

Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI
I TECHNIK INFORMACYJNYCH



Instytut Informatyki i Automatyki Stosowanej

Pracownia Dyplomowa Magisterska

na kierunku Automatyka i Robotyka

Modelowanie i sterowanie rozmyte nieliniowego obiektu

Maciej Kłos

Numer albumu 270806

promotor

dr inż. Piotr Marusak

WARSZAWA 2020

Spis treści

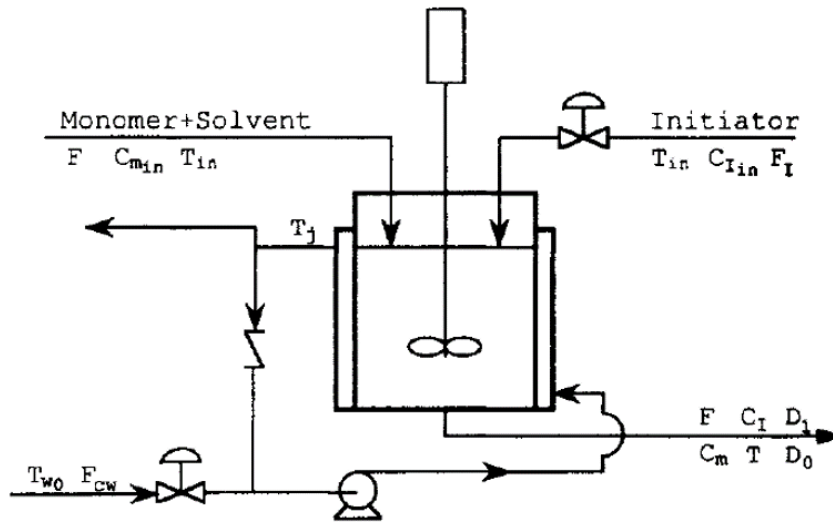
1. Cel pracy	3
2. Opis reaktora polimeryzacji	3
3. Model statyczny obiektu	4
4. Model Hammersteina	7
5. Sterowanie obiektu	10
5.1. Klasyczny DMC	10
5.2. DMC-SL	10
Spis rysunków	13

1. Cel pracy

Celem pracy jest zbadanie możliwości wykorzystania logiki rozmytej do procesu modelowania oraz do sterowania obiektami nieliniowymi. Na początek badana będzie jedna klasa obiektów nieliniowych - reaktory chemiczne. Celem jest zaproponowanie podejścia do procesu modelowania, który sprawdzałby się dla różnych obiektów tej kategorii. Uzyskany model, wykorzystujący logikę rozmytą, powinien dawać lepsze rezultaty pod względem wydajności, dokładności oraz prostoty zastosowania. Uzyskany model zostanie wykorzystany do zaprojektowania rozmytego regulatora nieliniowego obiektu.

2. Opis reaktora polimeryzacji

Do badań został wykorzystany reaktor polimeryzacji. Jest on schematycznie przedstawiony na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1. Schemat reaktora polimeryzacji

Opisany jest on następującymi równaniami stanu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= - \left[Z_P \exp\left(\frac{-E_P}{RT}\right) + Z_{f_m} \exp\left(\frac{-E_{f_m}}{RT}\right) \right] x_1 P_0(x_2, T) - \frac{F x_1}{V} + \frac{F C_{m_{in}}}{V} \\
 \dot{x}_2 &= - Z_I \exp\left(\frac{-E_I}{RT}\right) x_2 - \frac{F x_2}{V} + \frac{f_I C_{I_{in}}}{V} \\
 \dot{x}_3 &= \left[0.5 Z_{T_C} \exp\left(\frac{-E_{T_C}}{RT}\right) + Z_{T_d} \exp\left(\frac{-E_{T_d}}{RT}\right) \right] P_0^2(x_2, T) + Z_{f_m} \exp\left(\frac{-E_{f_m}}{RT}\right) x_1 P_0(x_2, T) - \frac{F x_3}{V} \\
 \dot{x}_4 &= M_m \left[Z_P \exp\left(\frac{-E_P}{RT}\right) + Z_{f_m} \exp\left(\frac{-E_{f_m}}{RT}\right) \right] x_1 P_0(x_2, T) - \frac{F x_4}{V}
 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

$$P_0(x_2, T) = \left[\frac{2f * x_2 Z_I \exp(-E_I/RT)}{Z_{T_d} \exp(E_{T_d}/RT) + \exp(-E_{T_c}/RT)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Poszczególne zmienne stanu mają następujące znaczenia:

