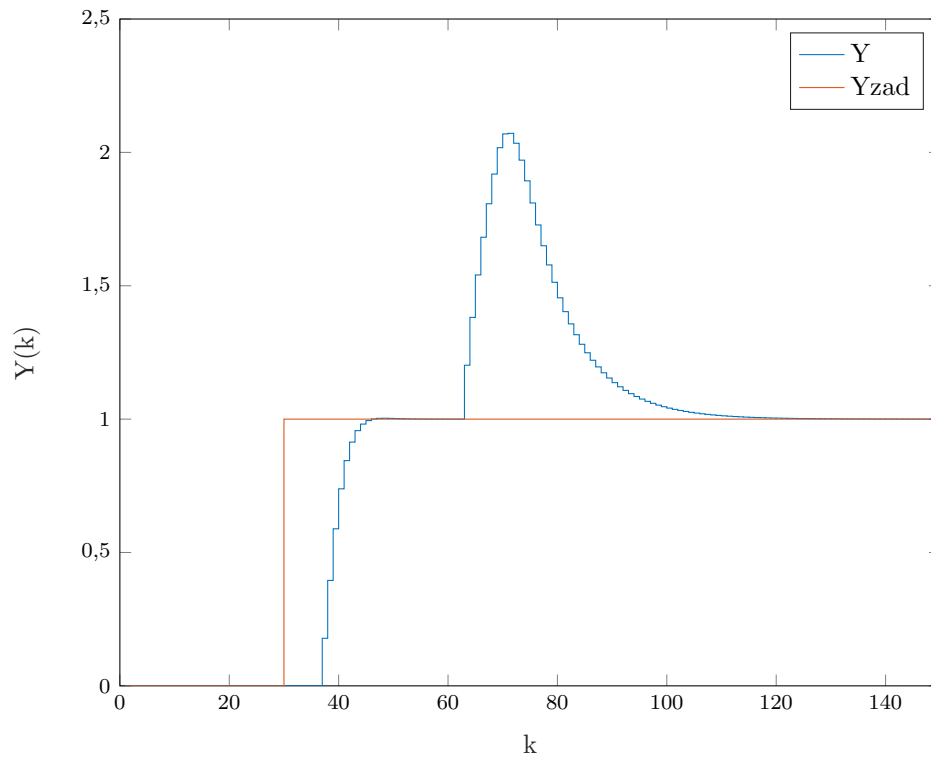
Parametr D^Z został dobrany analogicznie do parametru D: przyjęto go jako wartość k , dla której odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście stabilizuje się: $D^Z = 68$

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

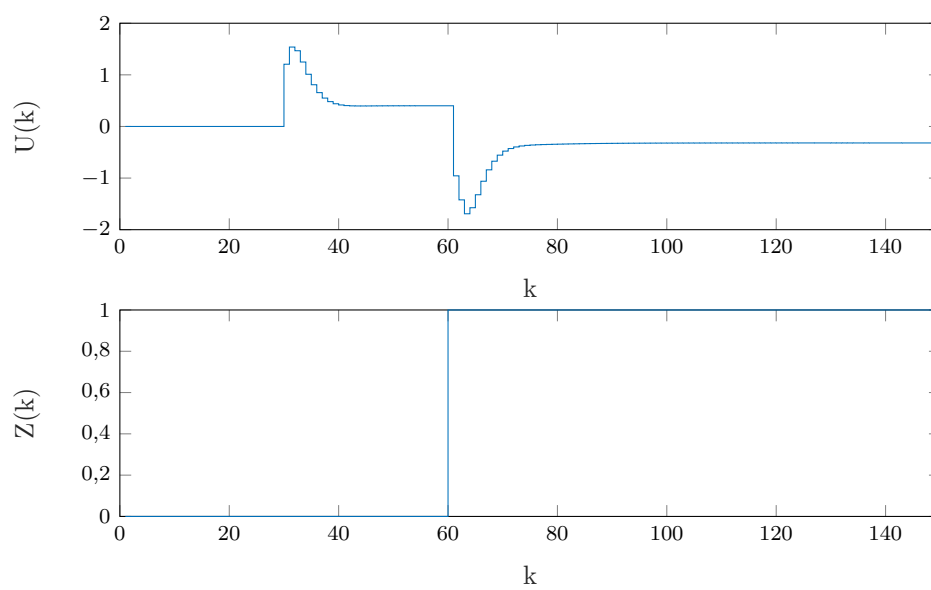
5.1. Bez pomiaru zakłócenia



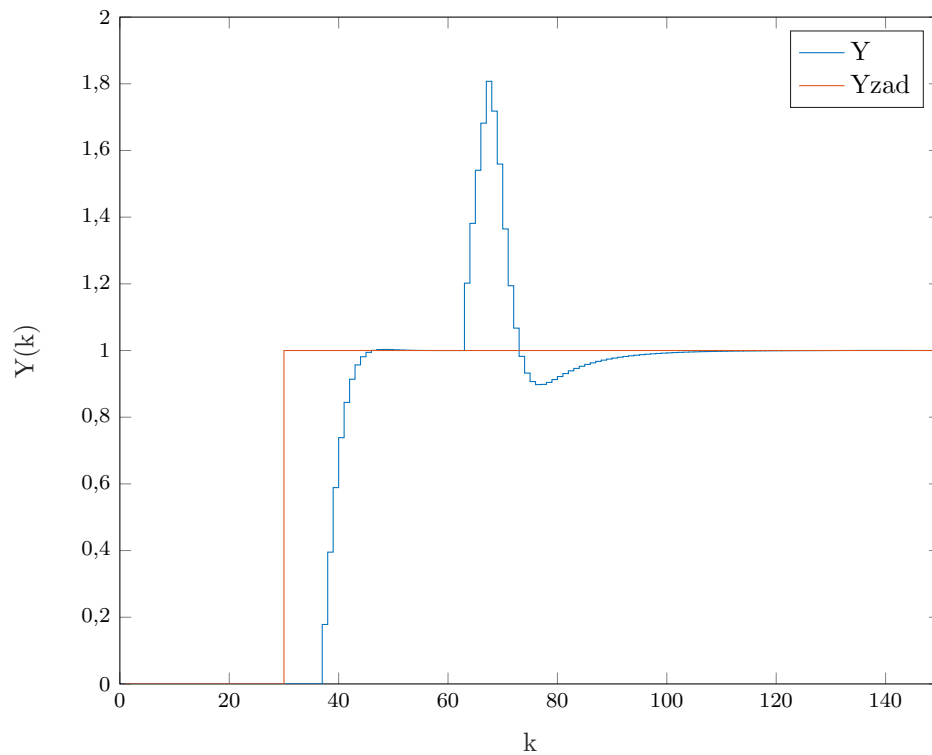
Rys. 5.1. Zakłócenie i sygnał sterujący

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 $E = 10,98983$

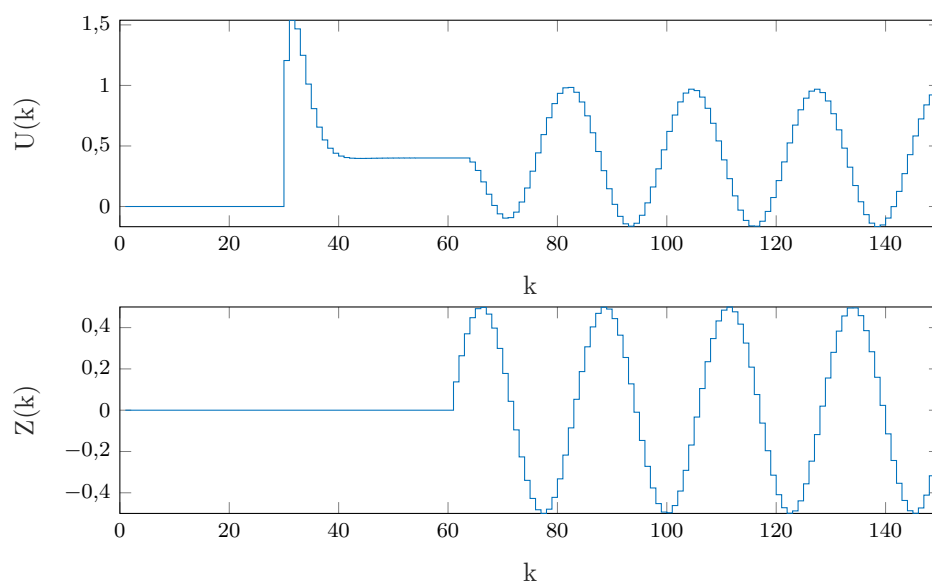
5.3. Wnioski

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

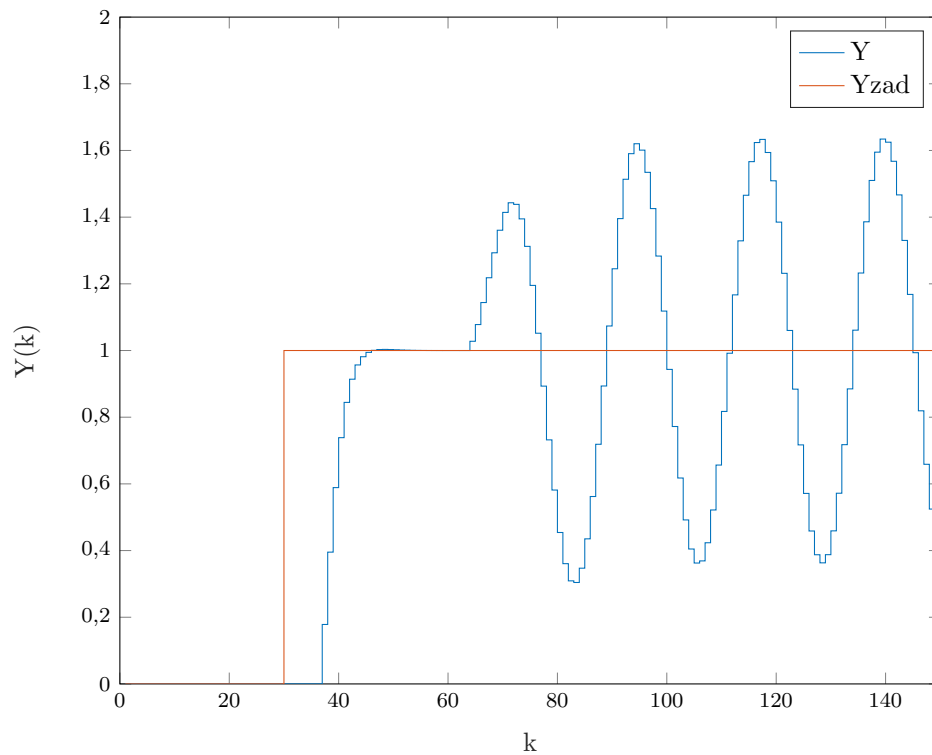
6. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym

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

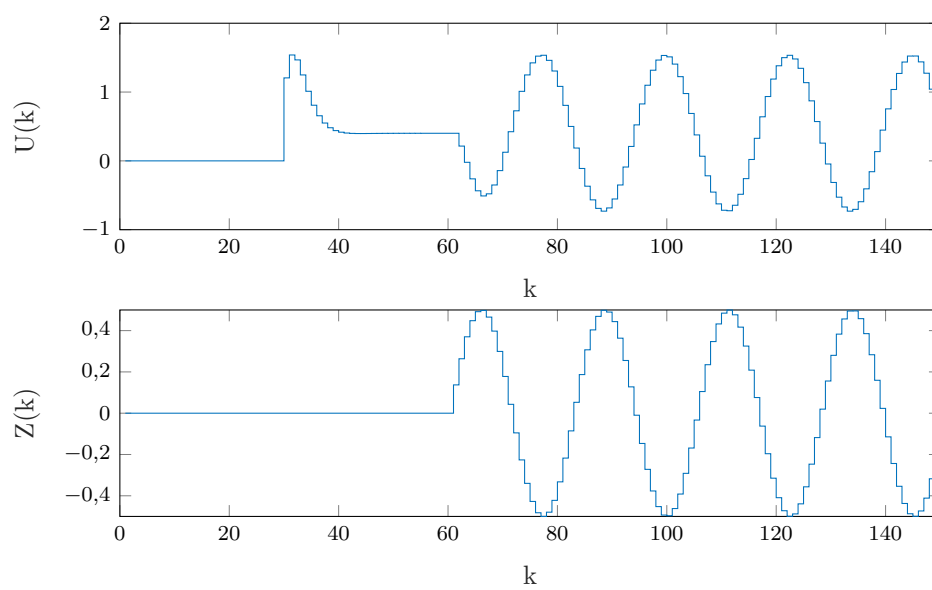
6.1. Bez pomiaru zakłócenia



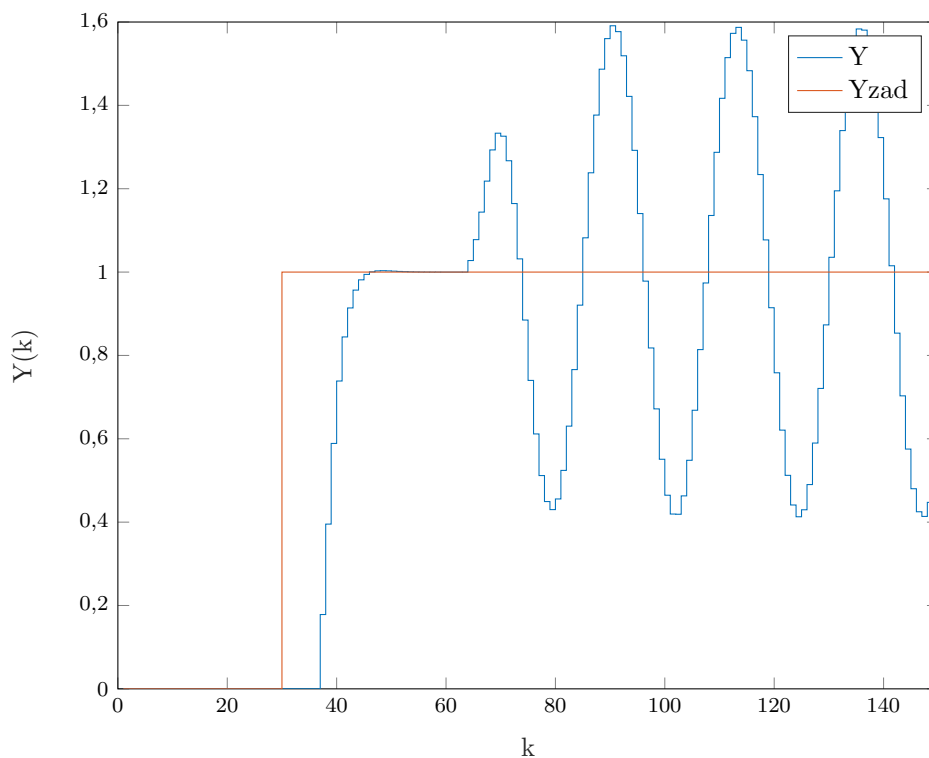
Rys. 6.1. Zakłócenie i sygnał sterujący

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 $E = 22,30000$

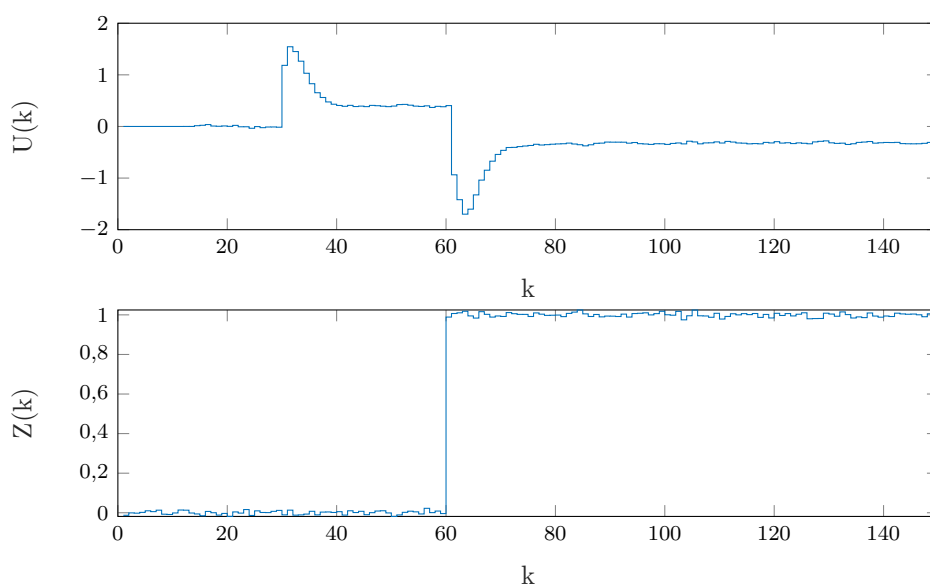
6.3. Wnioski

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 $E=24,84831$).

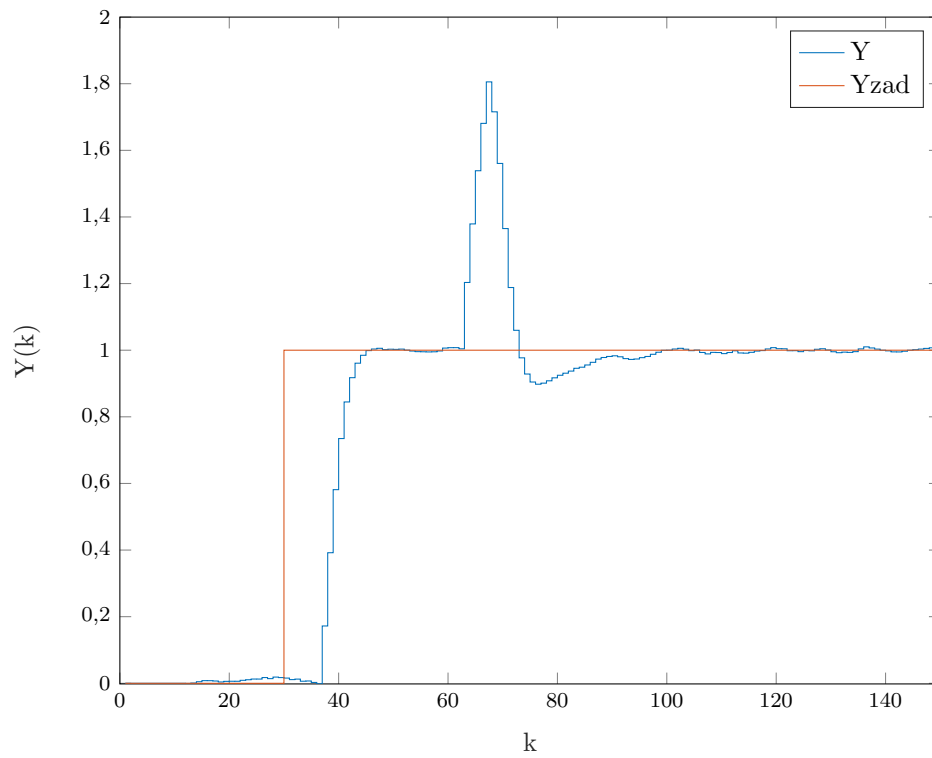
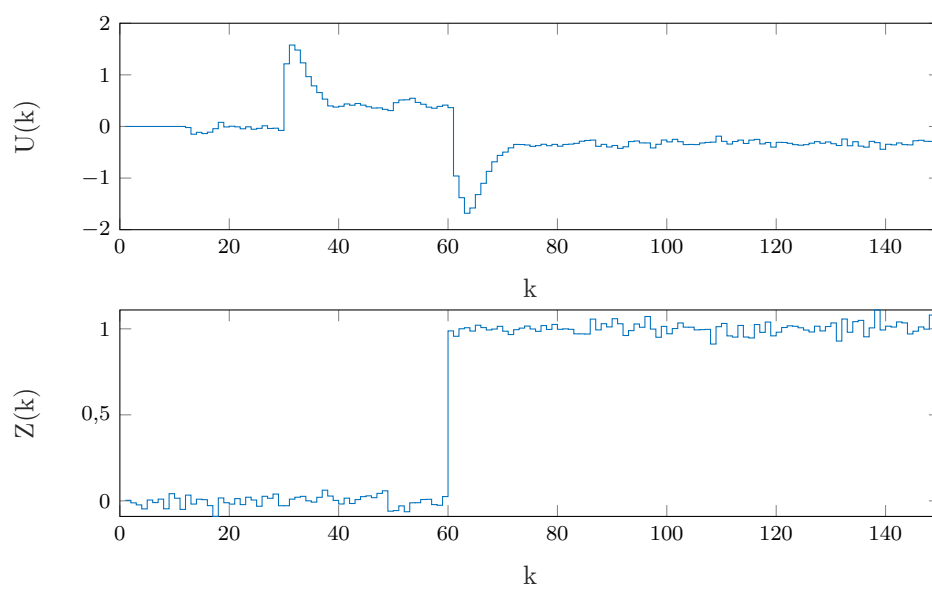
7. Regulacja z skokowym zakłóceniem sinusoidalnym

