

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego  
nr 1, zadanie nr 2

Eva Reszka, Mateusz Roszkowski, Dominika Zając

Warszawa, 2021

# Spis treści

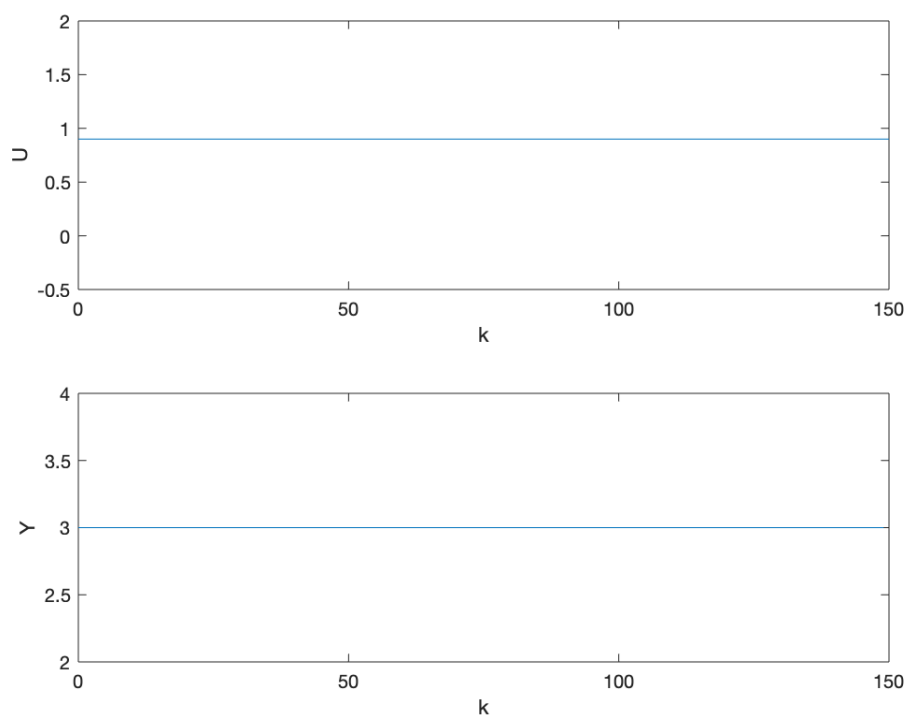
<b>1. Projekt</b>	2
1.1. Sprawdzenie poprawności wartości punktu pracy	2
1.2. Odpowiedzi skokowe procesu	2
1.3. Odpowiedź skokowa w algorytmie DMC	3
1.4. Odpowiedź skokowa w algorytmie DMC	4
1.5. Algorytm PID	4
1.6. Algorytm DMC	10
<b>2. Ćwiczenie laboratoryjne</b>	12
2.1. Przygotowanie do wykonania ćwiczenia	12
2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych procesu	12
2.3. Algorytm PID	13
2.4. Algorytm DMC	17

# 1. Projekt

Implementacja projektu znajduje się w pliku `pust_projekt1.mlx`.

## 1.1. Sprawdzenie poprawności wartości punktu pracy

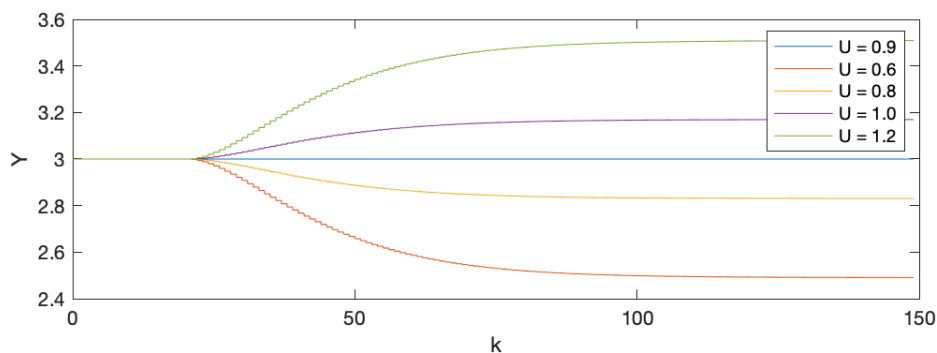
Symulowane wartości są stałe oraz zgodne z punktem pracy ( $U_{pp}$ ,  $V_{pp}$ ).



Rys. 1.1. Wartość zadana i wyjście w punkcie pracy

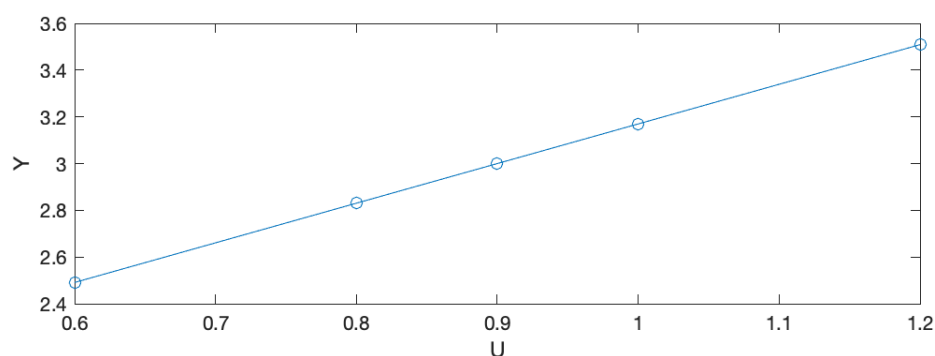
## 1.2. Odpowiedzi skokowe procesu

Obiekt został pobudzony 4 różnymi sygnałami mieszczącymi się w zakresie  $[U_{min}, U_{max}]$ . Zmiana sygnału z  $U_{pp}$  nastąpiła w chwili  $k = 11$ .



Rys. 1.2. Odpowiedzi skokowe procesu

Na Rys. 2.3. naniesione zostały punkty  $(U, Y)$  dla każdego symulowanego pobudzenia. Dopasowana prosta potwierdza właściwości liniowe charakterystyki statycznej.



