

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska**

**Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)**

Sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego nr 3,5

Radosław Pietkun, Jakub Gruszecki, Wojciech Rokicki

Warszawa, 2020

Spis treści

1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru oraz wyznaczenie punktu pracy	2
1.1. Przykładowe sterowanie wraz z odczytem pomiarów	2
1.1.1. Implementacja	3
1.2. Punkt pracy	3
1.2.1. Implementacja	3
2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych oraz badanie właściwości obiektu	4
2.1. Odpowiedzi skokowe	4
2.2. Właściwości statyczne obiektu	4
2.3. Wzmocnienia statyczne	9
2.4. Implementacja	11
3. Przygotowanie odpowiedzi skokowych do regulatora DMC oraz ich aproksymacja .	12
3.1. Odpowiedzi skokowe	12
3.1.1. Implementacja	12
3.2. Aproksymacja odpowiedzi skokowych	12
3.2.1. Implementacja	14
4. Regulator DMC MIMO	16
4.1. Implementacja DMC	16
4.2. Strojenie i regulacja DMC	16
4.3. Implementacja	17

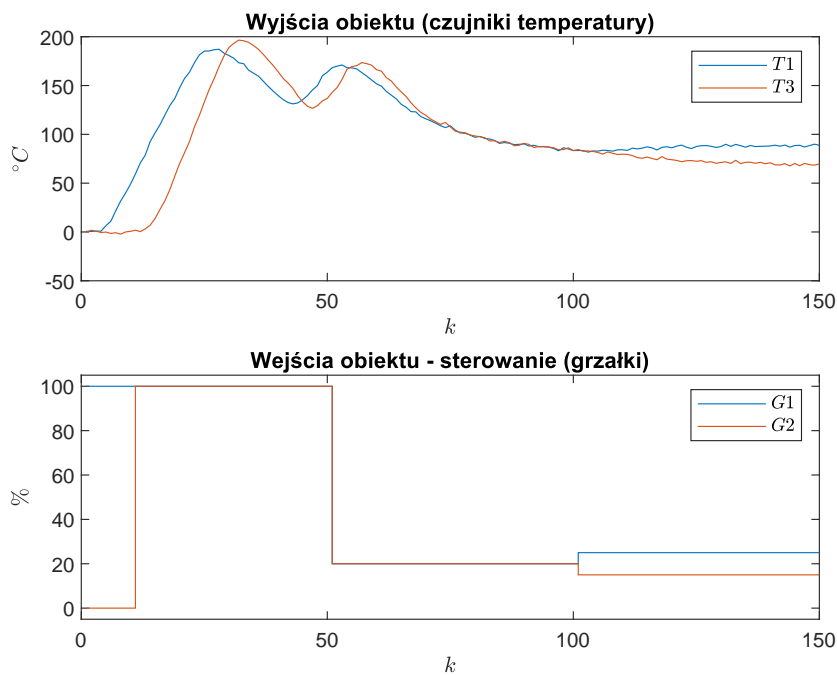
1. Sprawdzenie możliwość sterowania i pomiaru oraz wyznaczenie punktu pracy

1.1. Przykładowe sterowanie wraz z odczytem pomiarów

Podczas testu będziemy zmieniać sygnały sterujące w następujący sposób:

$$\begin{aligned} G1 &= 100 \wedge G2 = 0, \text{ dla } k \in < 0, 10) \\ G1 &= 100 \wedge G2 = 100, \text{ dla } k \in < 10, 50) \\ G1 &= 20 \wedge G2 = 20, \text{ dla } k \in < 50, 100) \\ G1 &= 25 \wedge G2 = 15, \text{ dla } k \geq 100 \end{aligned}$$

Na rys. 1.1 przedstawiono wyniki przeprowadzonej symulacji. Jak widzimy, zmiany mocy grzałek $G1$ i $G2$ wpływają na zmianę mierzonych temperatur $T1$ i $T3$. Oznacza to, mamy możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem.



Rys. 1.1. Sprawdzenie możliwość sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem

1.1.1. Implementacja

Do przetestowania możliwości sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem użyto skryptu `zad1_1.m`.

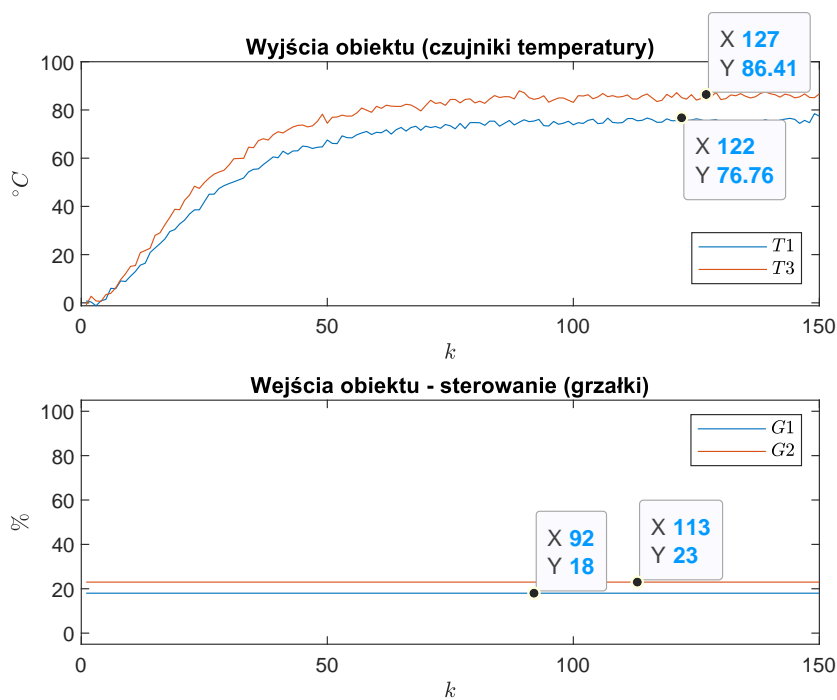
1.2. Punkt pracy

Jako punkt pracy wybraliśmy: $G1 = 18$, $G2 = 23$. Wyniki symulacji dla tego punktu pracy przedstawiono na rys. 1.2.