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

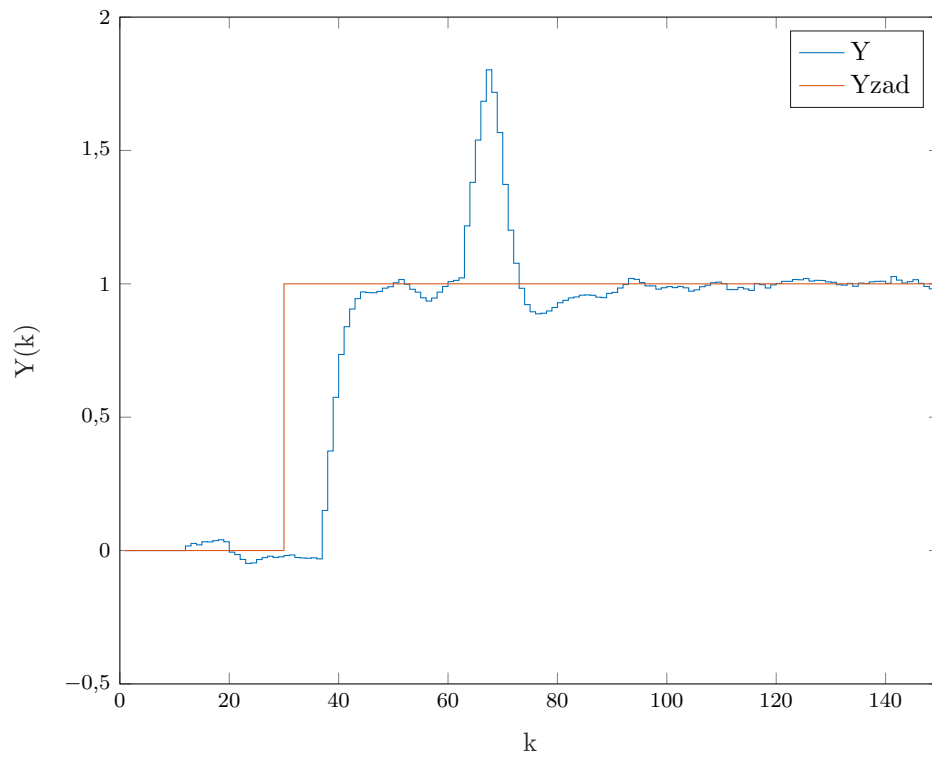
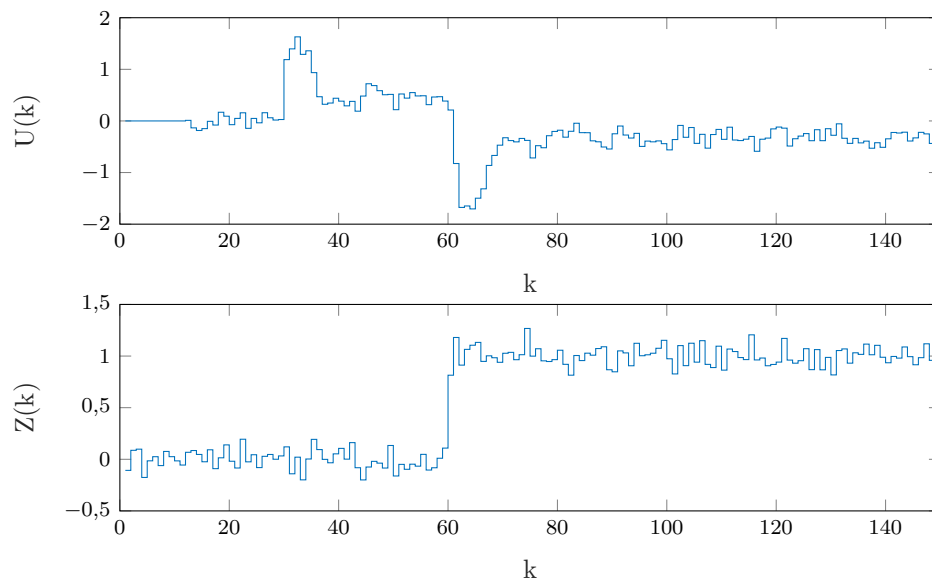
7.1. Szum nałożony na zakłócenie skokowe



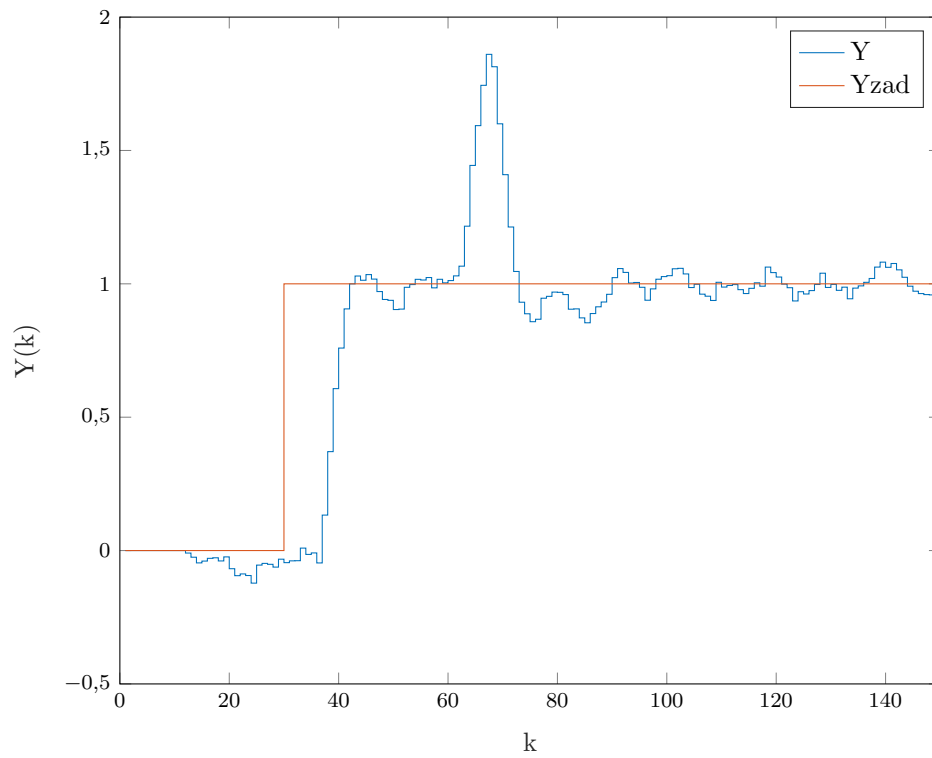
Rys. 7.1. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum mały

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

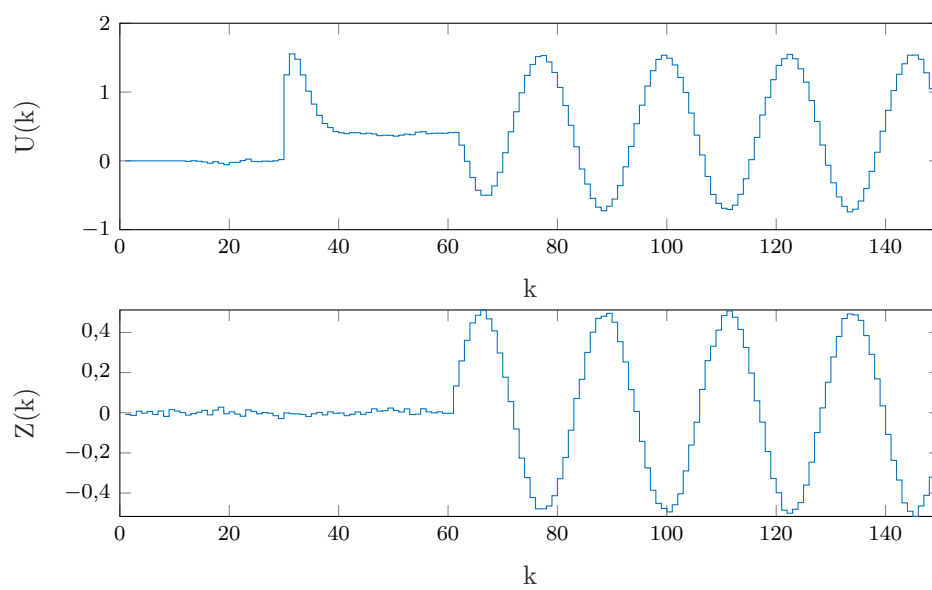
Rys. 7.3. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum średni

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

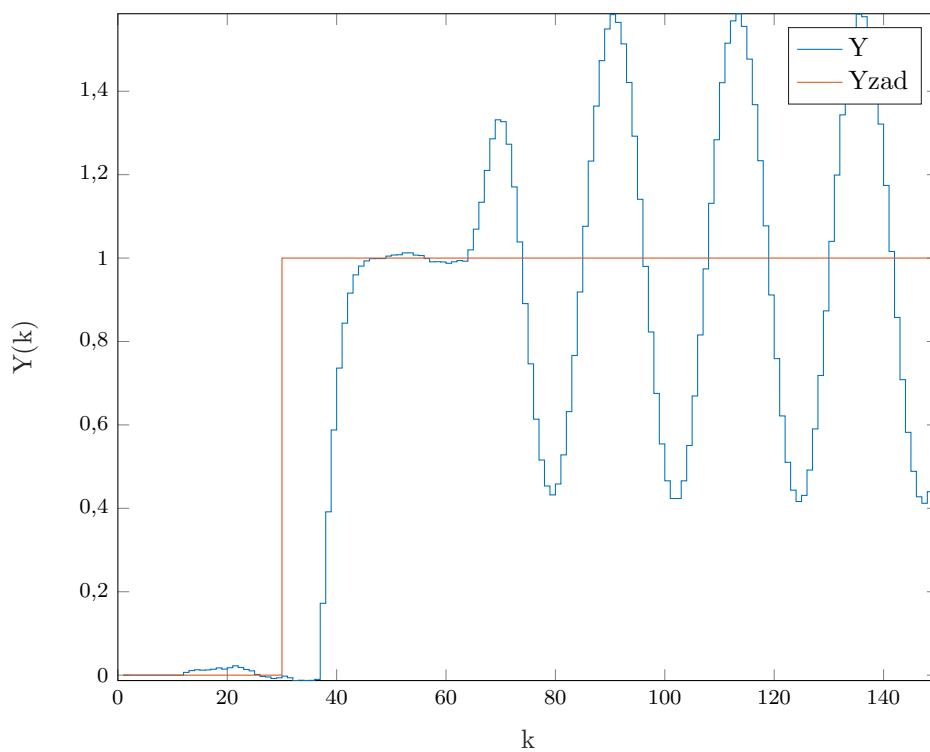
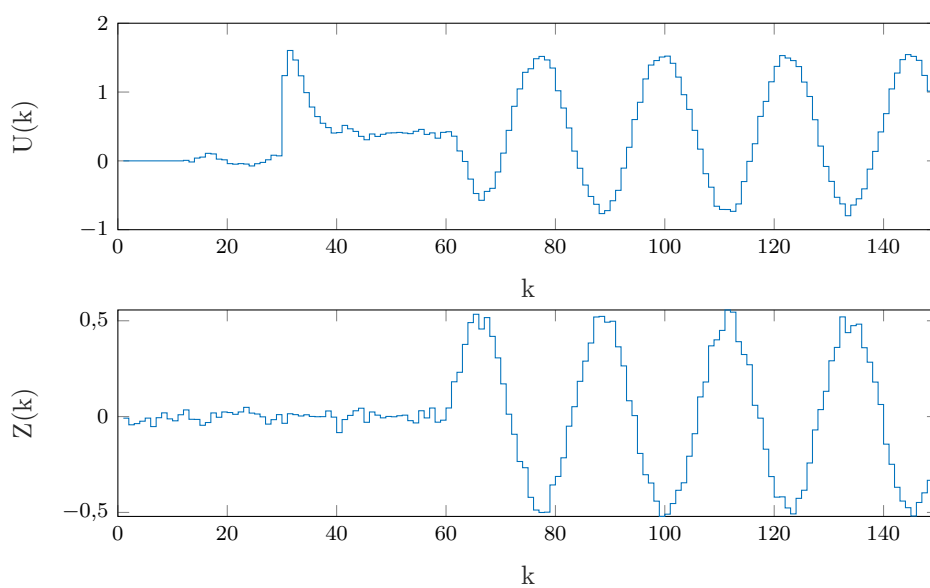
Rys. 7.5. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum duży