Rys. 1.3. Charakterystyka statyczna

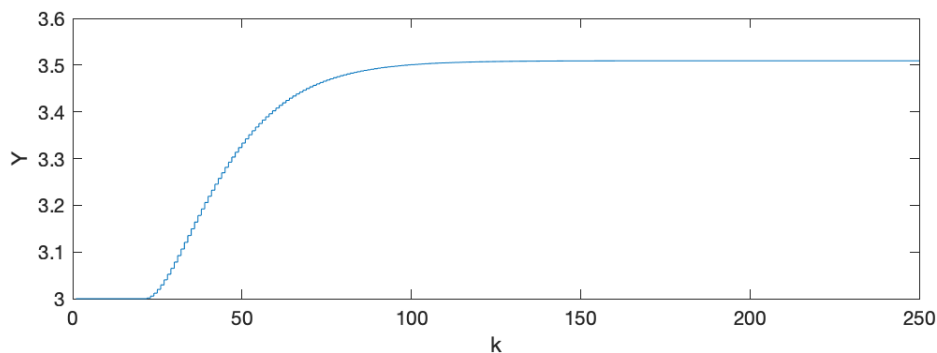
Wzmocnienie statyczne wyznaczone jest jako współczynnik kierunkowy charakterystyki 2.3.

$$K_{stat} = 1.6966$$

### 1.3. Odpowiedź skokowa w algorytmie DMC

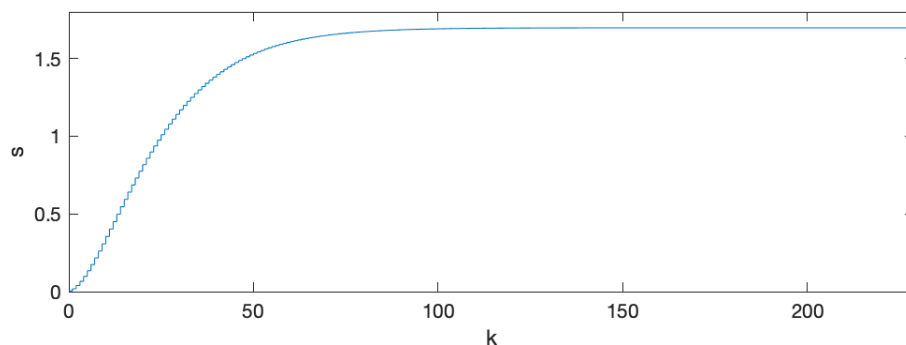
W celu wyznaczenia liczb  $s_1, s_2, s_3, \dots$  wykorzystana została odpowiedź skokowa dla pobudzenia  $U = 1.2$ . Jej przekształcenie przebiegło zgodnie ze wzorem:

$$S_i = \frac{S_i^0 - Y_{pp}}{\Delta U}, i = 1, 2, 3, \dots$$



Rys. 1.4. Odpowiedź skokowa przed przekształceniem

Pierwsza zmiana widoczna jest dla  $k = 21$ , natomiast ostatnia dla  $k = 135$  (dokładność 0.001), co daje parametr  $D = 114$ .



Rys. 1.5. Odpowiedź skokowa po przekształceniu

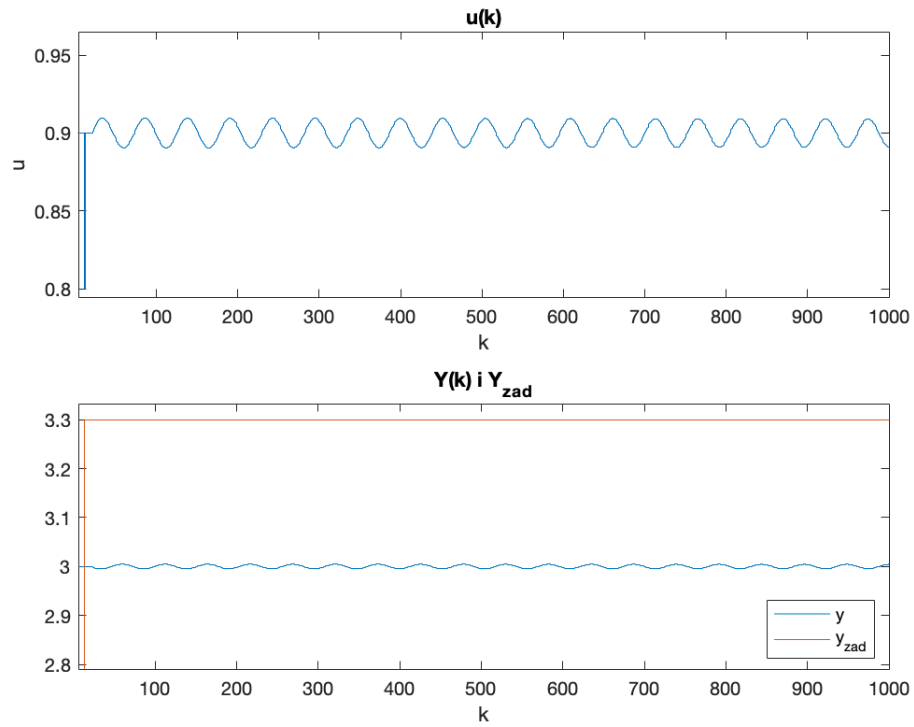
#### 1.4. Odpowiedź skokowa w algorytmie DMC

#### 1.5. Algorytm PID

Do wyznaczenia nastaw regulatora PID wykorzystano metodę Zieglera-Nicholsa. Rozpoczęto od doboru członu proporcjonalnego - człony całkujący ustawiono na  $T_i = \infty$ , a różniczkujący  $T_d = 0$ . Stopniowo zwiększano wzmocnienie  $K$ , aby znaleźć taką jego wartość, która wywoła niegasnące oscylacje.

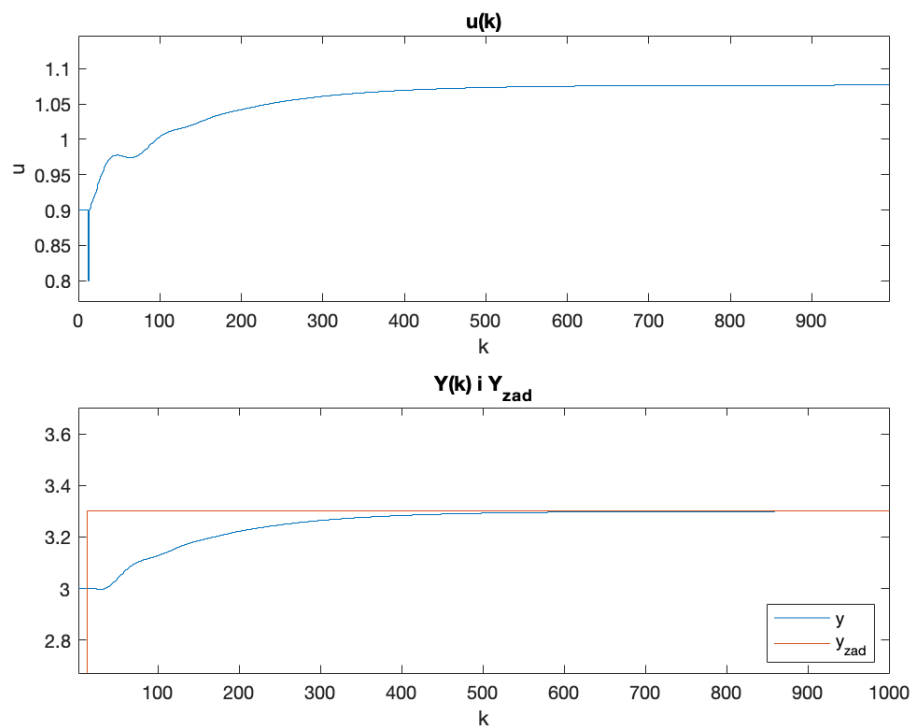
Tab. 1.1. Reguły Zieglera-Nicholsa (Z-N) wg cech przebiegu krytycznego (1942 r.)

