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

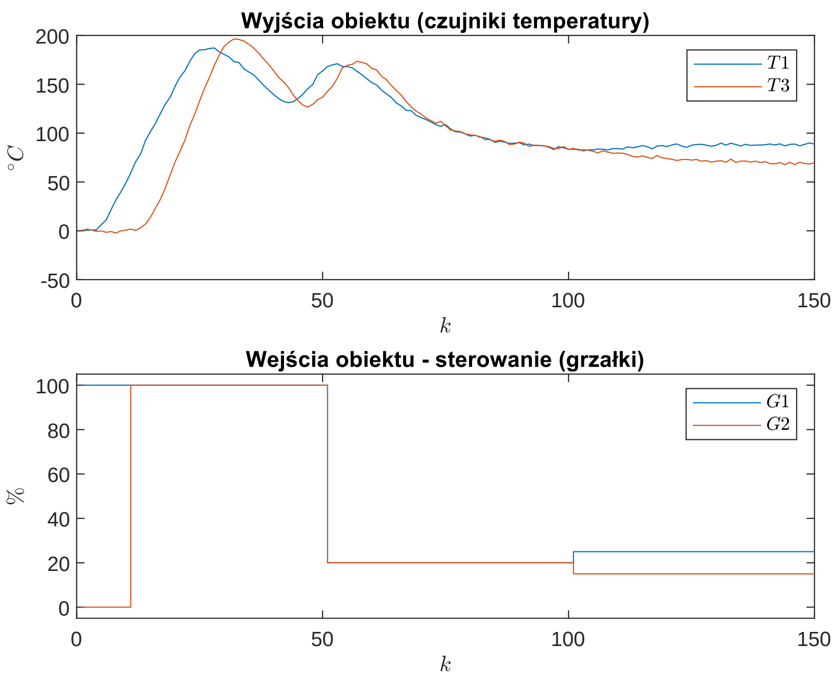
1. Sprawdzenie możliwość sterowania i pomiaru oraz wyznaczenie punktu pracy

1.1. Przykładowe sterowanie wraz z odczytem pomiarów

Podczas testu będziemy zmieniać sygnały sterujące w następujący sposób:

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

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`.