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

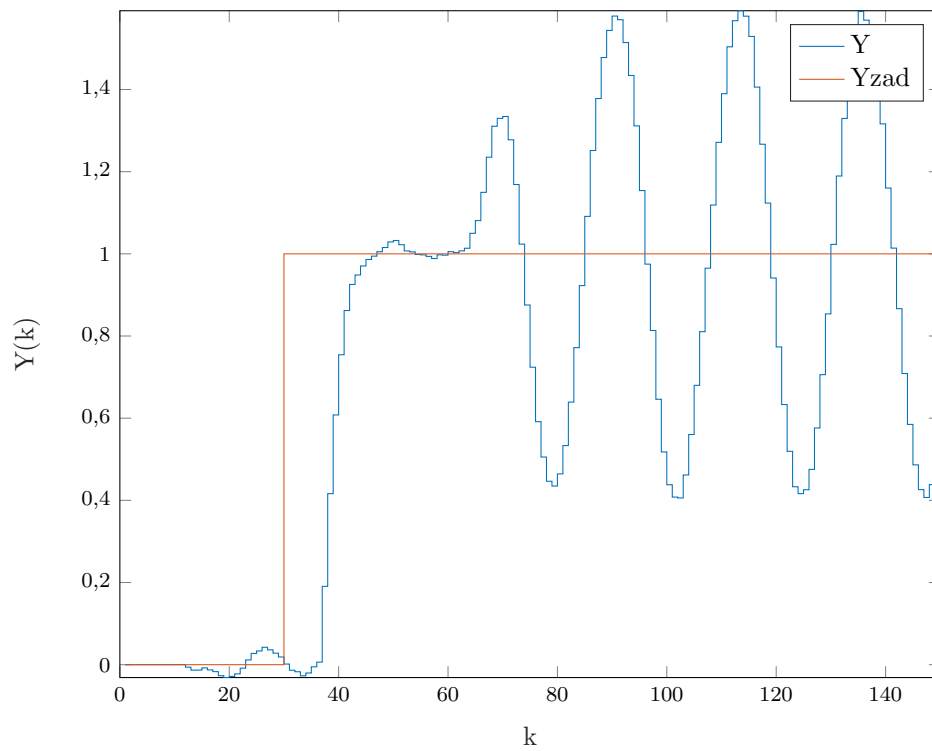
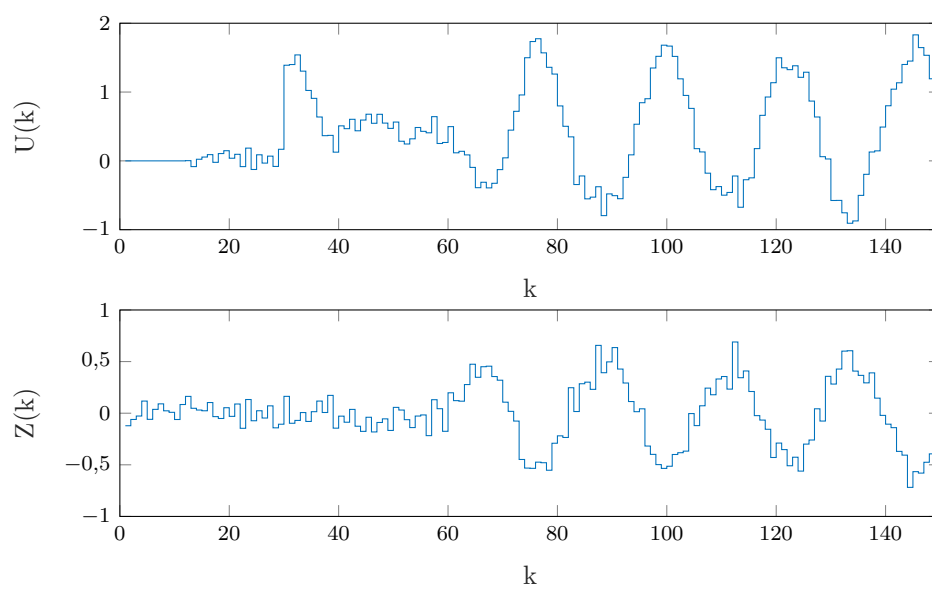
7.2. Szum nałożony na zakłócenie sinusoidalne



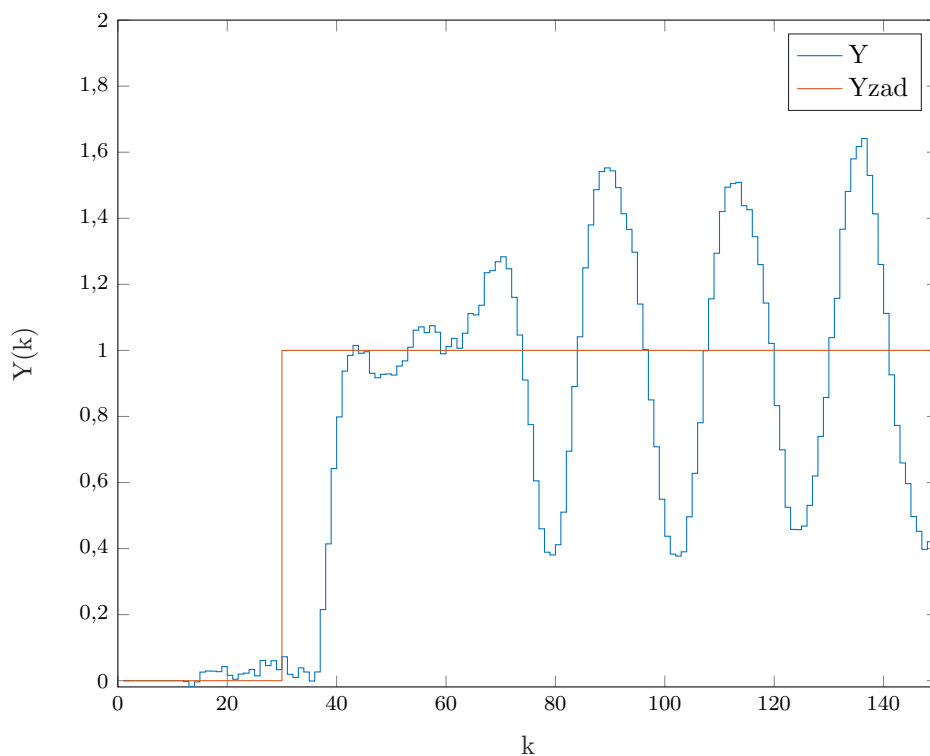
Rys. 7.7. Zakłócenie i sygnał sterujący- szum mały

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 $E = 21,8056$)

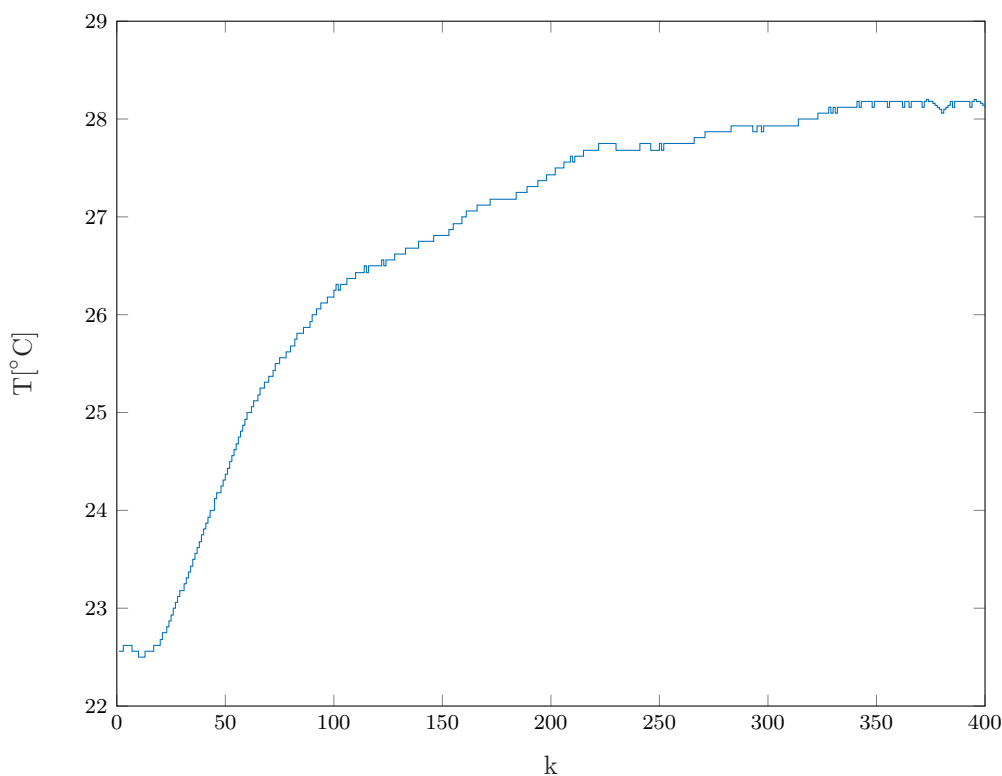
7.3. Wnioski

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

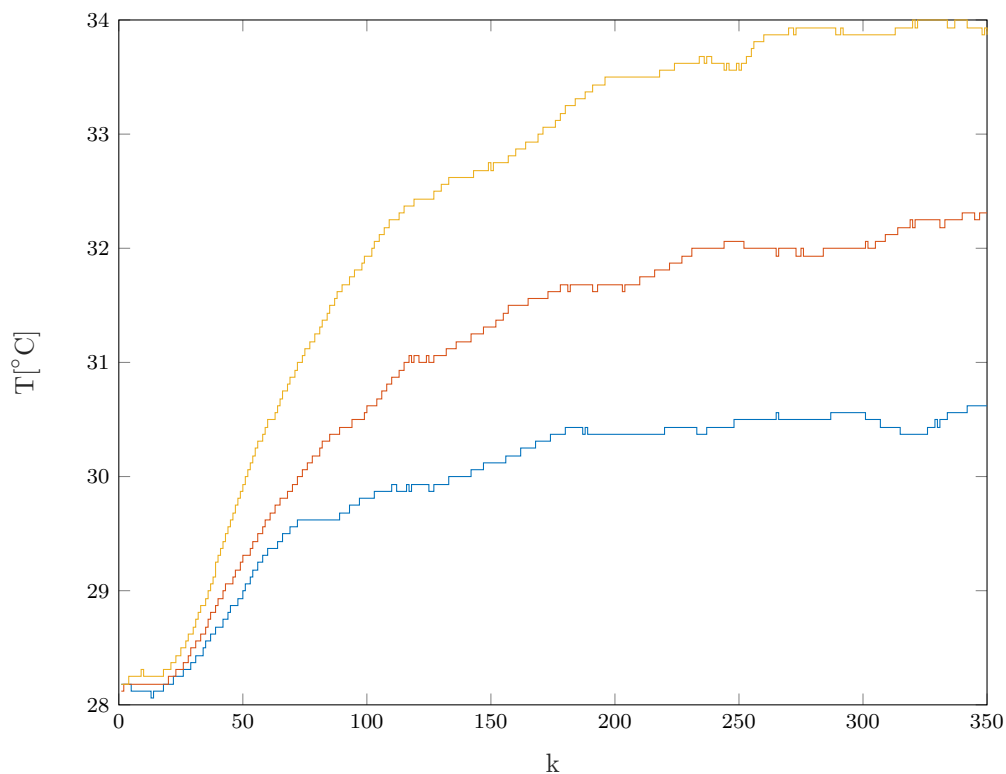
W celu określenia wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy ustawiono moc wentylatora $W1 = 50\%$, a moc grzałki $G1 = 25\%$. Po czasie około 5 minut temperatura odczytywana przez czujnik temperatury zaczęła się stabilizować na poziomie $T1 = 28,2^{\circ}\text{C}$. Niestety z powodu ciągłego ruchu 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