- $x_1 = C_m$
- $x_2 = C_I$
- $x_3 = D_0$
- $x_4 = D_I$
- $u = F_I$
- $y = \frac{D_I}{D_0}$
- $d = C_{m_{in}}$

Po podstawieniu parametrów reaktora otrzymujemy następujące uproszczone równania stanu:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -10x_1 - 2,4568x_1\sqrt{x_2} + 10d \\ \dot{x}_2 &= -80u - 10,1022x_2 \\ \dot{x}_3 &= 0,0024121x_1\sqrt{x_2} + 0,112191x_2 - 10x_3 \\ \dot{x}_4 &= 245,978x_1\sqrt{x_2} - 10x_4 \\ y &= \frac{x_4}{x_3} \end{aligned} \quad (3)$$

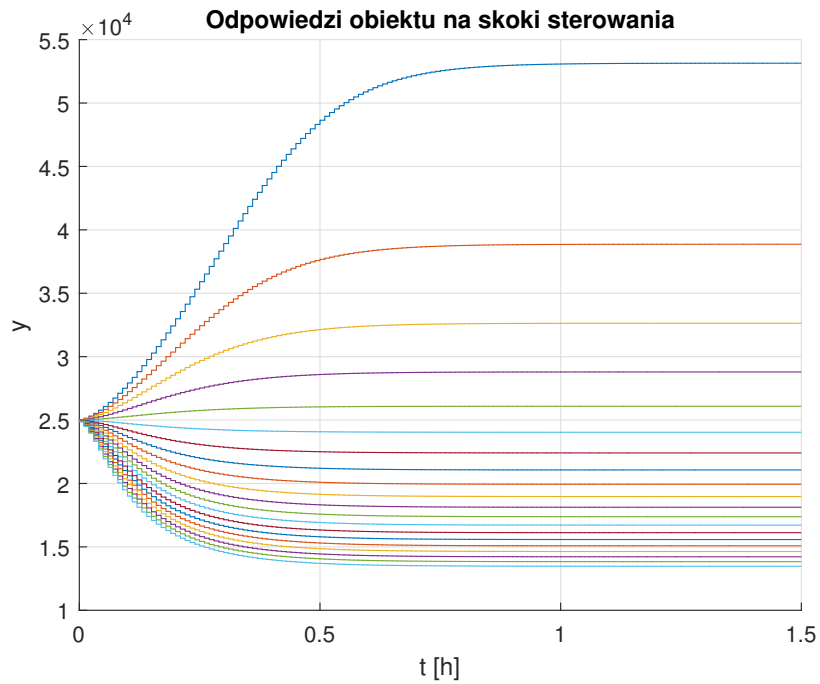
Przedstawiony obiekt został zasymulowany w programie MATLAB za pomocą metody Rungego-Kutty 4. rzędu z czasem próbkowania $T_s = 0,01 h$.

3. Model statyczny obiektu

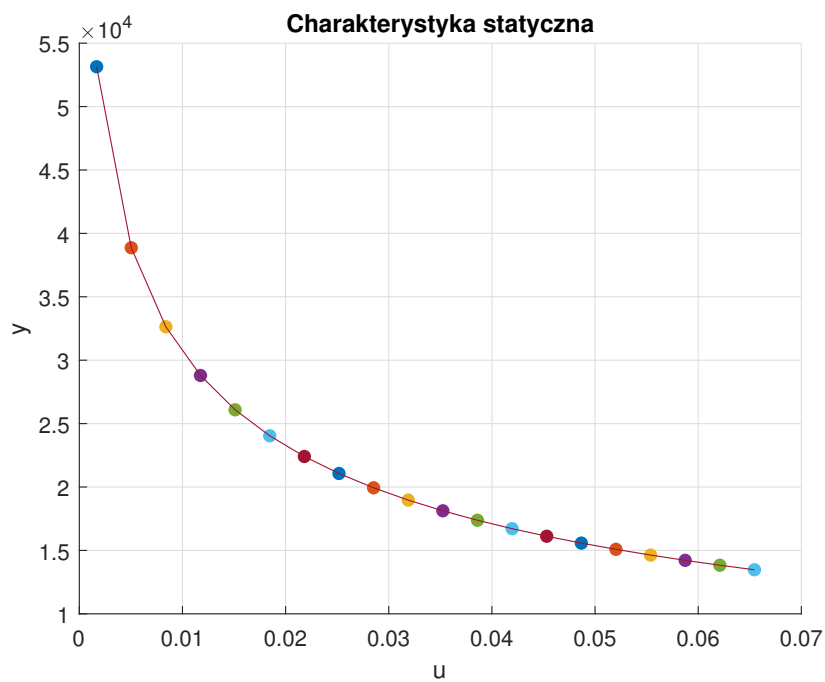
Przyjęty został następujący punkt pracy:

- $x_{1_0} = 5,50677$
- $x_{2_0} = 0,132906$
- $x_{3_0} = 0,0019752$
- $x_{4_0} = 49,3818$
- $u_0 = 0,016783$
- $y_0 = 25000,911$
- $d_0 = 6,0$

Zakres dopuszczalnych sterowań został przyjęty jako $u \in (0,0016783; 0,067132)$. Z tego punktu wykonano serię skoków co $\Delta u = 0,0034$ i po każdym z nich odczekiwano 150 iteracji. Wyniki przedstawione zostały na rysunku 3.1. Wartości z końca symulacji zostały zapisane do charakterystyki statycznej przedstawionej na rysunku 3.2. Do modelowania charakterystyki użyto modelu Takagi-Sugeno o czterech funkcjach przynależności przedstawionych na rysunku 3.3.



Rysunek 3.1. Odpowiedzi obiektu na skoki sterowania

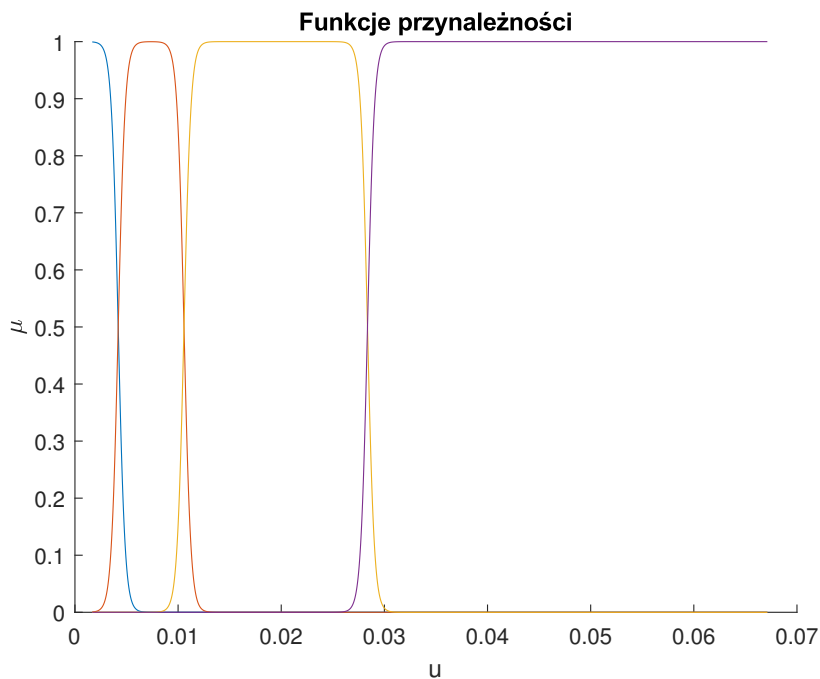


Rysunek 3.2. Charakterystyka statyczna obiektu

Do każdej z nich przyporządkowany został model liniowy postaci:

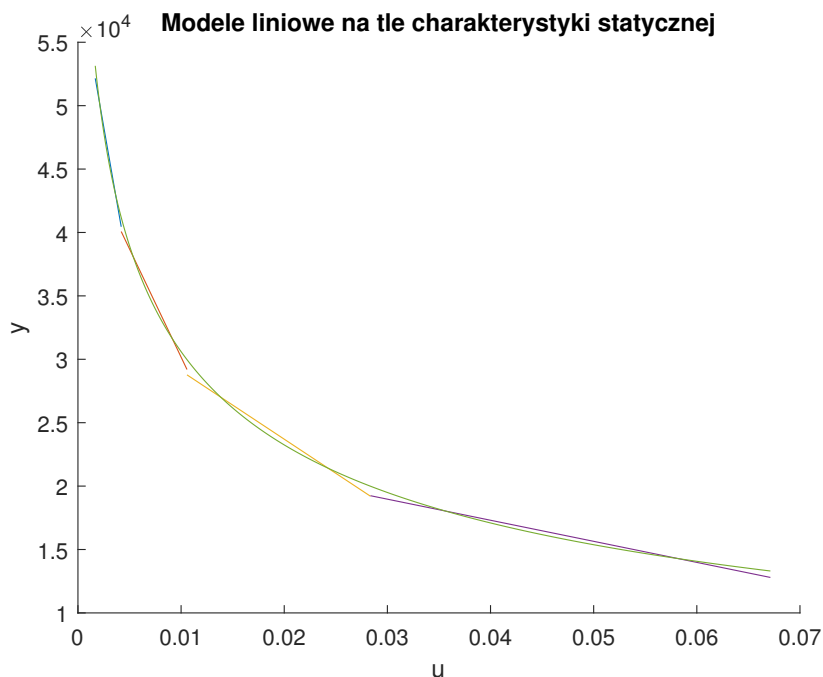
$$y_{s_k}(u) = a_k \cdot u + b_k \quad \text{gdzie } k = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