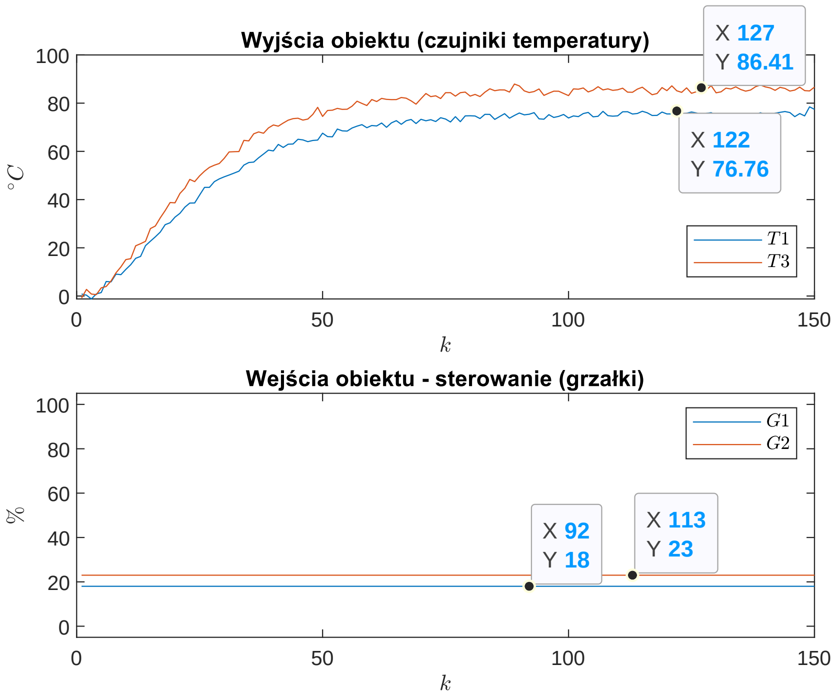
1.2. Punkt pracy

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

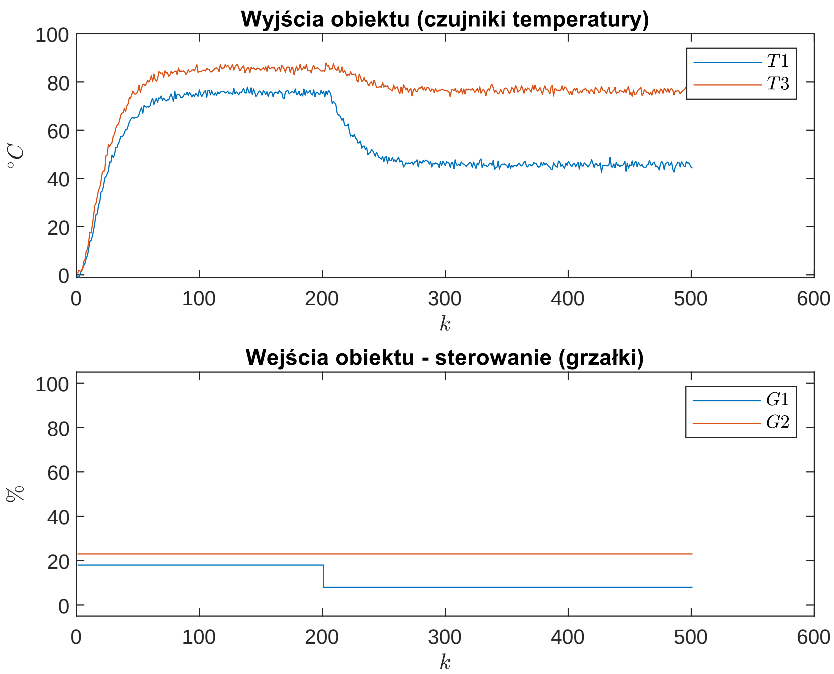
2.1. Odpowiedzi skokowe

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 jedego 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.

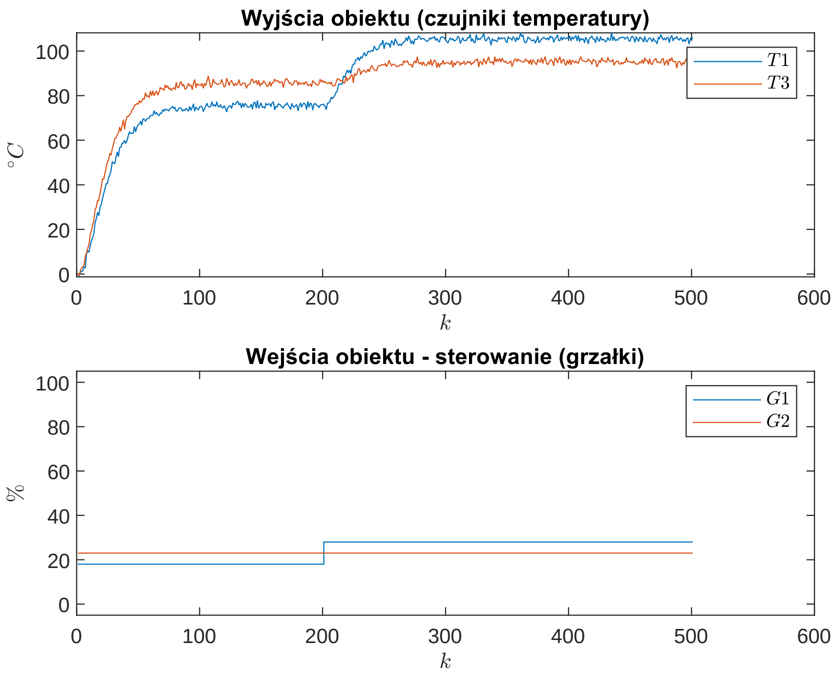
Na rys. 2.7 przedstawiono zebrane na jednym rysunku odpowiedzi skokowe dla wyjścia $T1$, a na rys. 2.8 dla wyjścia $T3$. Dane do tych wykresów zebrano dla trzech różnych skoków wartości sterowania $G1$ oraz trzech różnych skoków wartości sterowania $G2$, takich samych jak tych przedstawionych na rys.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