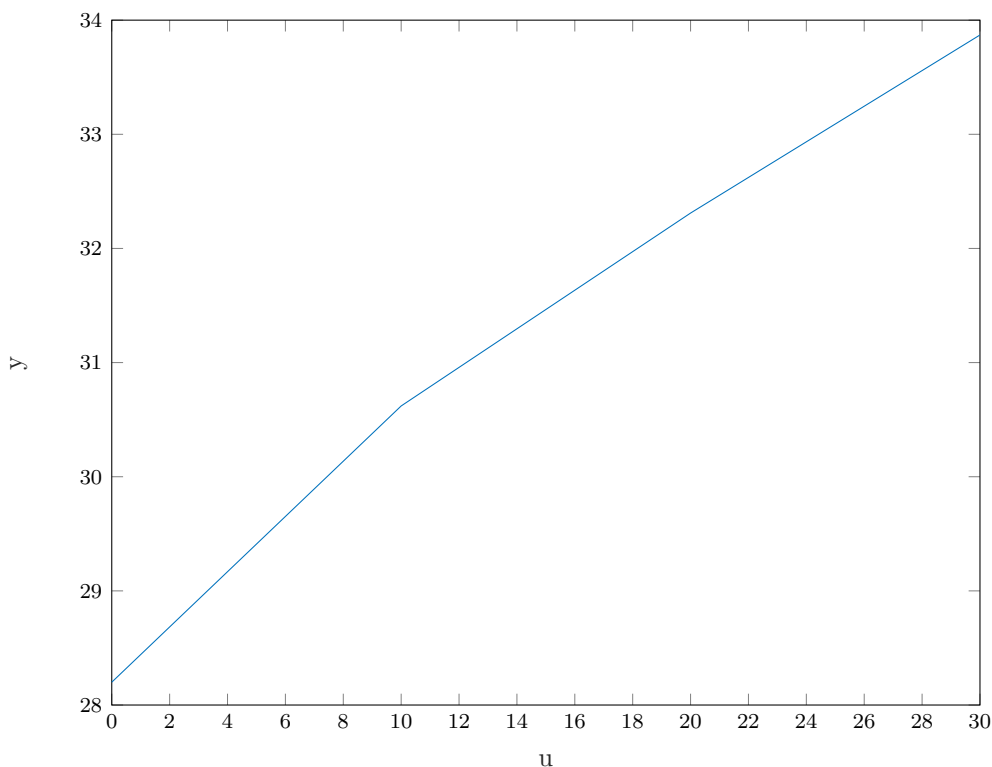
8.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych

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.

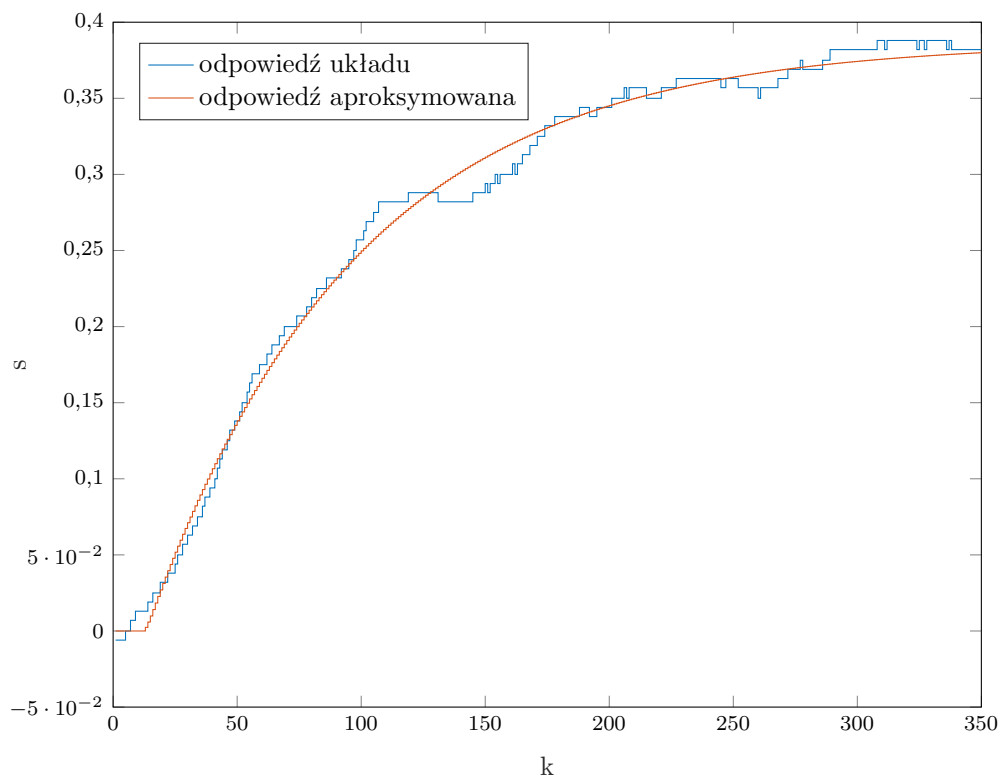
$$K_{stat} = 0,1890 \quad (8.1)$$

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:

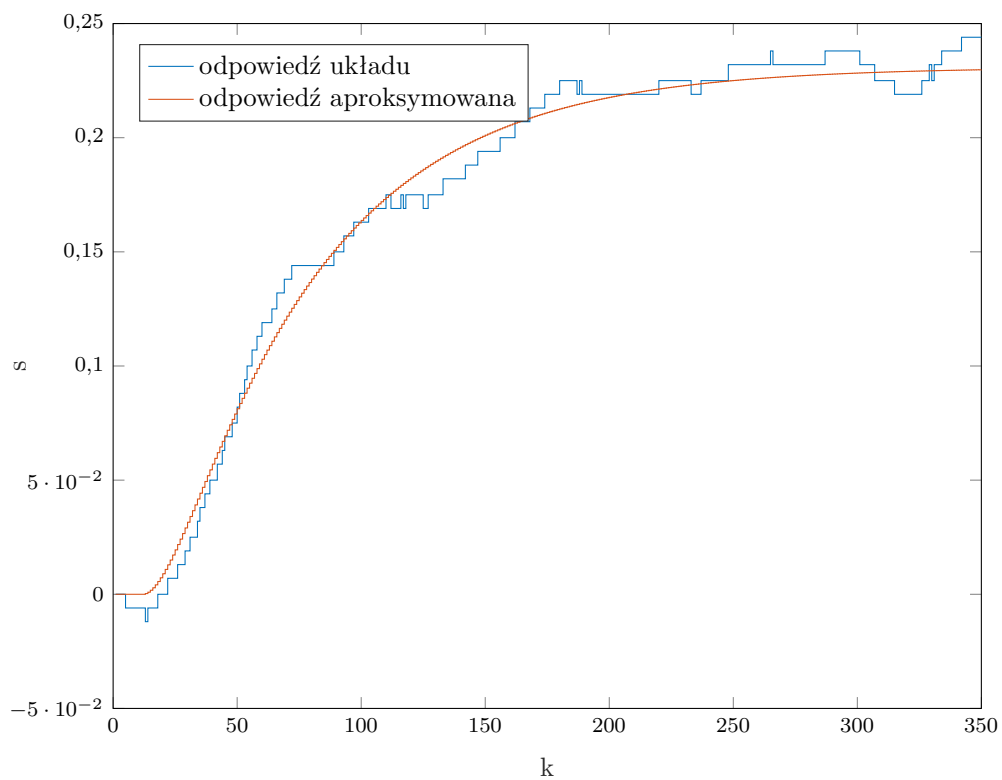
$$S_i = \frac{Y(i) - Y_{pp}}{\Delta U}, \text{ dla } i = 1, 2 \dots D \quad (8.2)$$

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:

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

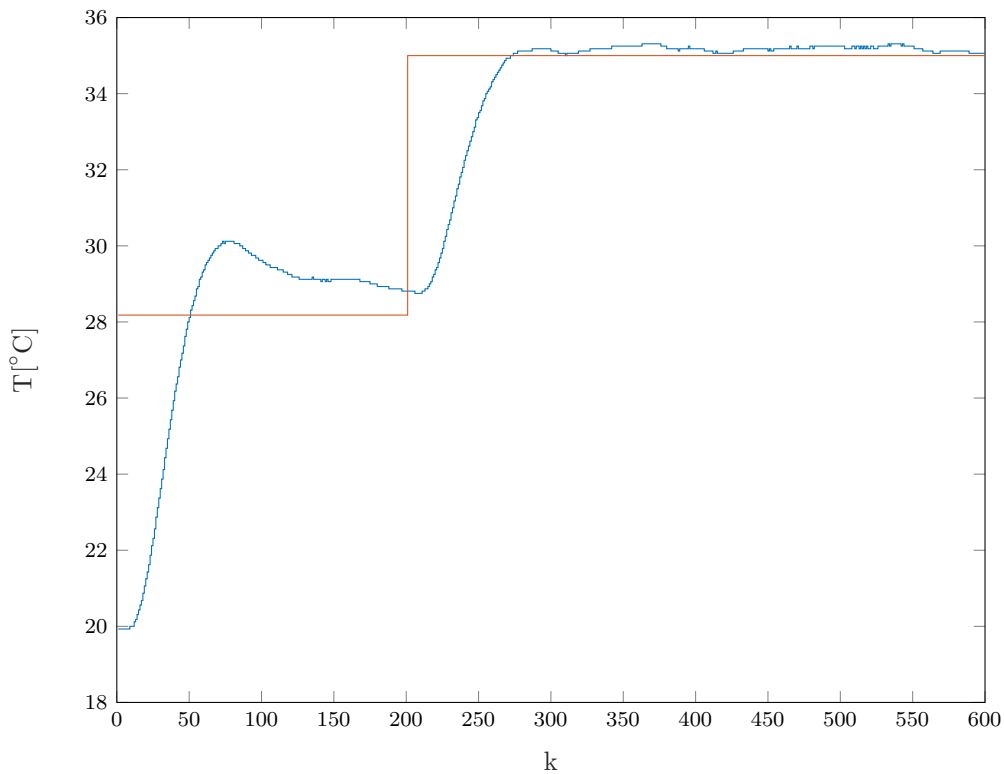
Gdzie $\Delta U(k)$ to wektor N_u (horyzont sterowania) przyszłych wartości sterowania, $Y^0(k)$ to przewidywana odpowiedź z modelu procesu, K - macierz policzona raz na początku ze współczynników odpowiedzi skokowej, uwzględniając wybrany współczynnik λ oraz horyzonty predykcji i sterowania.