Dla powyższego punktu pracy pomiary z czujników wynoszą: $T1 = 75,43$, $T3 = 84,64$.

1.2.1. Implementacja

Do wyznaczenia wartości temperatury, odczytanej z czujnika, wykorzystano skrypt `zad1_2.m`.



Rys. 1.2. Punkt pracy

2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych oraz badanie właściwości obiektu

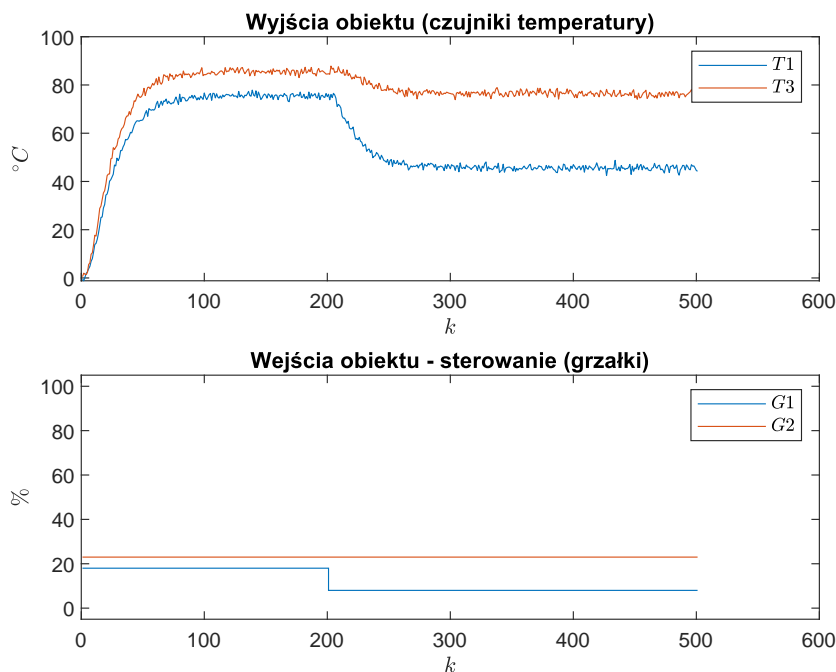
2.1. Odpowiedzi skokowe

W celu uzyskania odpowiedzi skokowych zostały przeprowadzone symulacje dla różnych skoków wartości sterowania $G1$ i $G2$ z punktu pracy. Wymagało to doprowadzenia obiektu do punktu pracy po czym zmiany wartości jednego z wejść. Wyniki testów dla trzech różnych zmian sterowania $G1$ przedstawiono na rys. 2.1 - 2.3. Kolejne trzy testy dla grzałki $G2$ zaprezentowano na rys. 2.4 - 2.6.

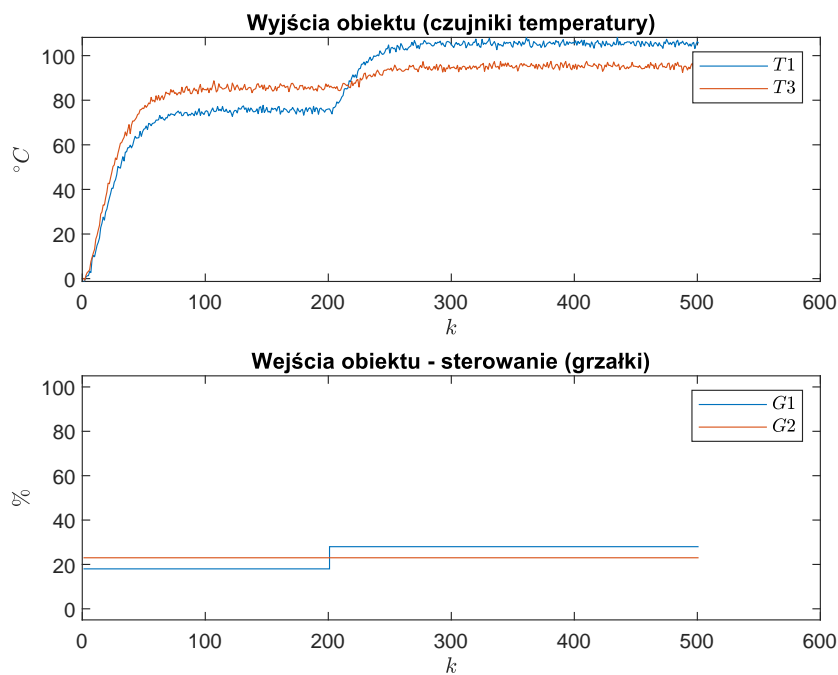
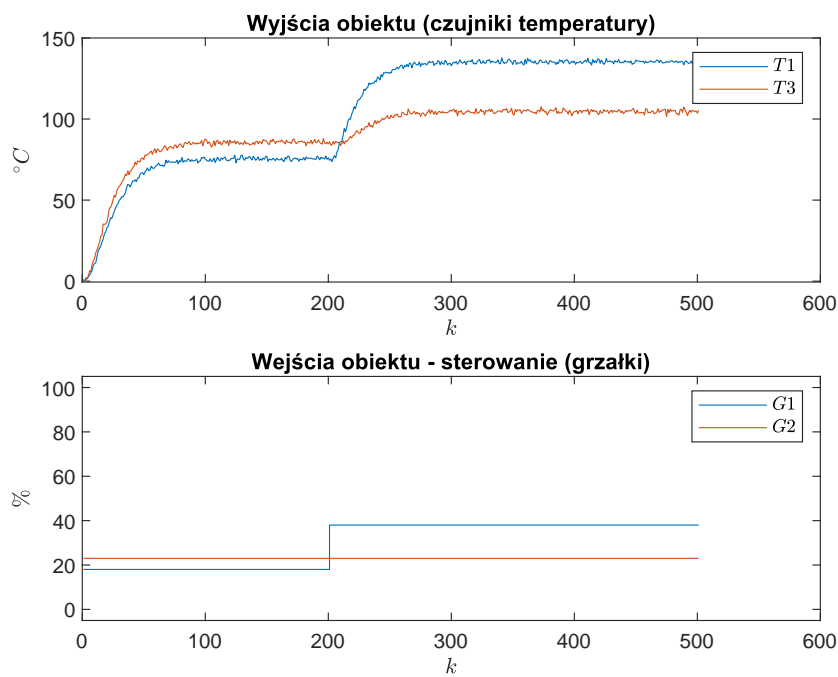
Na rys. 2.7 przedstawiono zebrane na jednym rysunku odpowiedzi skokowe dla wyjścia $T1$, a na rys. 2.8 dla wyjścia $T3$. Dane do tych wykresów zebrano dla trzech różnych skoków wartości sterowania $G1$ oraz trzech różnych skoków wartości sterowania $G2$, takich samych jak tych przedstawionych na rys. 2.1 - 2.6.