Regulator	$K$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{kr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{kr}$	$T_{kr}/1,2$	0
PID	$0,6K_{kr}$	$0,5T_{kr}$	$0,125T_{kr}$

Rys. 1.6. Wyznaczenie  $K$  krytycznego

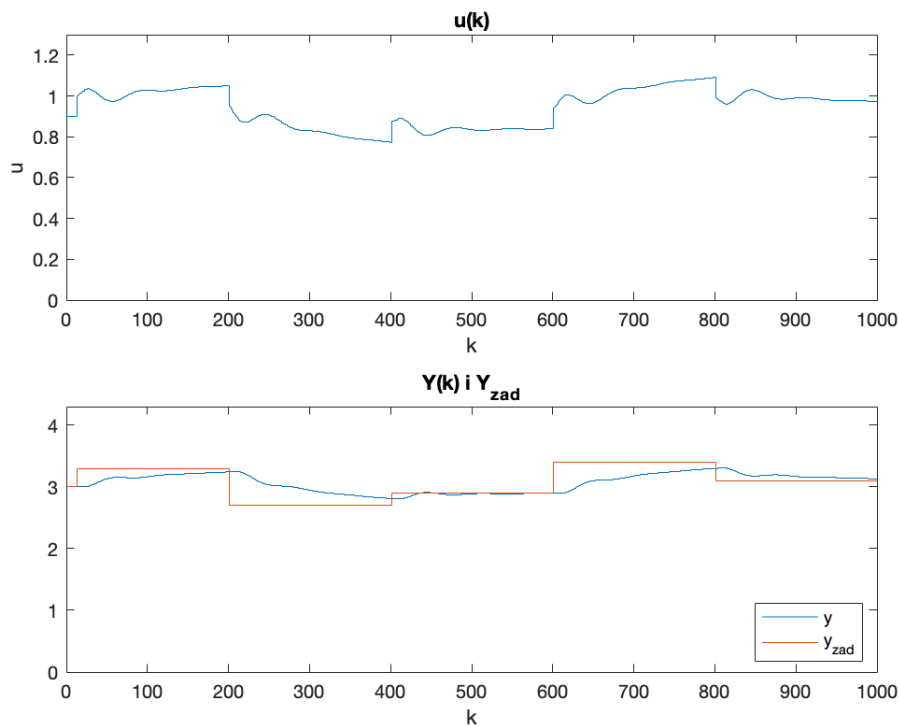
Niegasnące oscylacje wystąpiły dla wartości wzmocnienia  $K_{kr} = 2,02$  (Rys. 1.6). Dla takiego wzmocnienia odczytano z przebiegu sygnału sterującego okres krytyczny  $T_{kr} = 138 - 86 = 52$ .

Następnie obliczone zostały nastawy dla regulatora PI - zgodnie z tabelą 1.1. Zatem  $K = 0,909$ ,  $T_i = 43, (3)$  i  $T_d = 0$ .



Rys. 1.7. Regulator PI

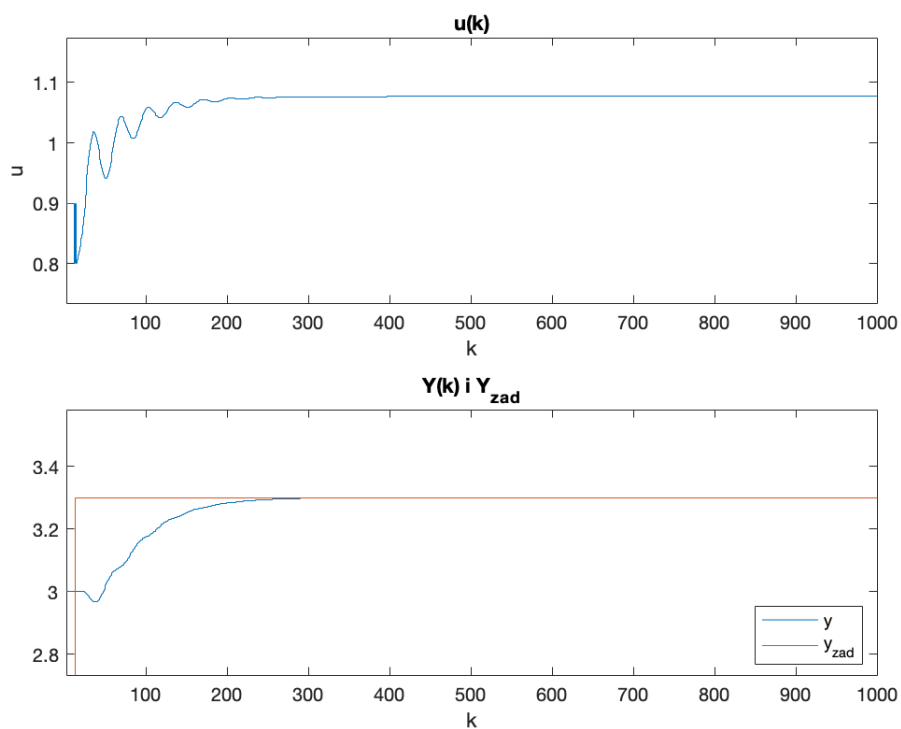
Regulator PI jest stabilny, ale działa zdecydowanie za wolno (Rys. 1.7) - osiąga zadaną wartość dopiero dla  $k = 600$ . Wskaźnik jakości regulacji przyjął wartość  $E = 16.1925$ .