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

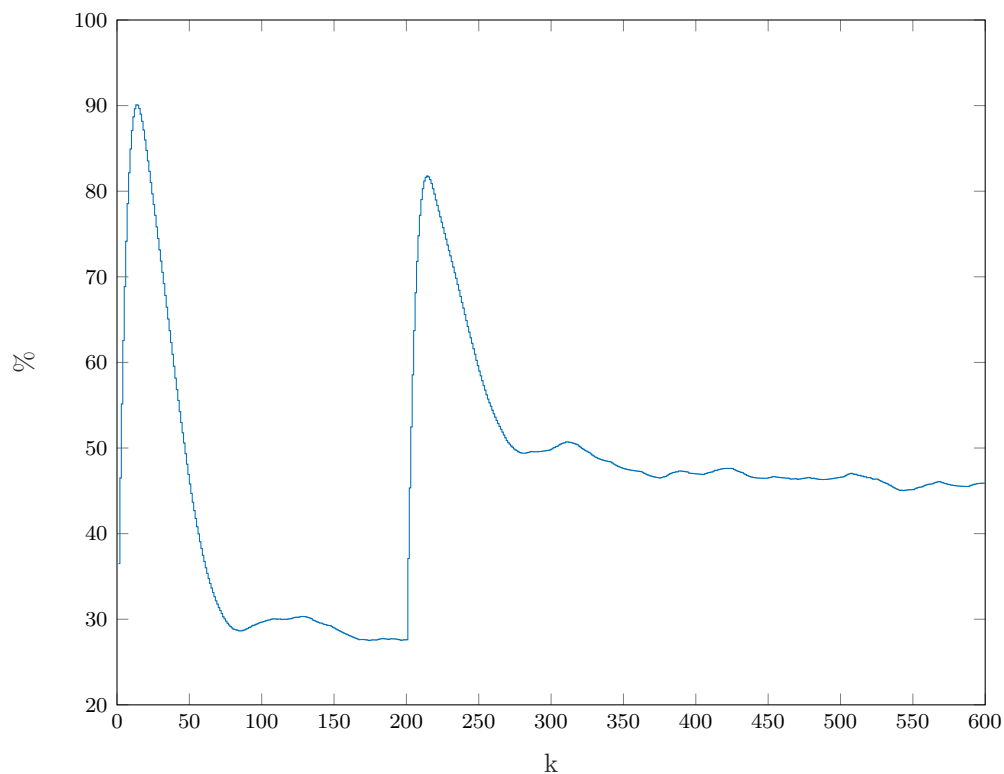
$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) + M^{Z^P} \Delta Z^P(k) \quad (8.4)$$

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:

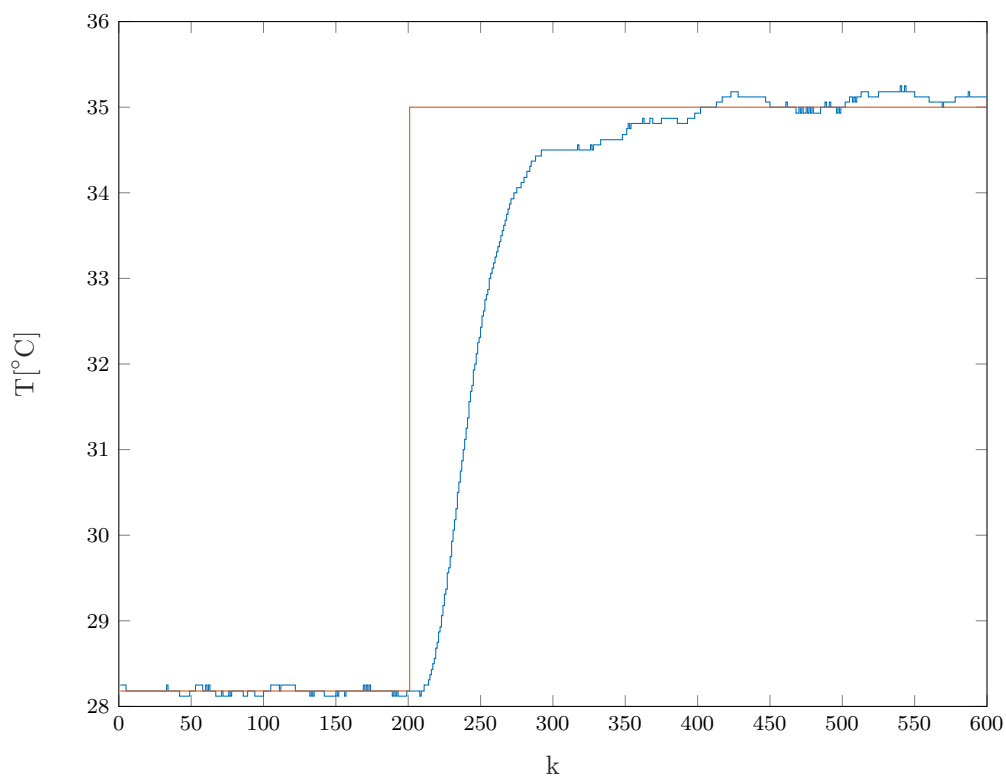


Rys. 8.6. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 90$, $N_u = 10$, $\lambda = 0.4$

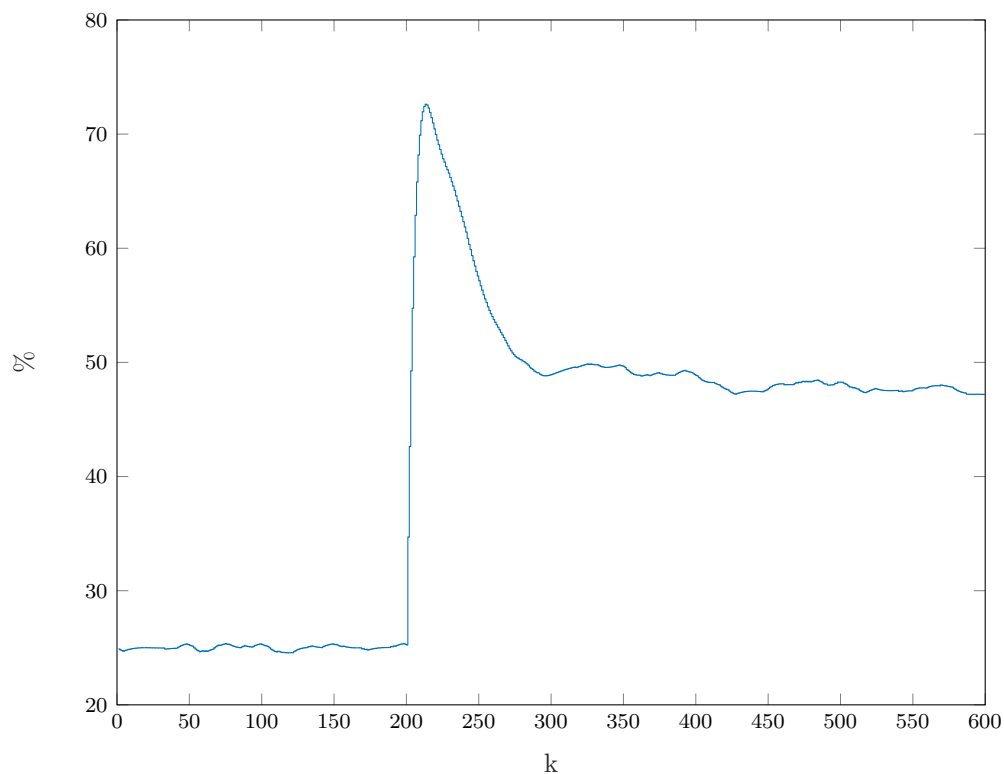


Rys. 8.7. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 90$, $N_u = 10$, $\lambda = 0,4$