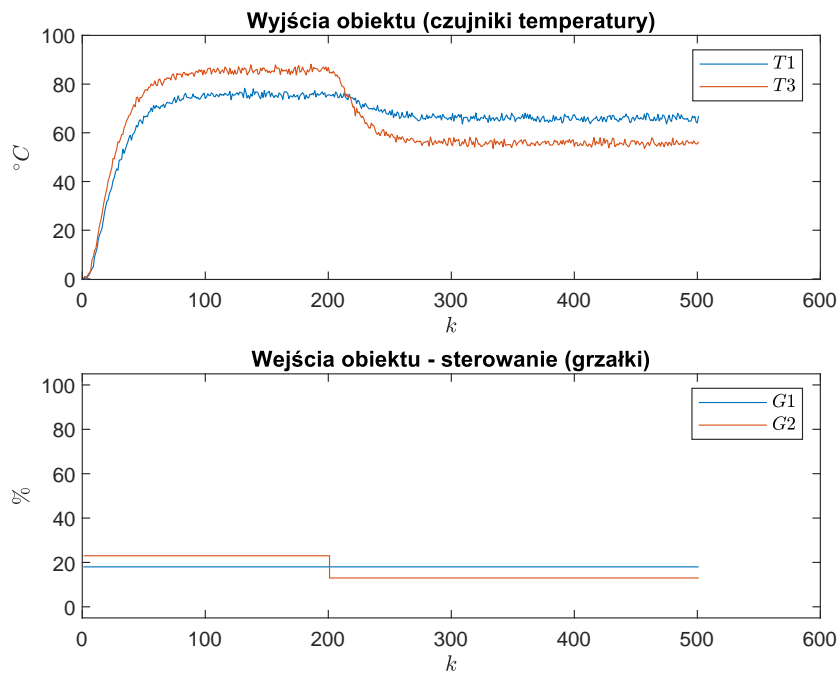
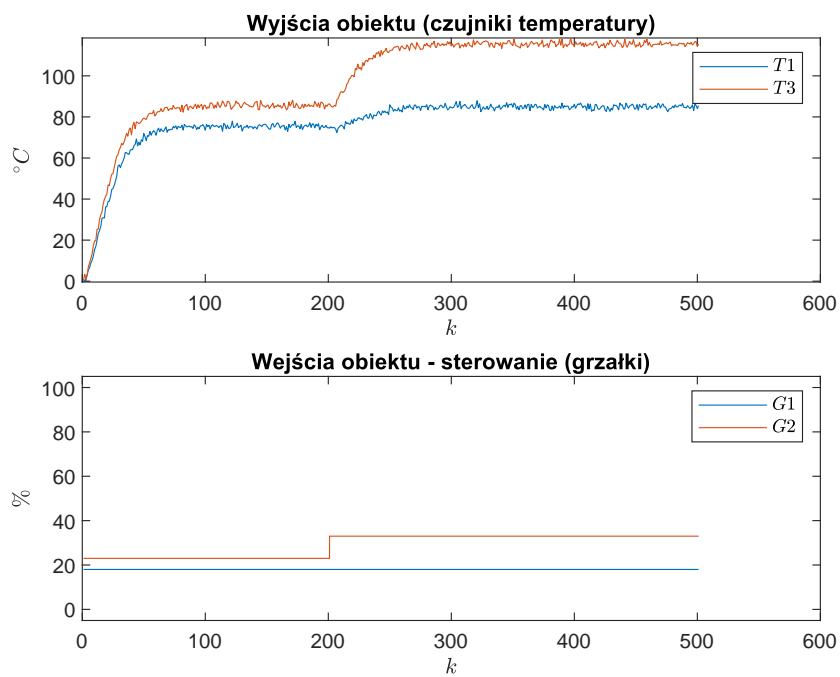
2.2. Właściwości statyczne obiektu