Rys. 1.8. Regulator PI - skoki

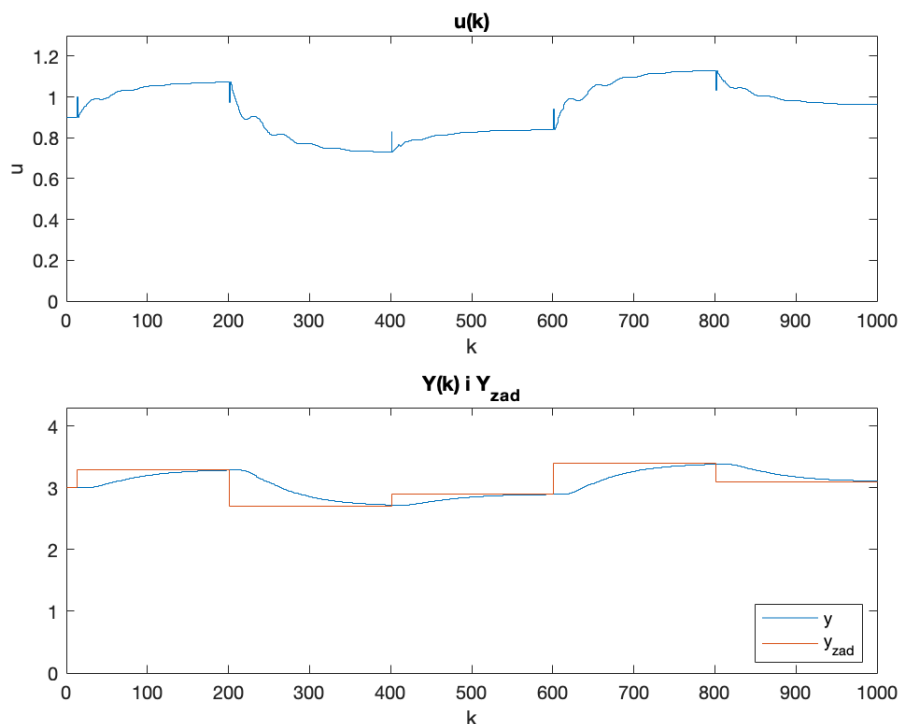
Przy szybszych zmianach  $Y_{zad}$  widać, że regulator PI jest za wolny, aby za nimi nadążyć (Rys. 1.8).

Następnie wyznaczono nastawy dla regulatora PID, ponownie wg. tabeli 1.1. Ich wartości to  $K = 1,212$ ,  $T_i = 26$  i  $T_d = 6,5$ .



Rys. 1.9. Niedostrojony regulator PID

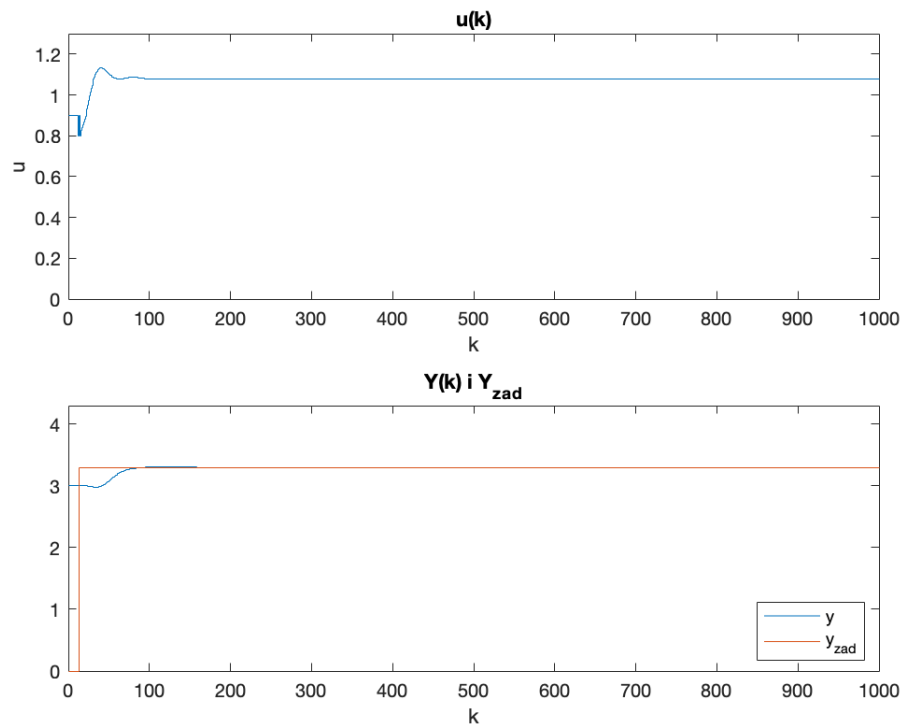




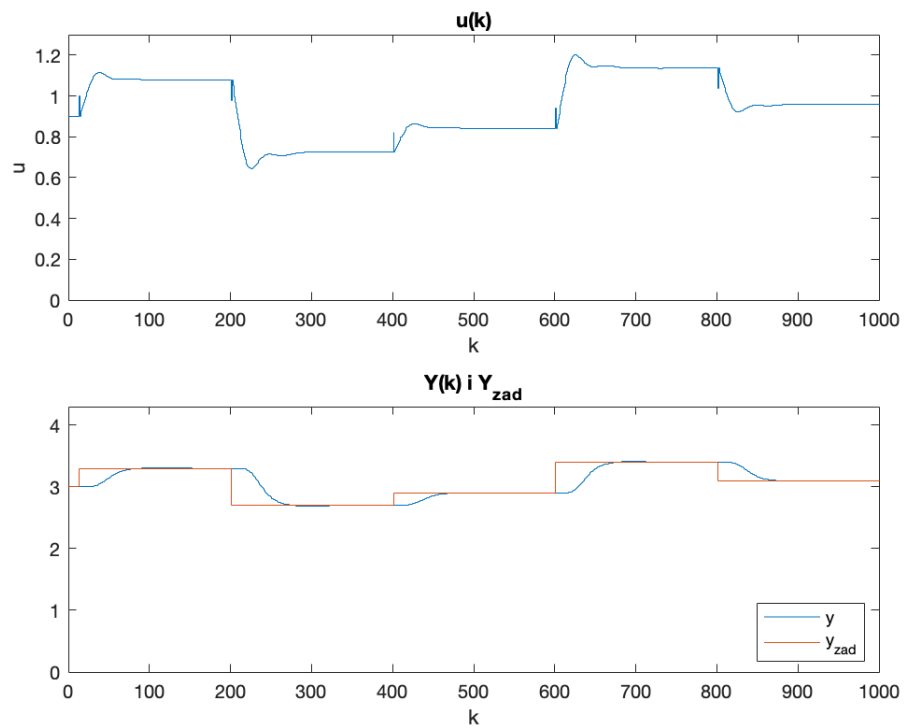
Rys. 1.10. Niedostrojony regulator PID - skoki

Dla nastaw obliczonych na podstawie tabeli 1.1 podczas regulacji występowały oscylacje (Rys. 1.9). Mimo to działał on szybciej niż regulator PI (Rys. 1.10). Wskaźnik jakości regulacji zmalał - dla niedostrojonego regulatora PID jego wartość to  $E = 15.0852$ . Regulator dostrojono metodą eksperymentalną.