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

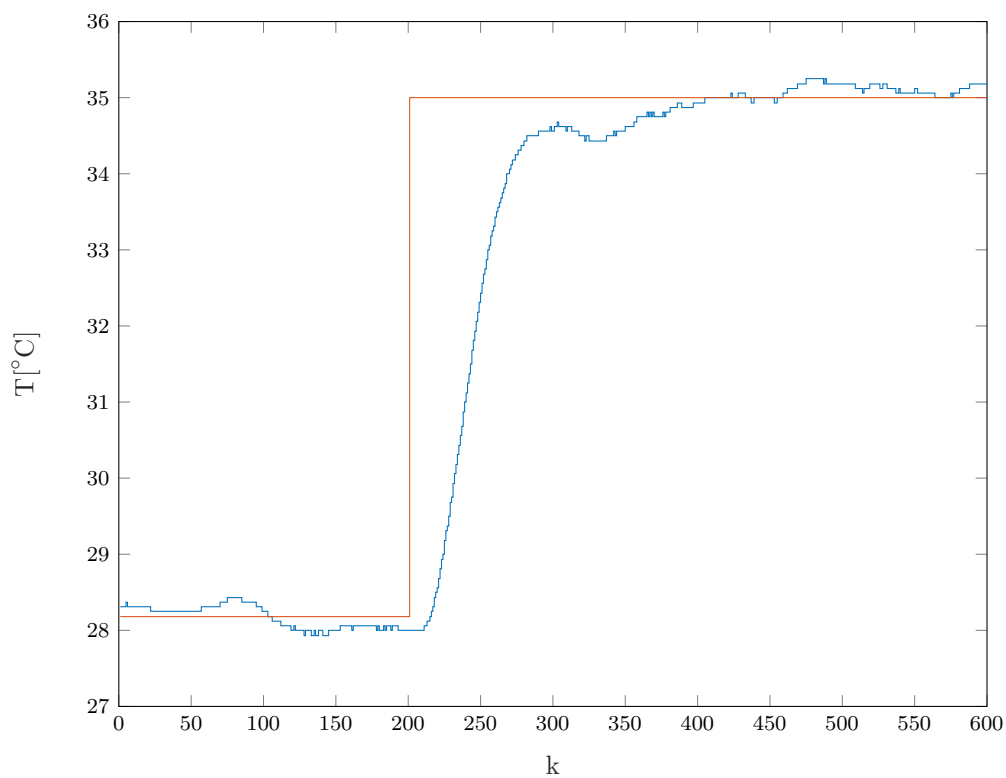


Rys. 8.8. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 1$

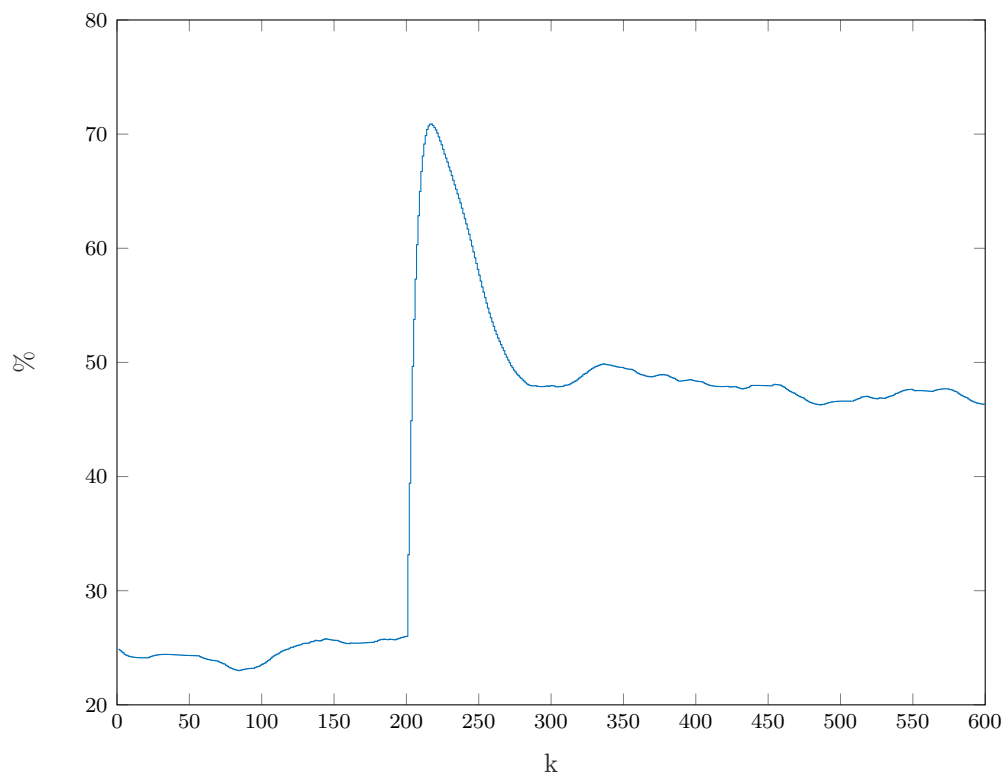


Rys. 8.9. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 1$

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

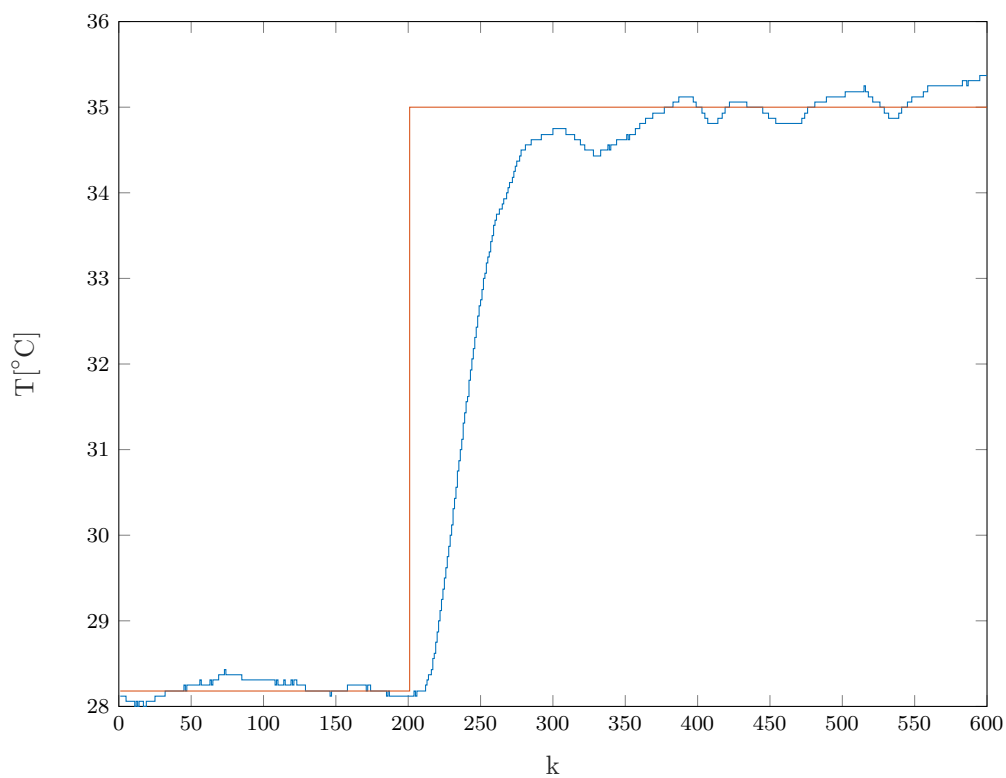


Rys. 8.10. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 2$

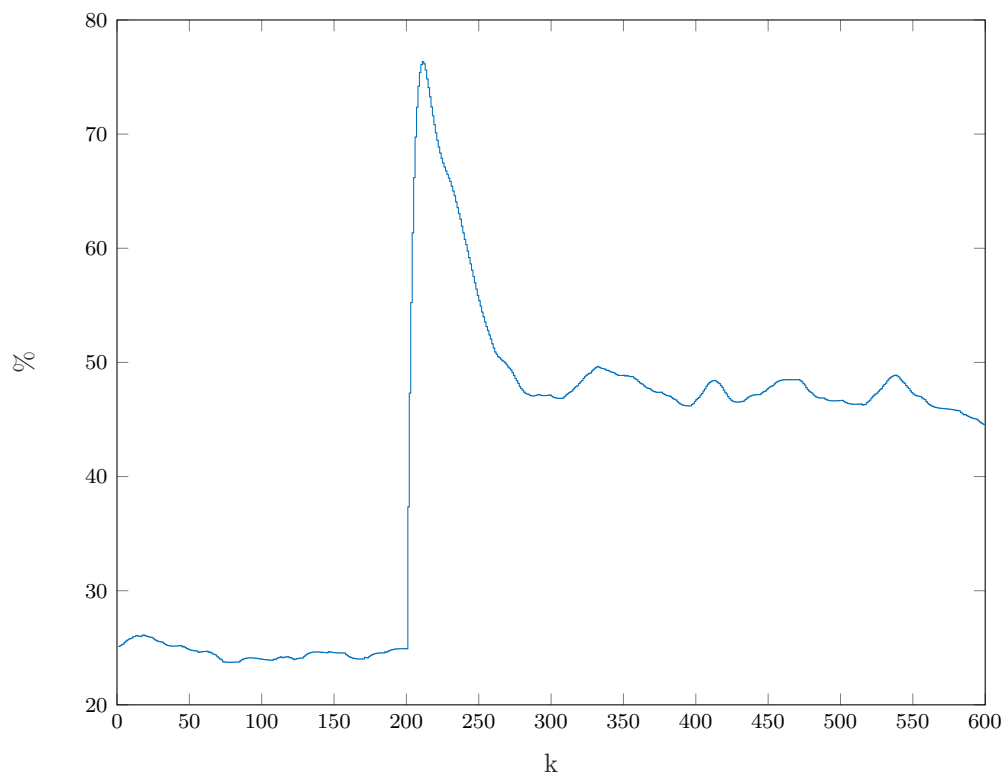


Rys. 8.11. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 2$

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

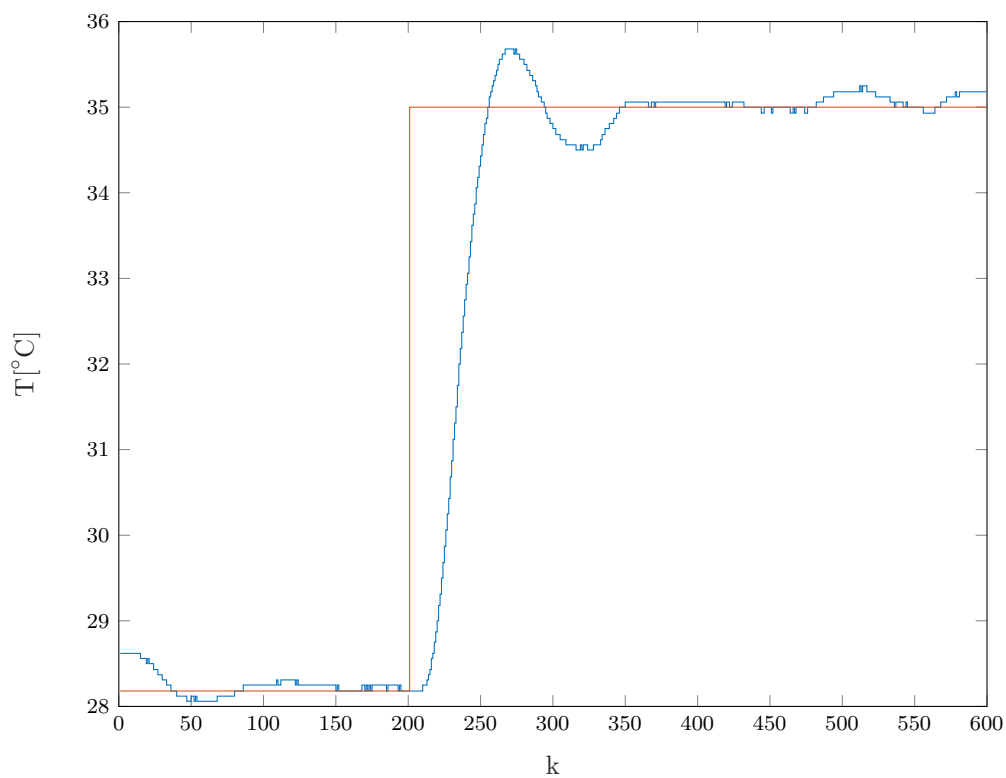


Rys. 8.12. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 0,4$

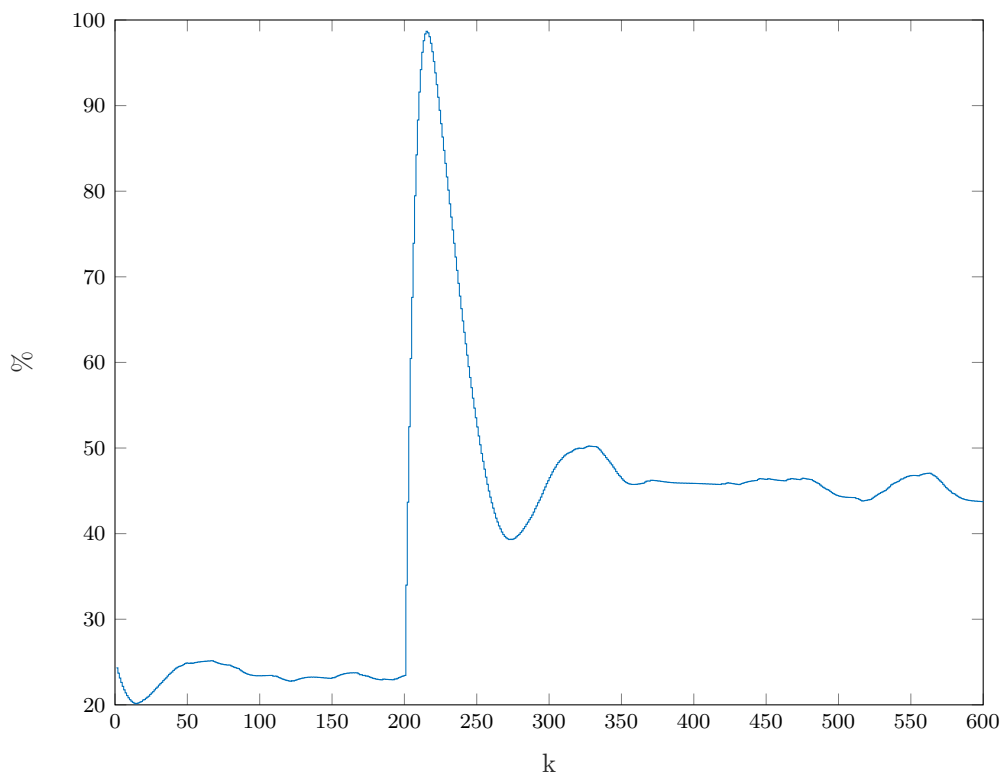


Rys. 8.13. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 60$, $N_u = 5$, $\lambda = 0,4$