Modele liniowe $y_{f_k}(u)$ uzyskano rozwiązując zadanie najmniejszych kwadratów na pew-



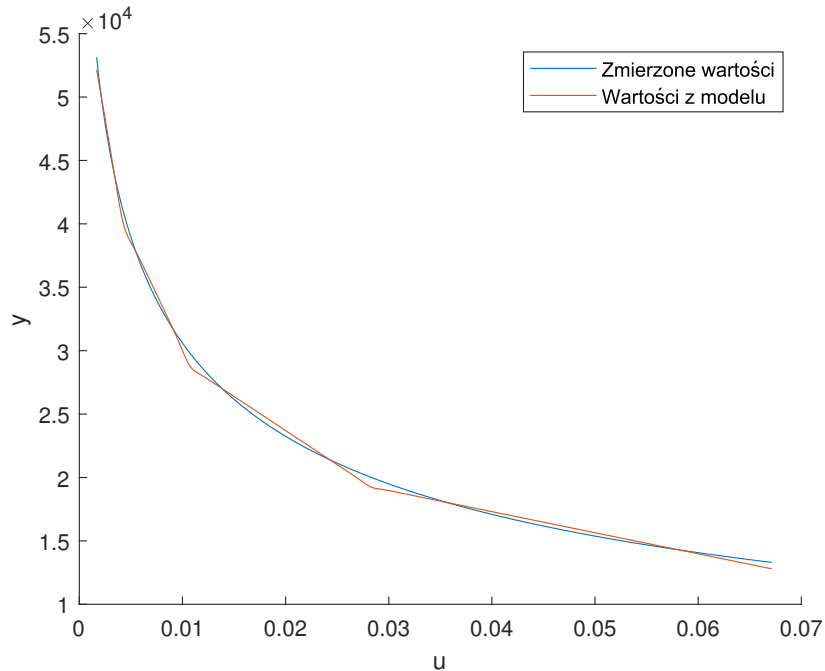
Rysunek 3.3. Funkcje przynależności dla modelu statycznego obiektu

nym zakresie charakterystyki statycznej, zwiększając stopniowo ten zakres dopóki błąd średniokwadratowy pomiędzy modelem liniowym, a danymi nie przekroczył wartości progowej. Następnie zakres był przesuwany dalej i proces był powtarzany aż do osiągnięcia końcowej wartości u . Modele te przedstawione zostały na rysunku 3.4. Ostateczne



Rysunek 3.4. Funkcje przynależności dla modelu statycznego obiektu

wyjście modelu na tle charakterystyki statycznej przedstawiono na rysunku 3.5. Błąd



Rysunek 3.5. Wyjście rozmytego modelu statycznego

średniokwadratowy uzyskanego modelu wyniósł $1,29857e+05$. Nie jest to bardzo dokładny model, jednakże bardziej skomplikowany model prowadziłby do zwiększenia nakładu obliczeniowego. Ponadto algorytmy regulacji całkują uchyb, przez co rozbieżności między modelem a obiektem będą kompensowane.