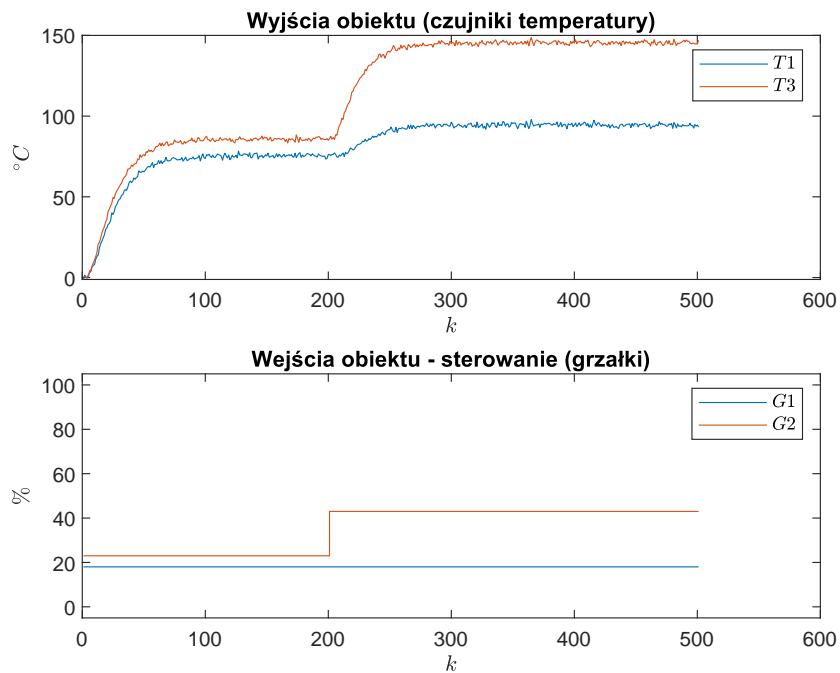
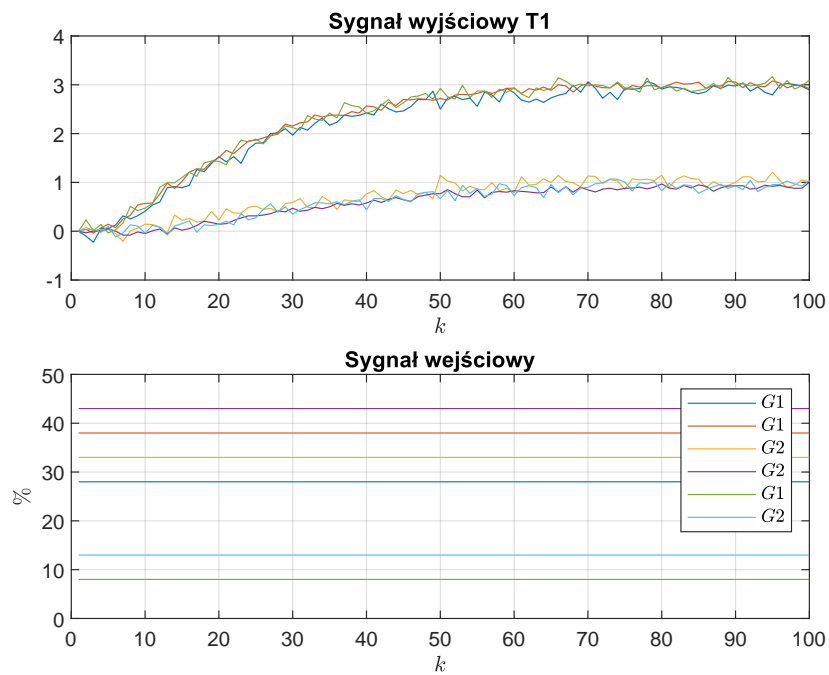
Na rys. 2.9 i 2.10 przedstawiono charakterystyki statyczne procesu, odpowiednio $T1(G1, G2)$ oraz $T3(G1, G2)$. Po wyznaczeniu charakterystyki statycznej obiektu możemy zauważyć, że

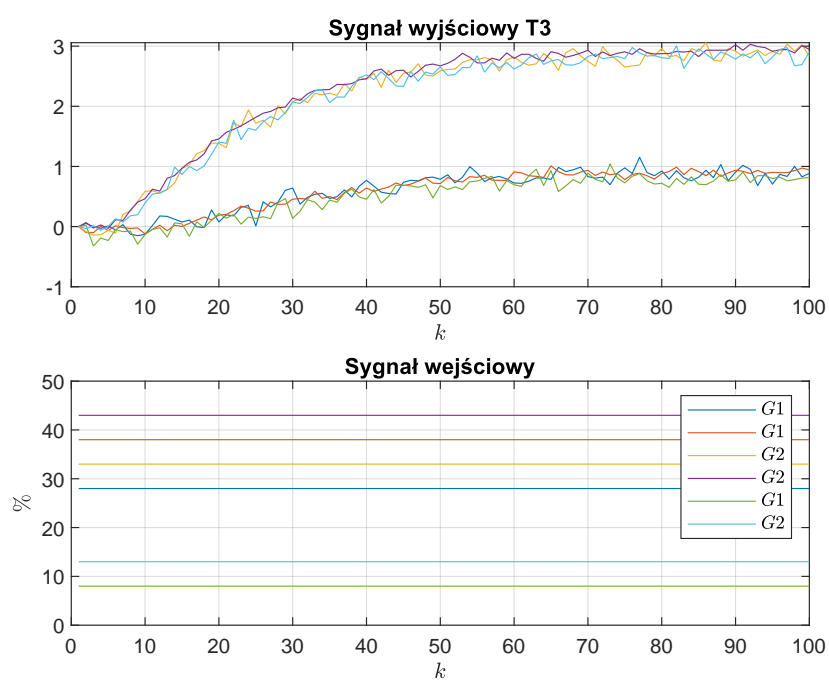


Rys. 2.1. Skok sygnału sterowania $G1$ z 18 na 8 z punktu pracy

Rys. 2.2. Skok sygnału sterowania G_1 z 18 na 28 z punktu pracyRys. 2.3. Skok sygnału sterowania G_1 z 18 na 38 z punktu pracy

Rys. 2.4. Skok sygnału sterowania $G2$ z 23 na 13 z punktu pracyRys. 2.5. Skok sygnału sterowania $G2$ z 23 na 33 z punktu pracy

Rys. 2.6. Skok sygnału sterowania $G2$ z 23 na 43 z punktu pracyRys. 2.7. Odpowiedzi skokowe obiektu dla wyjścia $T1$

Rys. 2.8. Odpowiedzi skokowe obiektu dla wyjścia $T3$

właściwości są w przybliżeniu liniowe dla wartości sterowania w przedziałach $G1 \in \langle 0, 35 \rangle$, $G2 \in \langle 0, 50 \rangle$. Również możemy zauważyć symetrię wykresów charakterystyk dla $T1$ i $T3$.

2.3. Wzmocnienia statyczne

Wyznaczyliśmy wzmocnienie statyczne dla każdego z czterech torów z uwzględnieniem tylko tych przedziałów $G1$ i $G2$, dla których właściwości statyczne obiektu są w przybliżeniu liniowe.