Ostateczne nastawy regulatora miały wartości  $K = 1, 1$ ,  $T_i = 12$  i  $T_d = 4$ . Wskaźnik jakości regulacji potwierdza, że są to najbardziej optymalne nastawy - przyjął najmniejszą dotychczas wartość  $E = 12.6853$ . Przebiegi sygnału sterującego i wartości wyjściowej przedstawiono na wykresach 1.11 i 1.12.



Rys. 1.11. Dostrojony regulator PID



Rys. 1.12. Dostrojony regulator PID - skoki

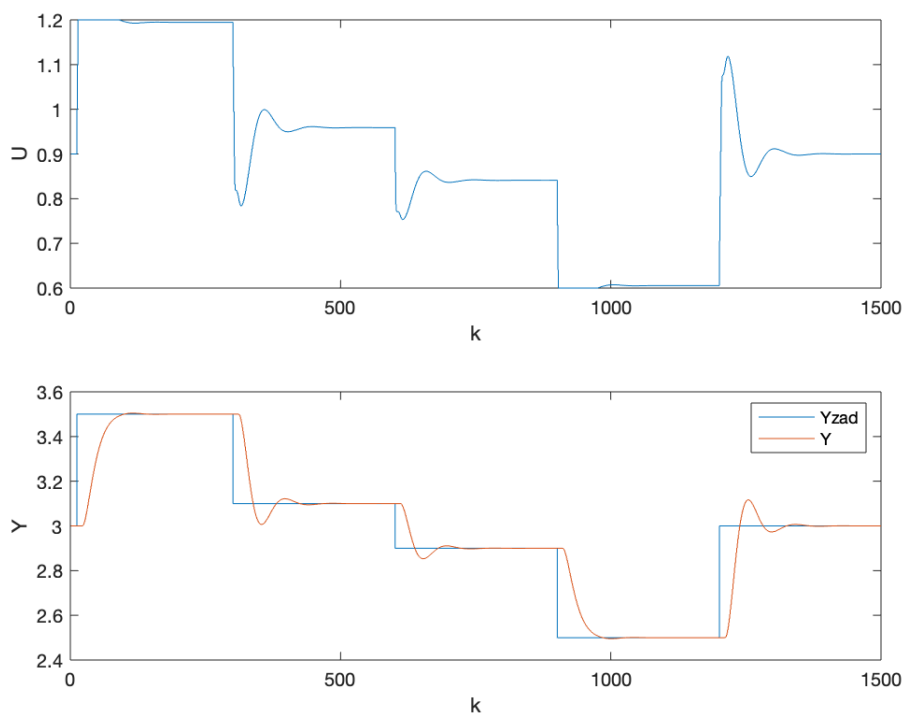
## 1.6. Algorytm DMC

Implementacja algorytmu DMC znajduje się w pliku `pro_dmc.m`.

Parametry dobrane eksperymentalnie wynoszą  $\lambda = 10$ ,  $N = 40$ ,  $Nu = 1$ .

Przy doborze brana była pod uwagę wartość wskaźnika jakości regulacji  $E$  oraz przeregulowanie i opóźnienie widoczne na rysunkach.

$$E = 21.007$$

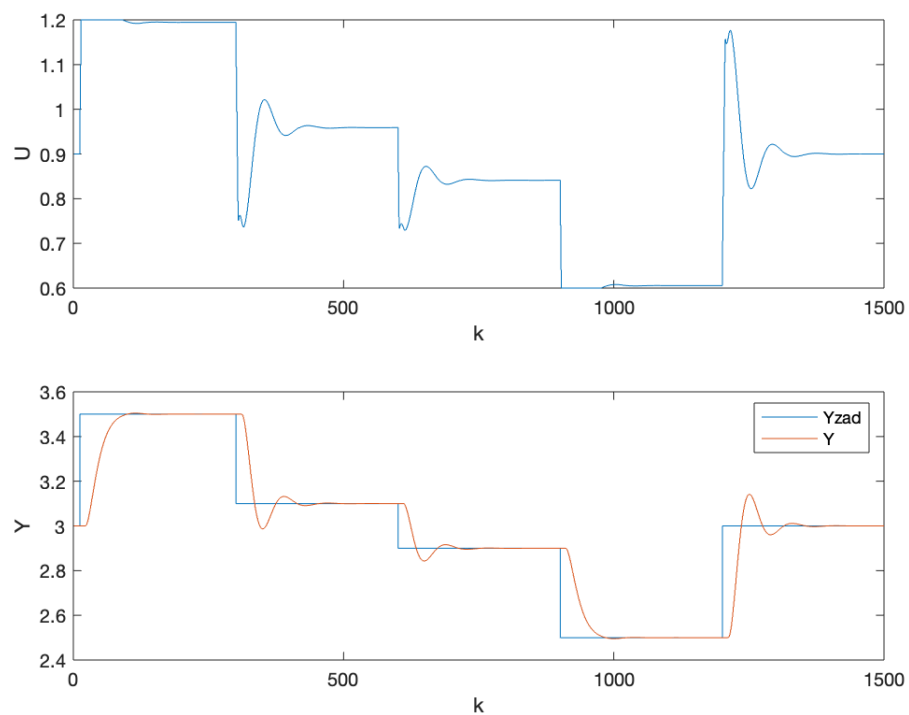


Rys. 1.13. Regulator DMC - parametry dopasowane eksperymentalnie

W celu zwiększenia jakości regulacji została wykorzystana optymalizacja parametrów regulatora. Implementacja znajduje się w pliku `pro_dmc_opt.m`.