4. Model Hammersteina

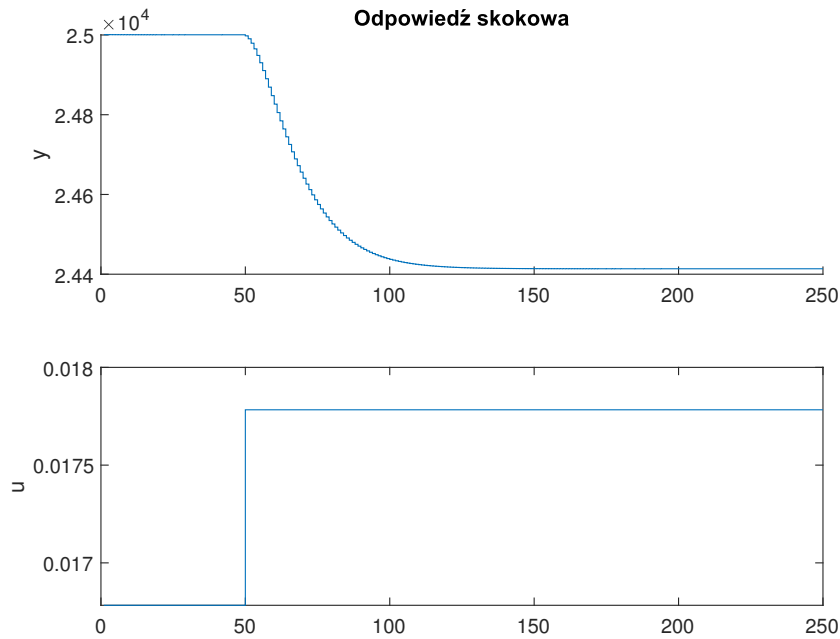
Aby zamodelować dynamikę obiektu zdecydowano się na użycie modelu Hammersteina, przedstawionego na rysunku 4.1. W poprzednim punkcie wyznaczony został



Rysunek 4.1. Schemat modelu kaskadowego Hammersteina

nieliniowy człon statyczny, teraz zajmiemy się liniowym członem dynamicznym. W tym celu na początek wyznaczono odpowiedź skokową z punktu pracy, zwiększając u o 0,01. Wynik tego eksperymentu przedstawiono na rysunku 4.2. Przetestowano kilka rodzajów modeli, o różnych stopniach dynamiki, ostatecznie wybrano następujący:

$$\begin{aligned} \hat{y}_d(k) = & a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + a_3 y(k-3) + a_4 y(k-4) + \\ & + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-3) + b_4 u(k-4) \end{aligned} \quad (5)$$



Rysunek 4.2. Odpowiedź skokowa obiektu

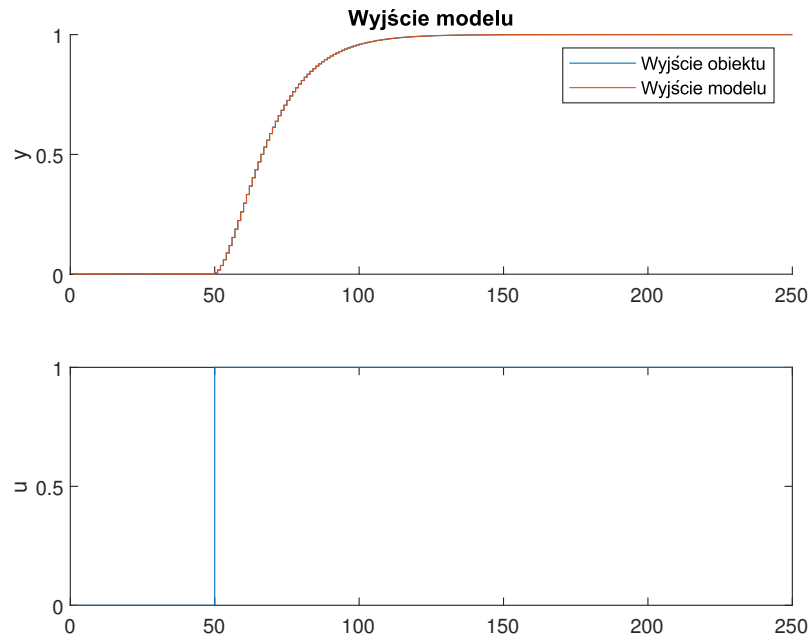
Następnie poddano obróbce odpowiedź skokową, mianowicie znormalizowano skok sterowania oraz wyjście tak aby na końcu wynosiły 1. W takim przypadku wystarczy dynamikę modelu przeskalować przez nieliniowy człon statyczny otrzymując nieliniowy model dynamiczny. Po dobraniu wartości parametrów za pomocą metody najmniejszych kwadratów, przebieg wyjścia modelu przedstawiono na rysunku 4.3. Jak widać oba przebiegi się praktycznie pokrywają, błąd średniokwadratowy jest równy 4.1895e-08. Końcowy model będzie miał postać:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) = & a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + a_3 y(k-3) + a_4 y(k-4) + \\ & + \alpha(k) b_0 u(k) + \alpha(k) b_1 u(k-1) + \alpha(k) b_2 u(k-2) + \alpha(k) b_3 u(k-3) + \alpha(k) b_4 u(k-4) \end{aligned} \quad (6)$$