Wzmocnienie statyczne $G1$ dla $T1$:

$$K_{G1}^{T1} = \frac{T1(G1^{\max}, g_2) - T1(G1^{\min}, g_2)}{G1^{\max} - G1^{\min}} = \frac{103,6224 - 0,2797}{35 - 0} = 2,9527 \quad (2.1)$$

Wzmocnienie statyczne $G2$ dla $T1$:

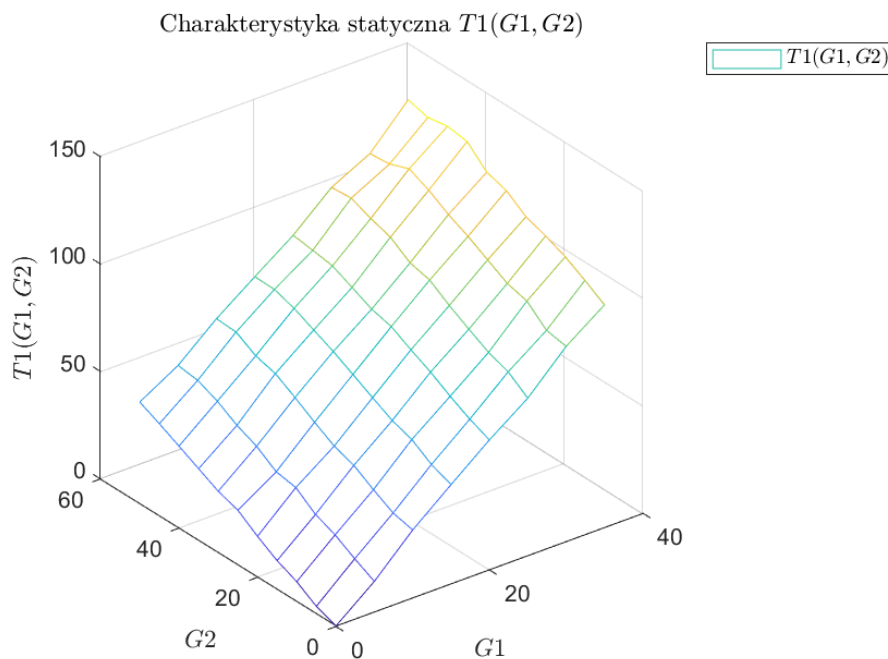
$$K_{G2}^{T1} = \frac{T1(g_1, G2^{\max}) - T1(g_1, G2^{\min})}{G2^{\max} - G2^{\min}} = \frac{47,0235 - 0,2685}{50 - 0} = 0,9351 \quad (2.2)$$

Wzmocnienie statyczne $G1$ dla $T3$:

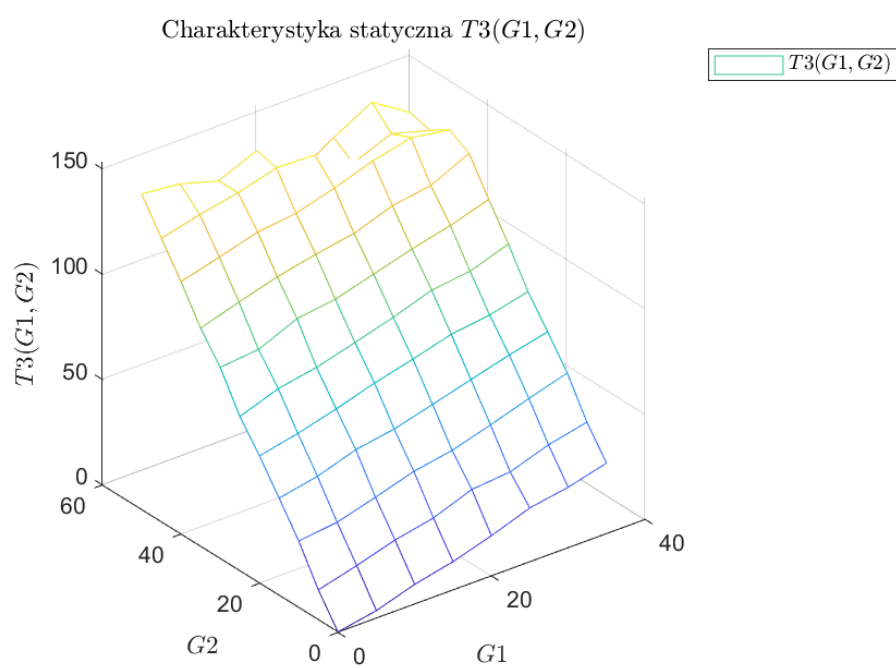
$$K_{G1}^{T3} = \frac{T3(G1^{\max}, g_2) - T3(G1^{\min}, g_2)}{G1^{\max} - G1^{\min}} = \frac{33,1517 - 0,2797}{35 - 0} = 0,9392 \quad (2.3)$$

Wzmocnienie statyczne $G2$ dla $T3$:

$$K_{G2}^{T3} = \frac{T3(g_1, G2^{\max}) - T3(g_1, G2^{\min})}{G2^{\max} - G2^{\min}} = \frac{146,9235 - 0,2685}{50 - 0} = 2,9331 \quad (2.4)$$



Rys. 2.9. Charakterystyka statyczna obiektu dla wyjścia $T1$

Rys. 2.10. Charakterystyka statyczna obiektu dla wyjścia T_3

2.4. Implementacja

Do zrealizowania zadania użyte zostały skrypty `zad2.m` (skrypt wyznaczający odpowiedzi skokowe oraz wyliczający charakterystykę statyczną) i `extractingDataFromFig.m` (skrypt pozyskujący).