Wykorzystany został algorytm genetyczny z pakietu Global Optimization Toolbox. Parametry zostały dobrane zgodnie z ograniczeniami regulatora DMC. Zwiększenie rozmiaru populacji ponad  $P = 20$  nie spowodowało zmiany wyniku na lepszy, a jedynie zwiększyło nakład obliczeniowy.

$$E = 20.889$$



Rys. 1.14. Regulator DMC - parametry optymalizowane

Wynik optymalizacji dla algorytmu DMC jest nieznacznie lepszy od wersji z parametrami wyznaczonymi eksperymentalnie. Wartość wskaźnika jakości regulacji zmniejszyła się o mniej niż 1%.

## 2. Ćwiczenie laboratoryjne

Można napisać o tym, że realizowane w MATLABie i jakie oznaczenia mają jakie rzeczy (W1 ma index 1, G1 jaki index i T1 jaki index)

### 2.1. Przygotowanie do wykonania ćwiczenia

Przed rozpoczęciem pomiarów sprawdzono możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem. Punkt pracy grzałki  $G1$  dla zespołu obliczony został wg. wzoru 2.1:

$$G1 = 25 + Z\%5 \quad (2.1)$$

gdzie  $Z$  to numer zespołu, zatem dla naszego zespołu Z02 punkt pracy wynosi:

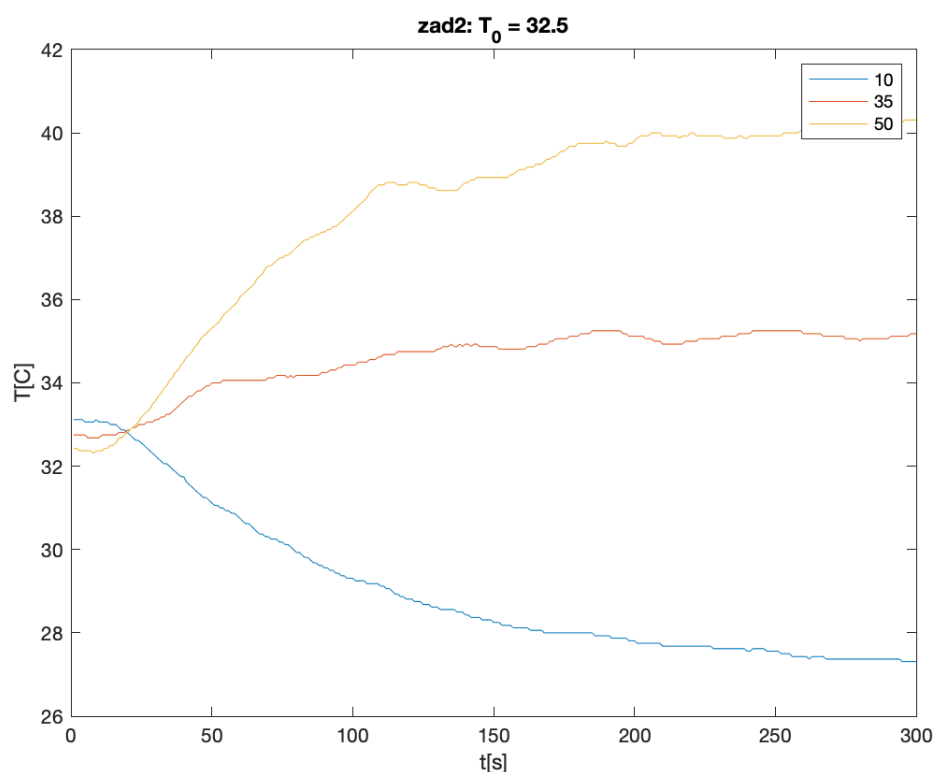
$$G1 = 25 + 2\%5 = 27 \quad (2.2)$$

Następnie określono wartość pomiaru temperatury  $T1$  dla obliczonego punktu pracy. W tym celu moc wentylatora  $W1$  ustawiono na 50%, a moc grzałki  $G1$  na 27%, za pomocą funkcji `sendControls([1,5], [50,27])`. Wartość pomiaru temperatury odczytano korzystając z funkcji `readMeasurements(1)`. Temperatura  $T1$  ustabilizowała się na wartości **32.25°C**

### 2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych procesu

Zarejestrowano przebieg temperatury  $T1$  dla trzech różnych zmian sygnału sterującego  $G1$  rozpoczynając z punktu pracy (27%) do 10%, 35% i 50%. Otrzymane przebiegi zmian przedstawiono na Rys. 2.1.

Czy właściwości statyczne obiektu można określić jako (w przybliżeniu) liniowe? Jeśli tak wyznaczyć wzmocnienie statyczne procesu?