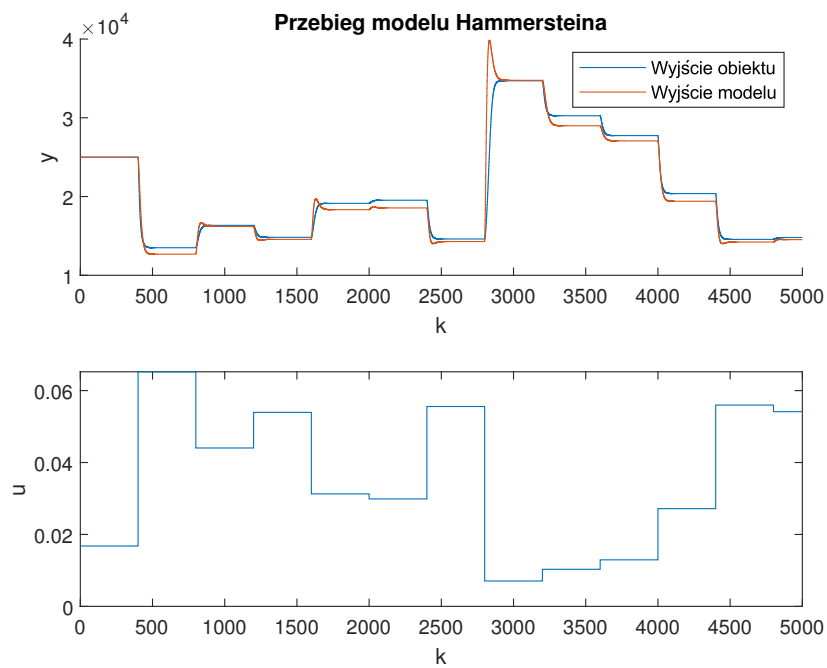
gdzie

$$\alpha(k) = \frac{\hat{y}_s(u(k))}{u(k)} \quad (7)$$

Przebieg wyjściowy dla tego modelu przedstawiono na rysunku 4.4. Jak widać model w stanach ustalonych przyjmuje wartości statyczne wyliczone w poprzednim punkcie. Dynamika też jest w miarę dobrze odwzorowana, jednakże pojawiają się odchylenia w niektórych momentach. Może być to wina implementacji, co zostanie jeszcze zbadane w przyszłym semestrze. Błąd średniokwadratowy dla tego przebiegu był równy 6,4393e+08.



Rysunek 4.3. Wyjście liniowego modelu dynamicznego

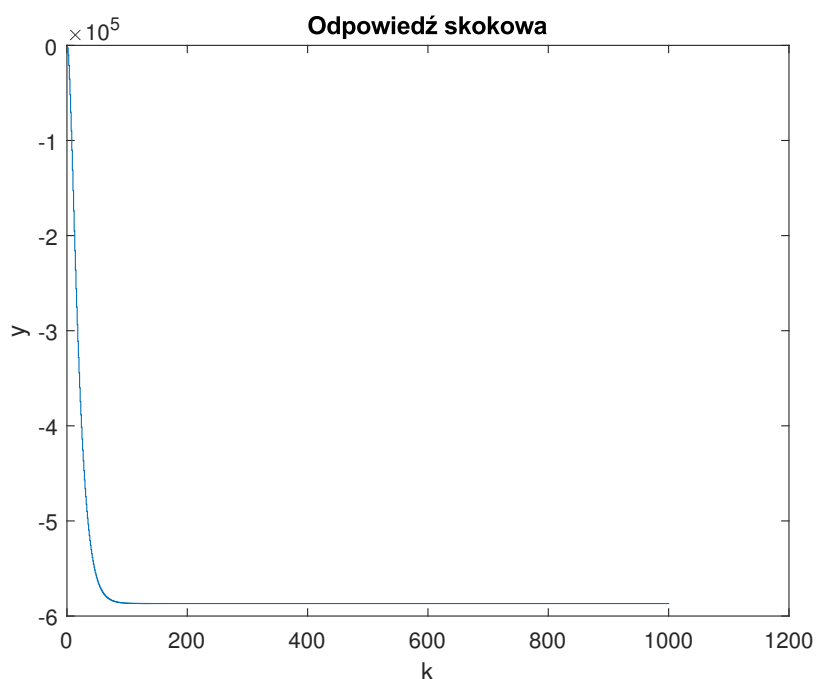


Rysunek 4.4. Przebieg dla modelu Hammersteina

5. Sterowanie obiektu

5.1. Klasyczny DMC

Na początek zdecydowano się przetestować klasyczny algorytm DMC. W tym celu zebrano odpowiedź skokową w punkcie pracy. Została ona przedstawiona na rysunku 5.1. Zaimplementowano algorytm DMC w wersji analitycznej. Przyjęto parametry regulatora