3. Przygotowanie odpowiedzi skokowych do regulatora DMC oraz ich aproksymacja

3.1. Odpowiedzi skokowe

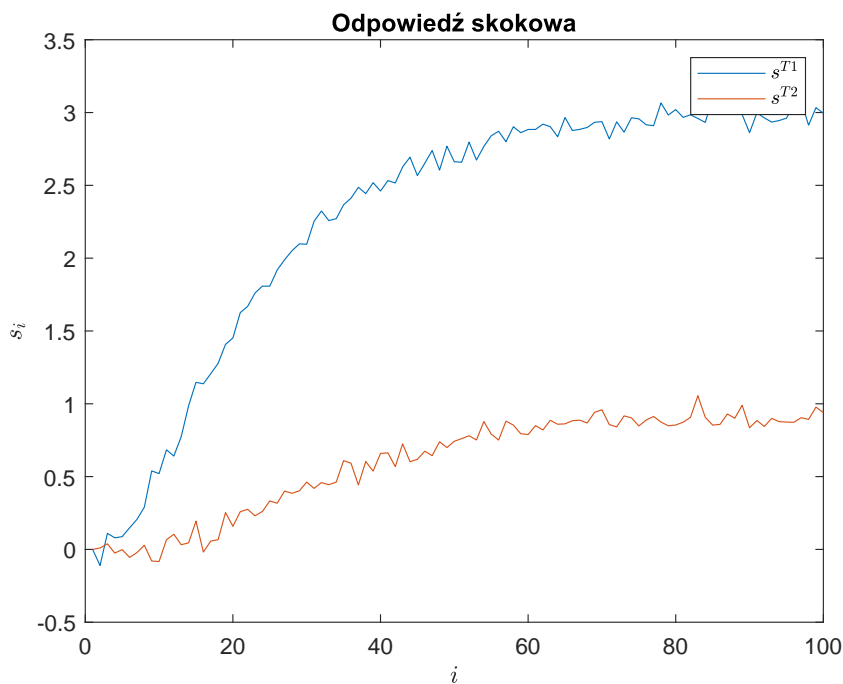
Jako parametry regulatora DMC zostały wybrane odpowiedzi skokowe dla dwóch oddzielnych zmian wartości sterowania $G1$ z 18 na 38 i $G2$ z 23 na 43 z punktu pracy. Odpowiedzi skokowe obu wyjść $T1$ i $T3$ dla skoku $G1$ przedstawiono na rys. 3.1, a dla skoku $G2$ na rys. 3.2.

3.1.1. Implementacja

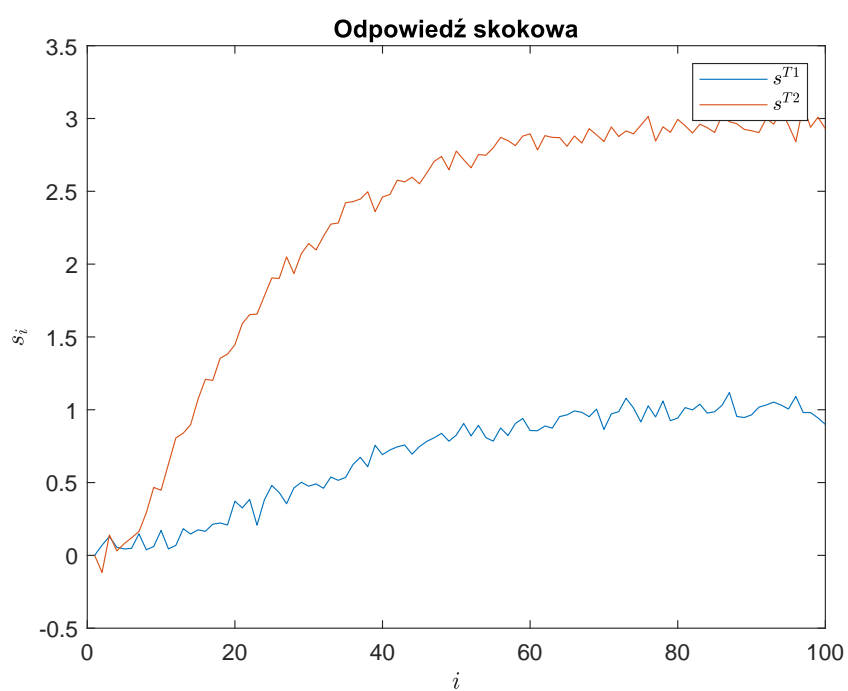
Do zrealizowania zadania zostały użyte skrypty `zad2.m` oraz `odp_skok.m`.

3.2. Aproksymacja odpowiedzi skokowych

Do zaaproksymowania odpowiedzi skokowych został użyty człon inercyjny drugiego rzędu z opóźnieniem o następującej postaci:



Rys. 3.1. Odpowiedź skokowa dla zmiany sygnału sterowania $G1$ z 18 na 38 z punktu pracy



Rys. 3.2. Odpowiedź skokowa dla zmiany sygnału sterowania $G2$ z 23 na 43 z punktu pracy

$$G(s) = \frac{K}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} e^{-T_d s} \quad (3.1)$$

czyli po zastosowaniu transformaty Z

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} z^{-T_d} \quad (3.2)$$

gdzie

$$\begin{aligned} a_1 &= -\alpha_1 - \alpha_2 \\ a_2 &= \alpha_1 \alpha_2 \\ \alpha_1 &= e^{-\frac{1}{T_1}} \\ \alpha_2 &= e^{-\frac{1}{T_2}} \\ b_1 &= \frac{K}{T_1 - T_2} [T_1(1 - \alpha_1) - T_2(1 - \alpha_2)] \\ b_2 &= \frac{K}{T_1 - T_2} [\alpha_1 T_2(1 - \alpha_2) - \alpha_2 T_1(1 - \alpha_1)] \end{aligned}$$

co przekłada się na równanie różnicowe o postaci:

$$y(k) = b_1 u(k - T_D - 1) + b_2 u(k - T_D - 2) - a_1 y(k - 1) - a_2 y(k - 2) \quad (3.3)$$

Biorąc pod uwagę ograniczenie co do dziedziny parametru T_d (liczba całkowita) zdecydowaliśmy się użyć algorytmu genetycznego w celu dobrania parametrów T_1 , T_2 , K , T_d członu aproksymującego odpowiedź skokową. Wskaźnikiem ilościowym wykorzystanym do optymalizacji została funkcja sumy kwadratów różnicy.