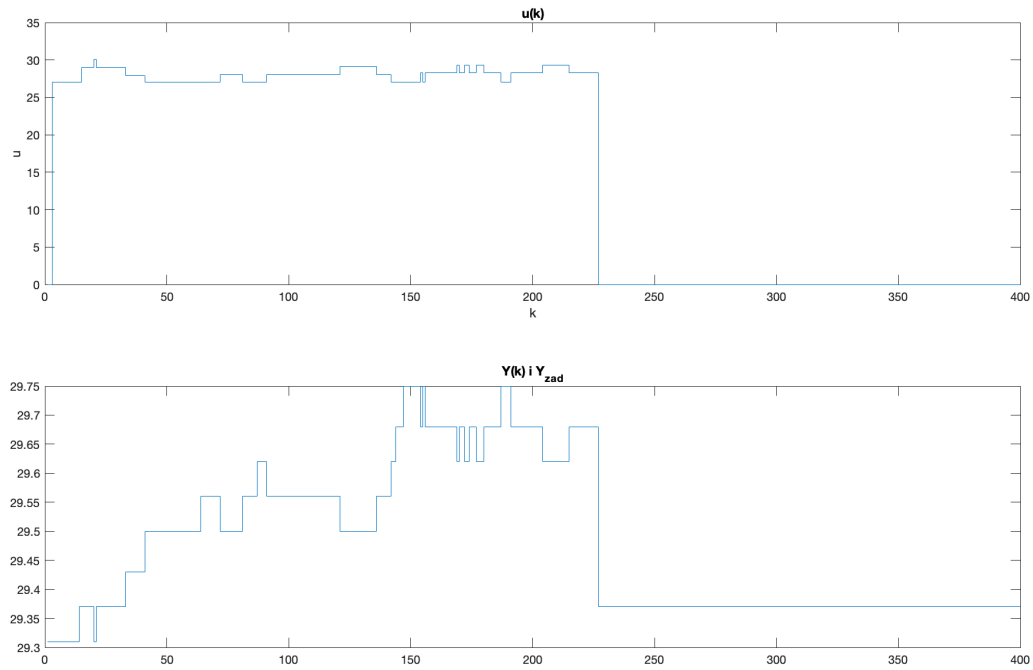
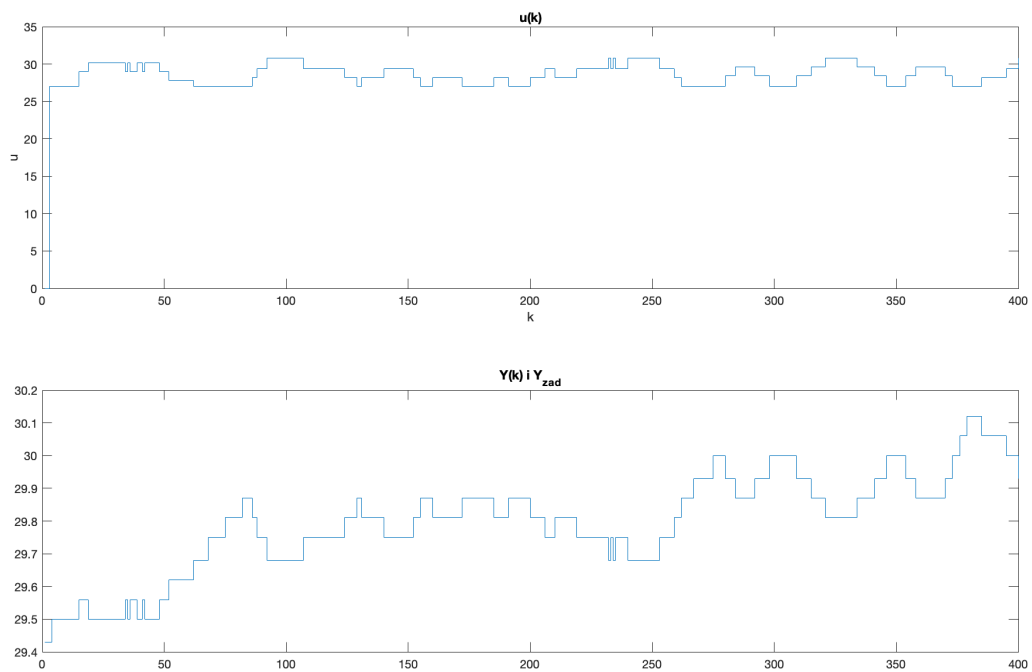
Rys. 2.1. Odpowiedzi skokowe procesu

### 2.3. Algorytm PID

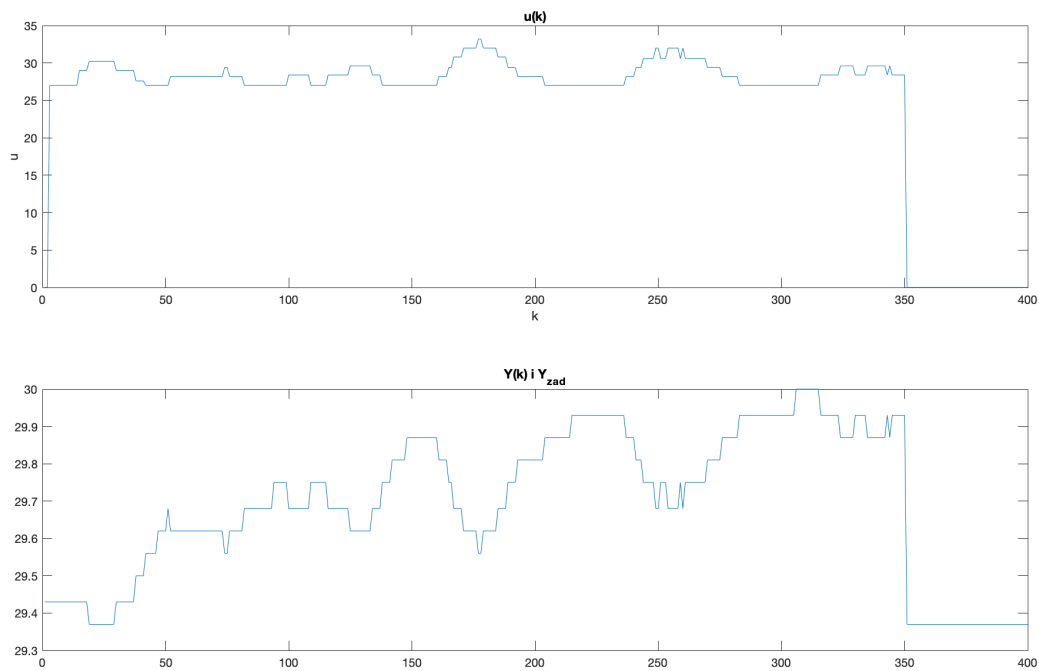
Poniższe zadanie laboratoryjne realizowane było w inny, zimniejszy dzień, co spowodowało konieczność wyznaczenia wartości pomiaru temperatury w punkcie pracy na nowo. Nowy punkt pracy dla  $G1 = 27$  to  $T1 = 29.37$  °C.

Napisano program do regulacji cyfrowego algorytmu PID. Dobór nastaw regulatora przeprowadzono metodą Zieglera-Nicholsa. Rozpoczęto od doboru wartości wzmocnienia  $K$ , przy parametrze całującym  $T_i = \infty$  i różniczkującym  $T_d = 0$ . W algorytmie uwzględniono ograniczenia wartości sterowania  $G1(k)$  (zakres od  $U_{min} = 0$  do  $\Delta U_{max} = 100$ ).

Testowano odpowiedź układu przy różnych wartościach wzmocnienia  $K$ . Początkowo ustawiono zbyt dużą wartość  $Y_{zad} = 50$ , co uniemożliwiło analizę przebiegu wyjścia układu – wartość wzrastała powoli, przez co pomiar zajmował za dużo czasu. Problem ten widoczny jest na wykresach Rys. 2.2 i Rys. 2.3. Pomiar z Rys. 2.2 został przerwany po zauważeniu nieprzewidywanego zachowania.