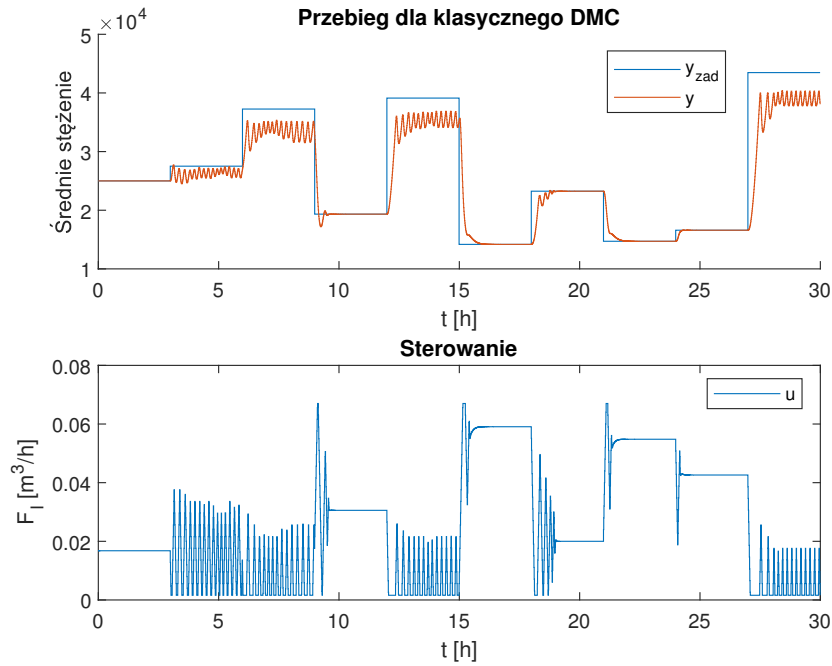
Rysunek 5.1. Odpowiedź skokowa dla klasycznego algorytmu DMC

$D = 200$, $N = 200$, $N_U = 200$, $\lambda = 1e + 8$. Zostały one dobrane eksperymentalnie. Przebieg dla przykładowej trajektorii wartości zadanej został przedstawiony na rysunku 5.2.

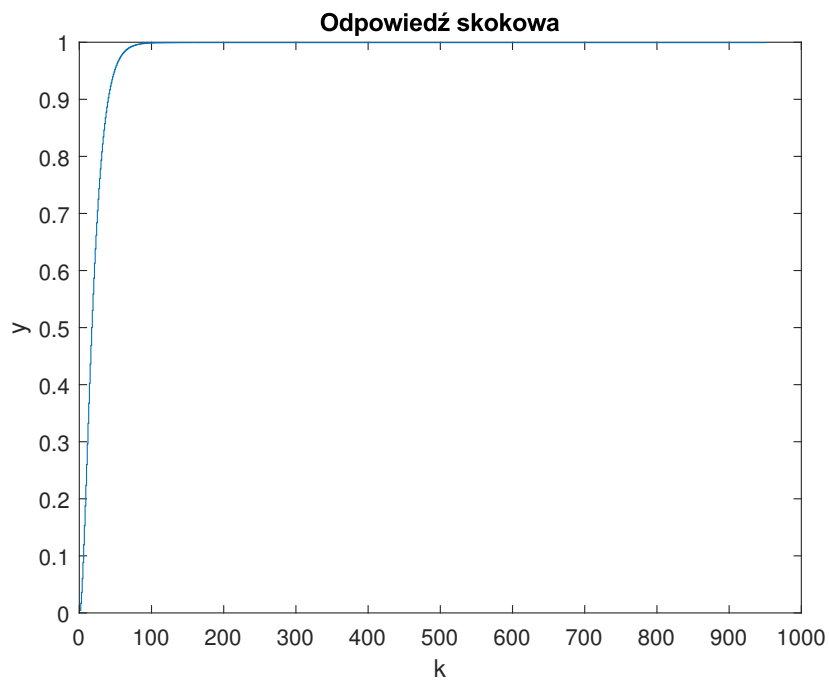
Jak widać regulator nie radzi sobie dobrze, występują duże oscylacje, oraz uchyby ustalone. Warto też zauważyć że parametr λ jest bardzo duży. Błąd dla tego przebiegu wyniósł $5,5095e+10$. Eksperyment ten pokazuje że w przypadku badanego reaktora istnieje potrzeba zastosowania algorytmu regulacji opartego na modelu nieliniowym.