$$E = \sum_{i=1}^D (s_i - \hat{s}_i)^2 \quad (3.4)$$

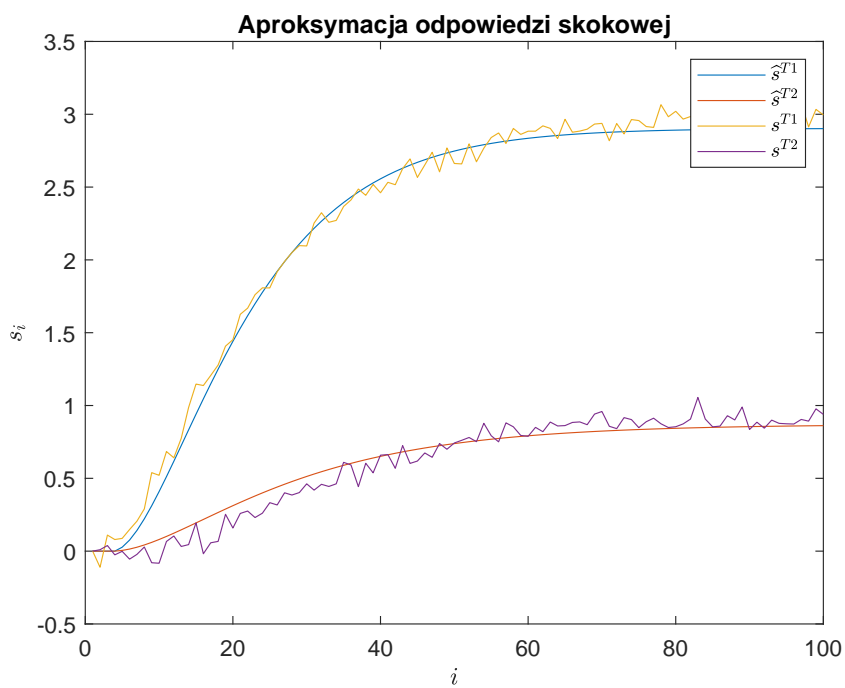
gdzie \hat{s} jest aproksymacją.

Do obliczenia optymalnych parametrów użyliśmy funkcji `ga` (Algorytm Genetyczny) z pakietu `Global Optimization Toolbox`.

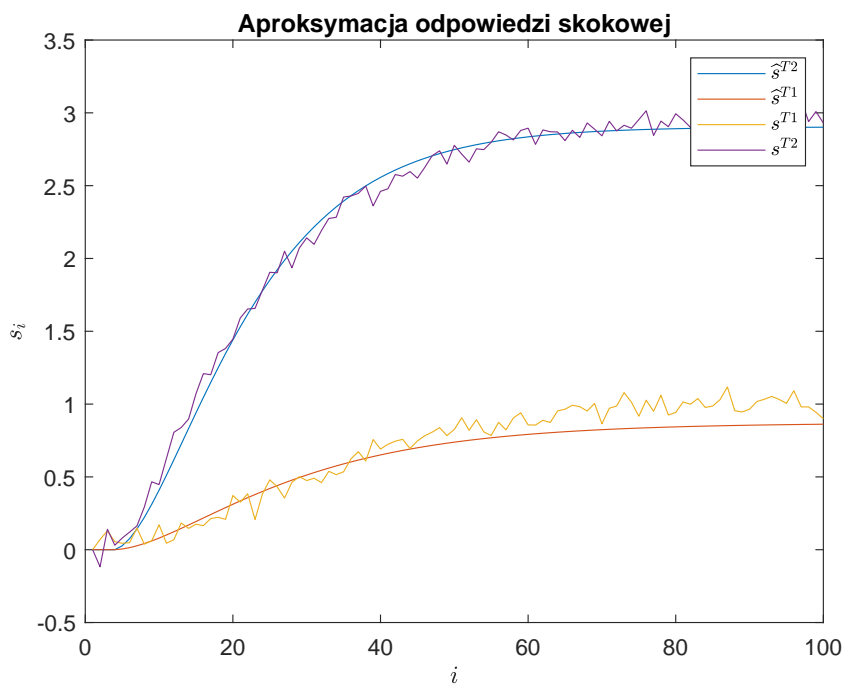
Oryginalne i aproksymowane odpowiedzi skokowe obu wyjść dla skoku $G1$ przedstawiono na rys. 3.3, a dla skoku $G2$ na rys. 3.4.

3.2.1. Implementacja

Do zrealizowania zadania zostały użyte skrypty `odpSkokAproksymowane.m` (główny skrypt wyliczający odpowiedzi aproksymowane oraz rysujący wykresy) oraz `coeffOptim.m` (funkcja celu do zminimalizowania).



Rys. 3.3. Aproksymacja odpowiedzi skokowej dla zmiany sygnału sterowania $G1$ z 18 na 38 z punktu pracy



Rys. 3.4. Aproksymacja odpowiedzi skokowej dla zmiany sygnału sterowania $G2$ z 23 na 43 z punktu pracy

4. Regulator DMC MIMO

4.1. Implementacja DMC

Dla regulatora DMC 2×2 równania algorytmu przyjmą następującą postać:

$$y(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$y^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{\text{zad}}(k) \\ y_2^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$S_l = \begin{bmatrix} s_l^{11} & s_l^{12} \\ s_l^{21} & s_l^{22} \end{bmatrix}, l = 1 \dots D \quad (4.4)$$

$$M = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & S_{N-1} & \dots & S_{N-N_u+1} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$M^P = \begin{bmatrix} S_2 - S_1 & S_3 - S_2 & \dots & S_D - S_{D-1} \\ S_3 - S_1 & S_4 - S_2 & \dots & S_{D+1} - S_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N+1} - S_1 & S_{N+2} - S_2 & \dots & S_{N+D-1} - S_{D-1} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$K = (M^T M + \lambda I)^{-1} M^T \quad (4.7)$$