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



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



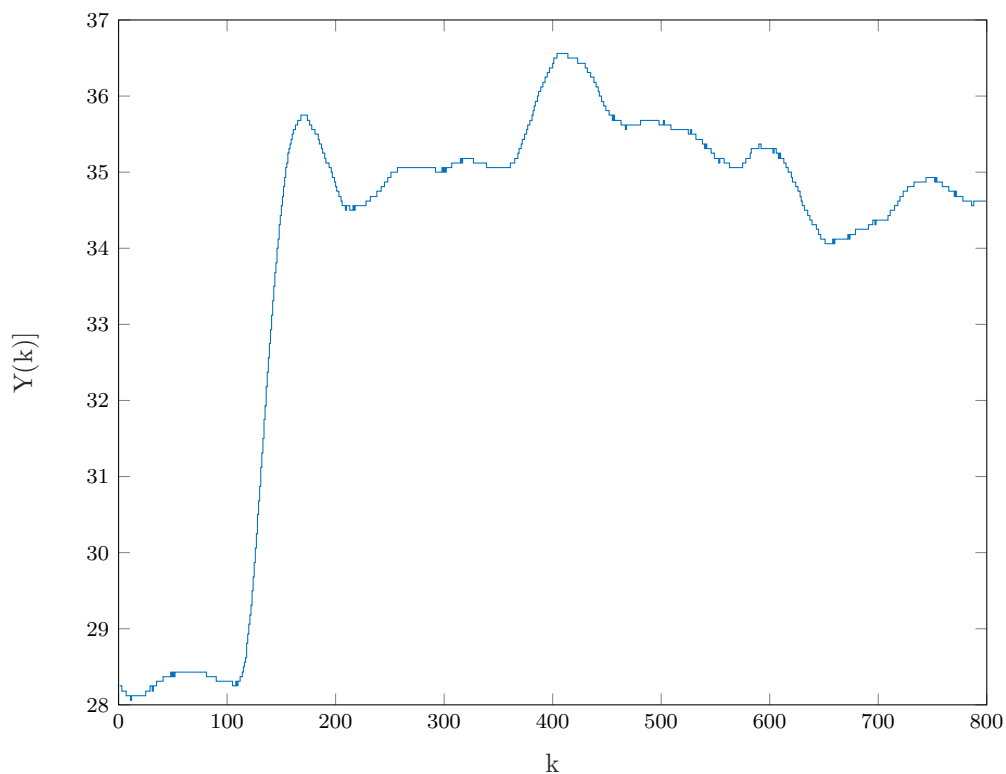
Rys. 8.15. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 30$, $N_u = 1$, $\lambda = 0,4$

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

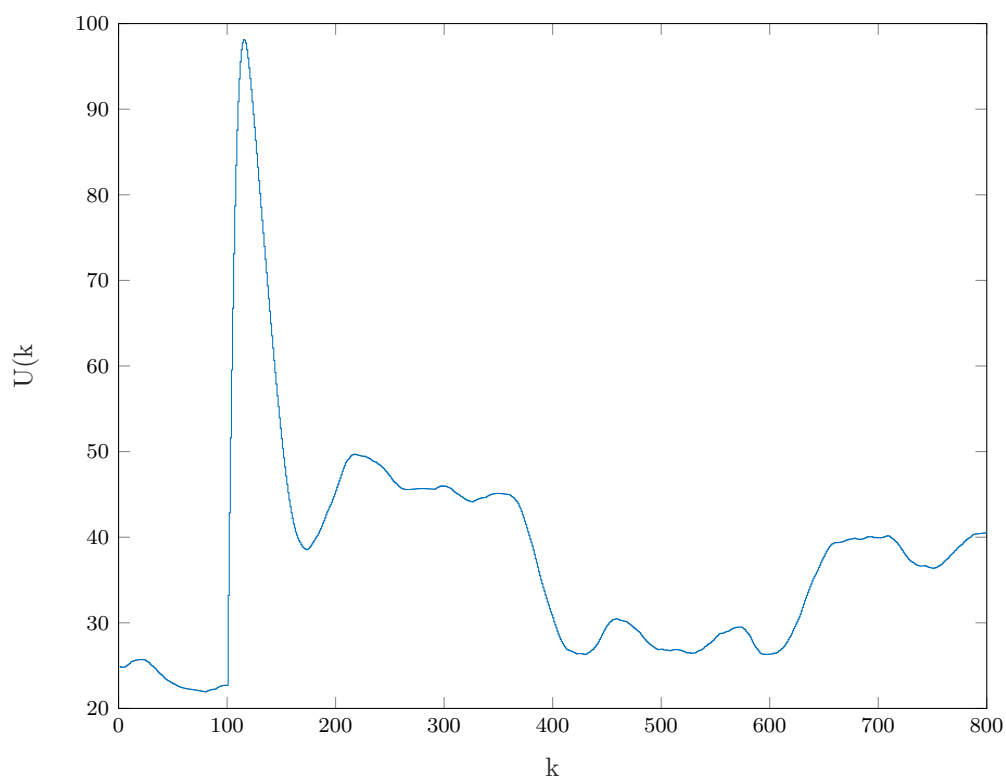
8.5. Dobór parametru D^z

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.



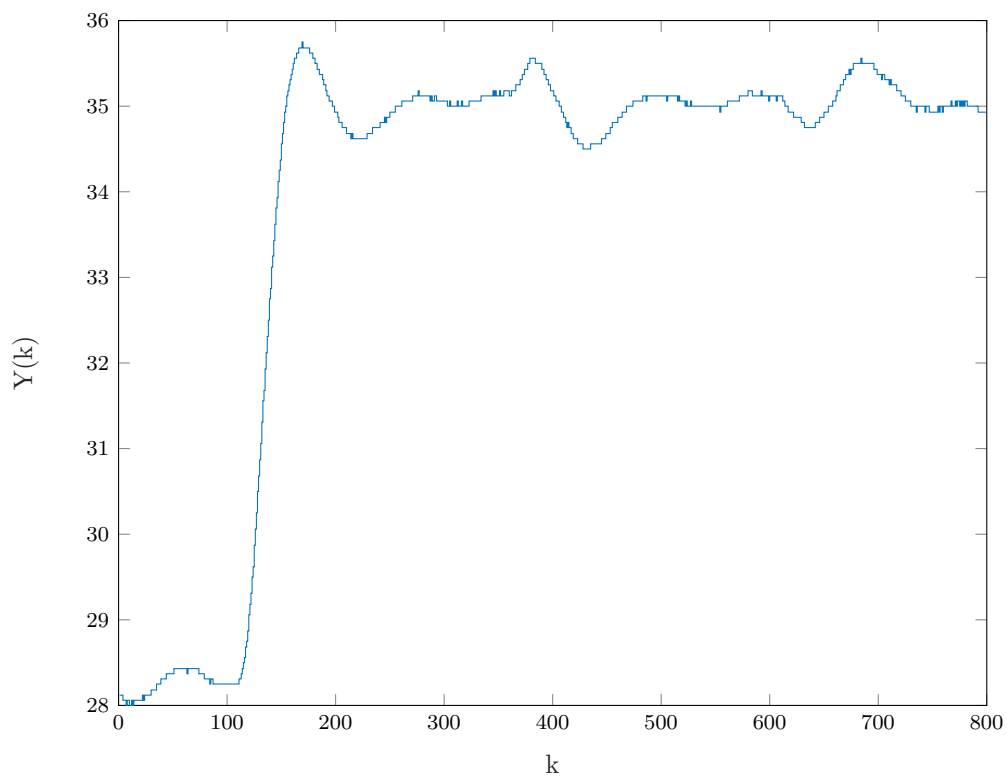
Rys. 8.16. Wyjście procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 30$, $N_u = 1$, $\lambda = 0,4$ bez pomiaru zakłócenia



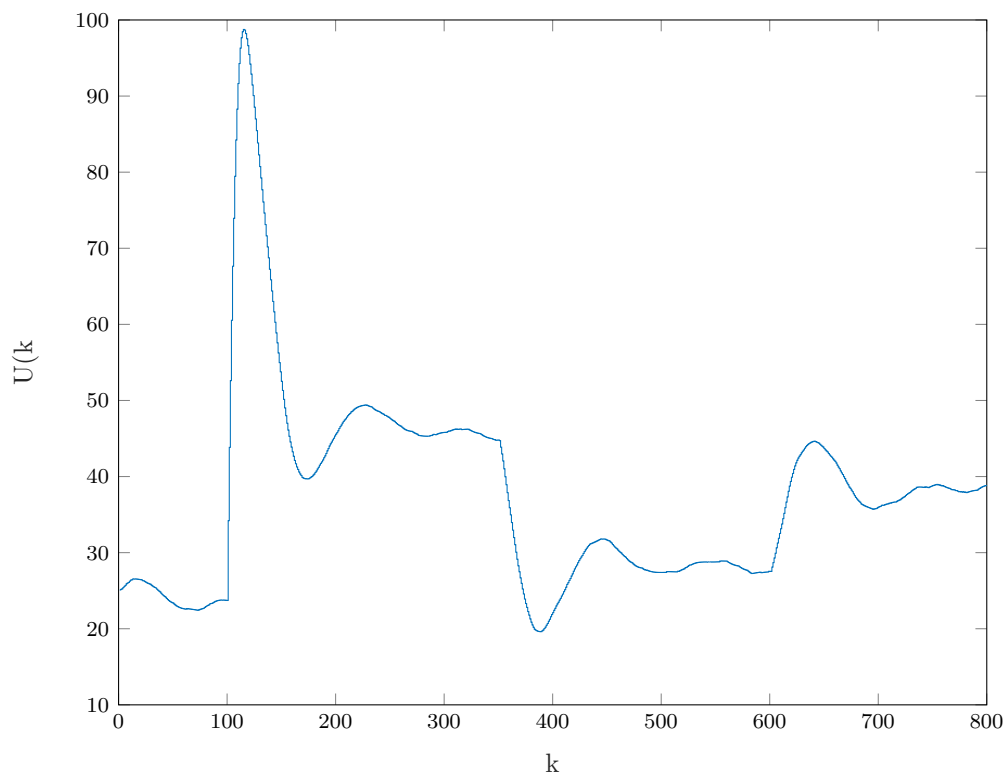
Rys. 8.17. Sterowanie procesu z regulatorem DMC dla parametrów $D = 340$, $N = 30$, $N_u = 1$, $\lambda = 0,4$ bez pomiaru zakłócenia

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

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.