5.2. DMC-SL

Do zaprojektowania regulatora DMC-SL w wersji analitycznej wykorzystano odpowiedź skokową modelu dynamicznego z poprzedniego punktu. Została ona przedstawiona na rysunku 5.3.

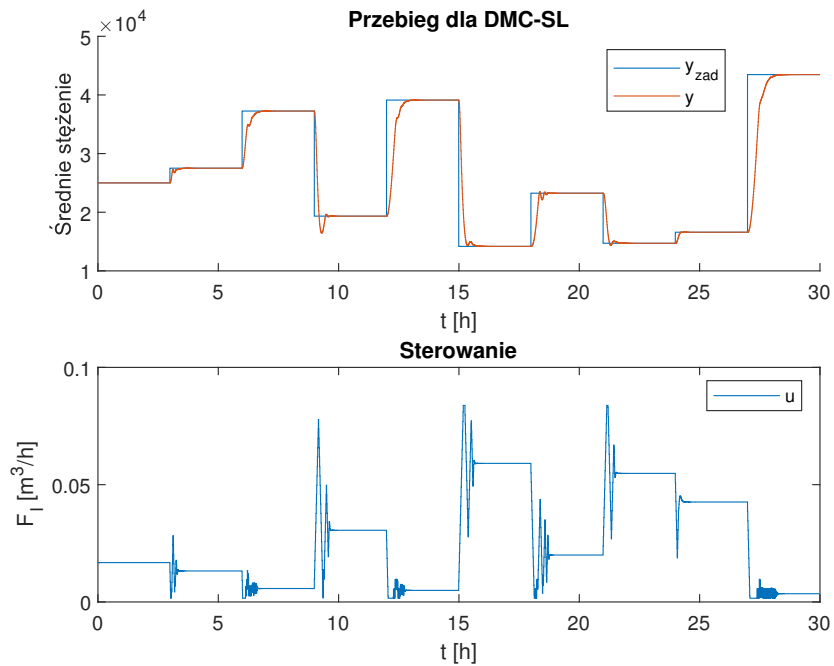


Rysunek 5.2. Przebieg dla klasycznego algorytmu DMC



Rysunek 5.3. Odpowiedź skokowa dla algorytmu DMC-SL

W każdej iteracji jest ona przemnażana przez współczynnik $\alpha(k)$, co daje odpowiedź skokową w danej chwili. Wszystkie parametry regulatora są takie same jak w poprzednim podpunkcie. Przebieg dla tego regulatora został przedstawiony na rysunku 5.4.



Rysunek 5.4. Przebieg dla algorytmu DMC-SL

Jak widać przebieg jest znacznie bardziej stabilny, nie występują też żadne uchyby ustalone. Błąd też uległ poprawie, był równy $4.0812\text{e}+10$. Wykorzystanie zaprojektowanego modelu daje znaczne korzyści w przypadku obiektu nieliniowego z którym mamy tutaj do czynienia. Można dostroić parametry tego regulatora. Na przykład warto rozważyć zmniejszenie współczynnika λ , co powinno zwiększyć szybkość regulacji, kosztem bardziej gwałtownego przebiegu sterowania i szansy na pojawienie się oscylacji.

Spis rysunków

2.1	Schemat reaktora polimeryzacji	3
3.1	Odpowiedzi obiektu na skoki sterowania	5
3.2	Charakterystyka statyczna obiektu	5
3.3	Funkcje przynależności dla modelu statycznego obiektu	6
3.4	Funkcje przynależności dla modelu statycznego obiektu	6
3.5	Wyjście rozmytego modelu statycznego	7
4.1	Schemat modelu kaskadowego Hammersteina	7
4.2	Odpowiedź skokowa obiektu	8
4.3	Wyjście liniowego modelu dynamicznego	9
4.4	Przebieg dla modelu Hammersteina	9
5.1	Odpowiedź skokowa dla klasycznego algorytmu DMC	10
5.2	Przebieg dla klasycznego algorytmu DMC	11
5.3	Odpowiedź skokowa dla algorytmu DMC-SL	11
5.4	Przebieg dla algorytmu DMC-SL	12