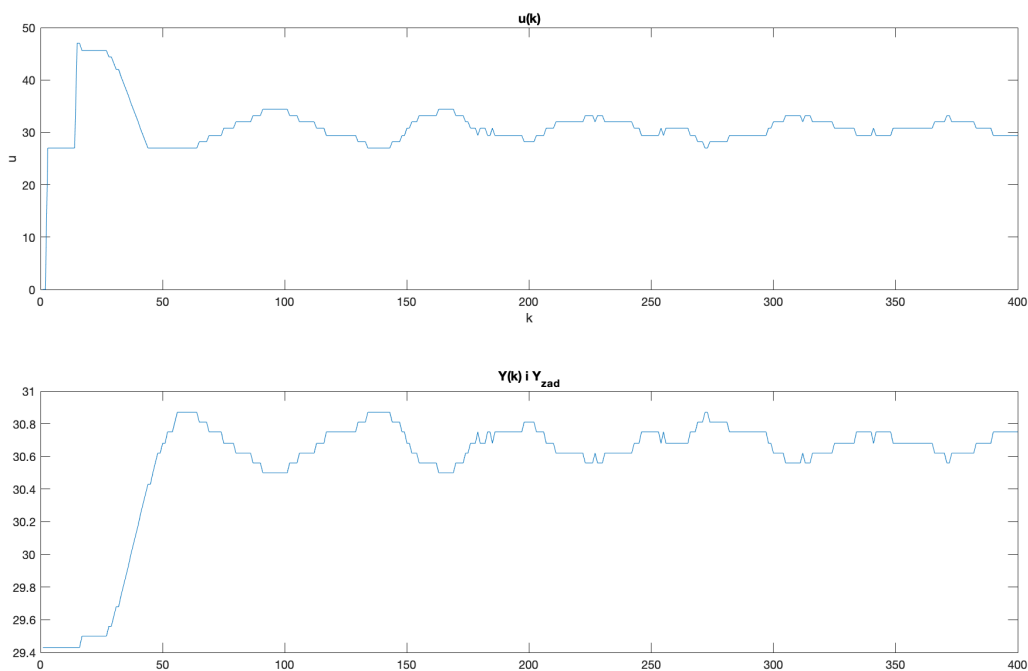
Rys. 2.2. Przebiegi dla  $K = 18$  i  $Y_{zad} = 50$ Rys. 2.3. Przebiegi dla  $K = 20$  i  $Y_{zad} = 50$ 

Po zaobserwowaniu powyższego problemu i jego analizie zmieniono wartość sygnału zadanego na  $Y_{zad} = 33$ . Wyniki widoczne są na wykresie Rys. 2.4.

Rys. 2.4. Przebiegi dla  $K = 20$  i  $Y_{zad} = 33$ 

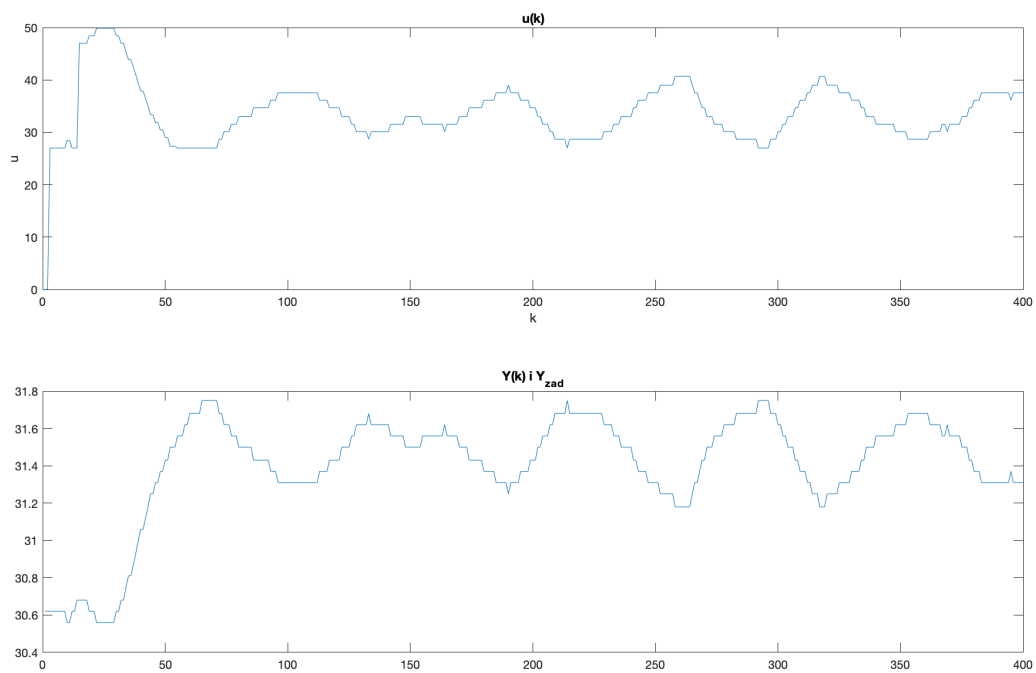
Mimo tej zmiany, odpowiedź procesu nadal rosła zbyt wolno. Po ponownej analizie algorytmu wywnioskowano, że do niskiej prędkości wzrastania przyczynił się również niewłaściwie dobrany parametr  $\Delta U_{max} = 2$  – ograniczał on bowiem szybkość zmian sygnału sterującego. Po zmianie tej wartości na  $\Delta U_{max} = 20$ , układ działał zgodnie z założeniami (Rys. 2.5).





Rys. 2.5. Przebiegi dla  $K = 20$ ,  $Y_{zad} = 33$  i zmienioną wartością  $\Delta U_{max}$

Widoczne są regularne oscylacje, jednak są one oscylacjami gasnącymi. Wartość wzmacnienia została więc zwiększona do  $K = 24$ . Jak widać na wykresie Rys. 2.6 oscylacje nie gasną. Zauważalny jest nawet lekki wzrost amplitudy oscylacji. Przewidujemy, że niegasnące oscylacje wystąpiłyby przy wartości wzmacnienia  $K_{kr} = 23$ , jednak przez problemy występujące na początku realizacji zadania nie zostało to sprawdzone. Z tego powodu nie dobrano również pozostałych parametrów regulatora PID dla zmiennego sygnału zadanego. Jeśli zespół miałby więcej czasu, następnym krokiem byłoby ustawienie nastaw regulatora wg. reguł Zieglera-Nicholsa (Rys. 1.1). Zatem po wyznaczeniu wzmacnienia krytycznego  $K_{kr}$ , z przebiegu wartości sterowania odczytany zostałby okres krytyczny  $T_{kr}$ , a wstępne nastawy regulatora PID wynosiłyby:  $K = 0.6K_{kr}$ ,  $T_i = 0.5T_{kr}$  i  $T_d = 0.125K_{kr}$ . Jeżeli byłoby to konieczne, regulator zostałby dostrojony metodą eksperymentalną.

Rys. 2.6. Przebiegi dla  $K = 24$ 

## 2.4. Algorytm DMC