$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) \quad (4.8)$$

$$\Delta U(k) = K(Y^{\text{zad}}(k) - Y^0(k)) \quad (4.9)$$

4.2. Strojenie i regulacja DMC

Zdefiniowaliśmy następującą trajektorię zadaną $y_1^{\text{zad}}(k)$ dla $T1$ oraz $y_2^{\text{zad}}(k)$ dla $T3$

$$y_1^{\text{zad}}(k) = \begin{cases} 30 & \text{dla } 1 \leq k \leq 199 \\ 50 & \text{dla } 200 \leq k \leq 399 \\ 20 & \text{dla } 400 \leq k \leq 600 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$y_2^{\text{zad}}(k) = \begin{cases} 50 & \text{dla } 1 \leq k \leq 149 \\ 25 & \text{dla } 150 \leq k \leq 299 \\ 40 & \text{dla } 300 \leq k \leq 399 \\ 55 & \text{dla } 400 \leq k \leq 600 \end{cases} \quad (4.11)$$

Regulator DMC stroiliśmy począwszy od największych możliwych wartości horyzontów predykcji oraz sterowania, wynikających z długości zebranej odpowiedzi skokowej $D = 100$. Następnie stopniowo zmniejszaliśmy horyzonty N oraz N_u tak, by z jednej strony zmniejszyć złożoność obliczeniową algorytmu, a z drugiej utrzymać dobrą jakość regulacji. Na końcu manipulowaliśmy współczynnikiem kar za przyrosty sterowania i zbadaliśmy jego wpływ na jakość regulacji.

Wyniki symulacji dla $\lambda = 1$ przedstawiono na rys. 4.1. Widzimy, że jakość regulacji nie jest satysfakcjonująca, występują oscylacje, wartość zadana nie jest osiągnięta. Po zwiększeniu wartości λ na 10 uzyskaliśmy przebiegi widoczne na rys. 4.2. Tym razem jakość regulacji jest dobra, wartość zadana jest osiągnięta, układ działa szybko. Zatem współczynnik λ okazał się kluczowym parametrem przy strojeniu regulatora.

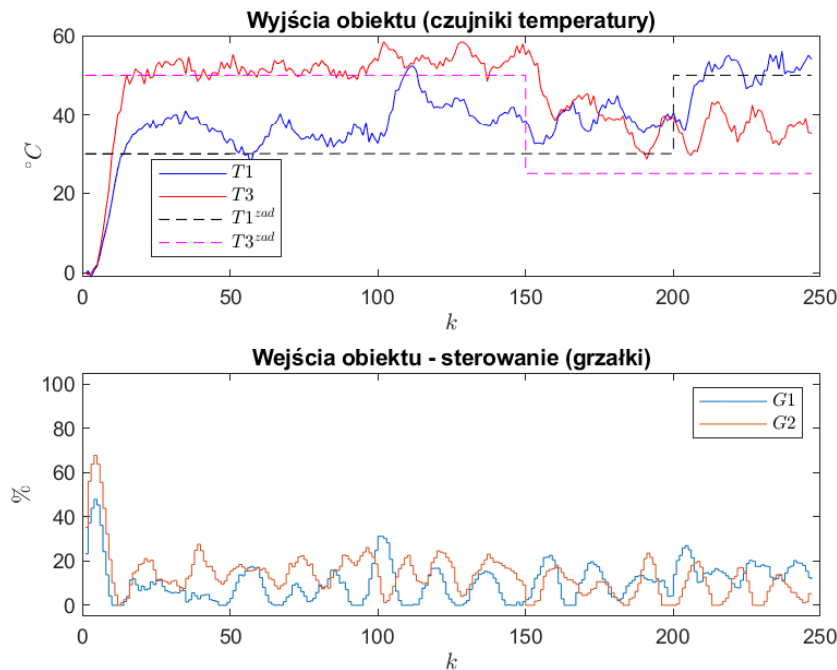
Ostatecznie przyjęliśmy następujące nastawy regulatora DMC

$$N = 20, N_u = 3, \lambda = 10 \quad (4.12)$$

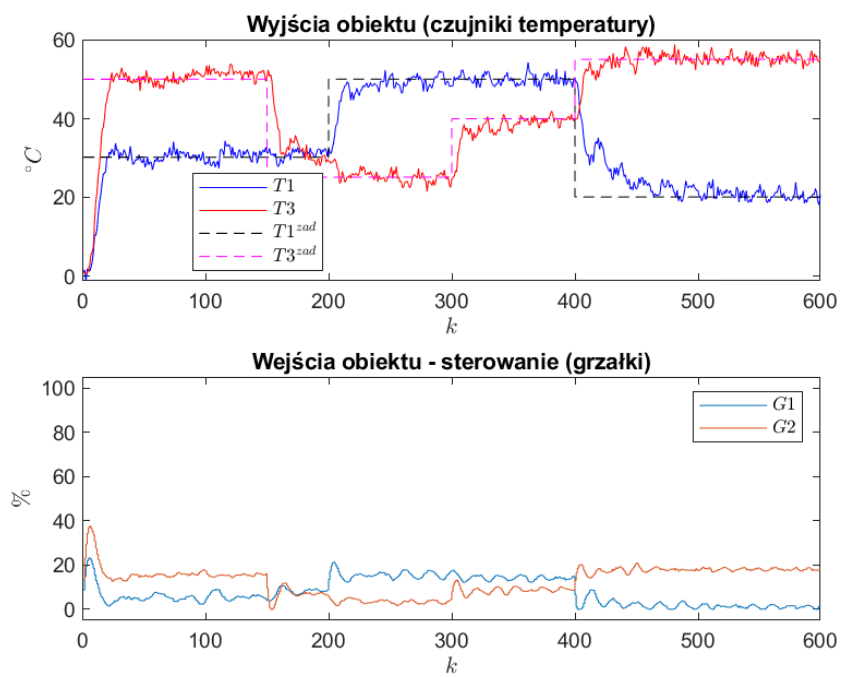
Parametry te zapewniły poprawną pracę regulatora.

4.3. Implementacja

Do kalibracji oraz symulacji algorytmu DMC wykorzystaliśmy skrypt `DMC_MIMO.m`



Rys. 4.1. Symulacja procesu dla $\lambda = 1$

Rys. 4.2. Symulacja procesu dla $\lambda = 10$