2.2. Właściwości statyczne obiektu

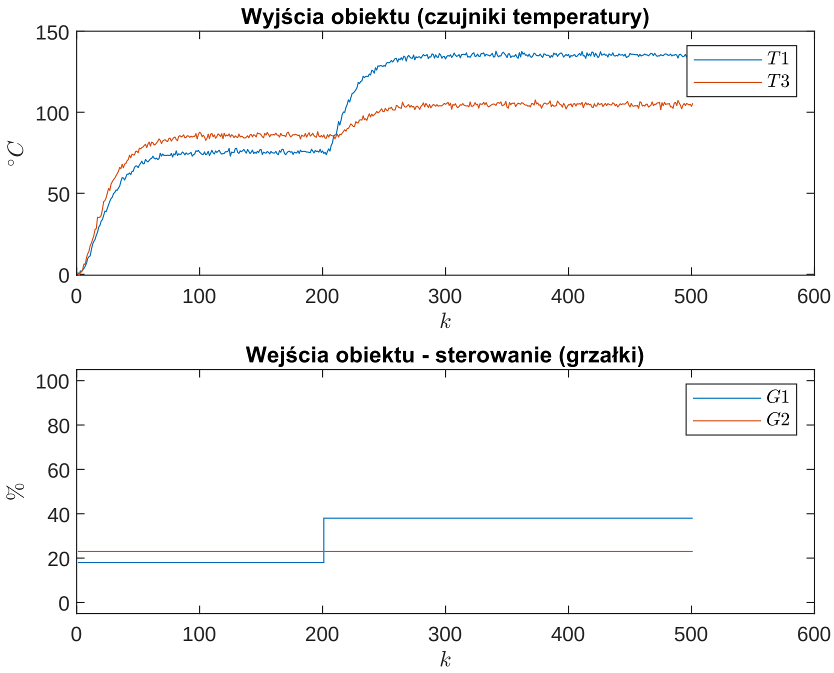
Na rys. 2.9 i 2.10 przedstawiono charakterystyki statyczne procesu, odpowiednio $T1(G1, G2)$ oraz $T3(G1, G2)$. Po wyznaczeniu charakterystyki statycznej obiektu możemy zauważyć, że



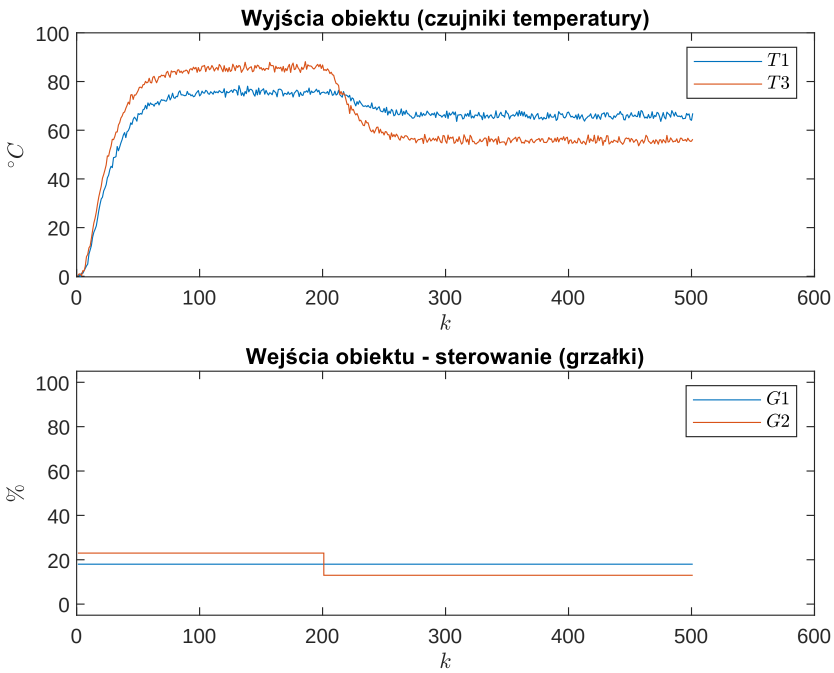
Rys. 2.1. Skok sygnału sterowania $G1$ z 18 na 8 z punktu pracy



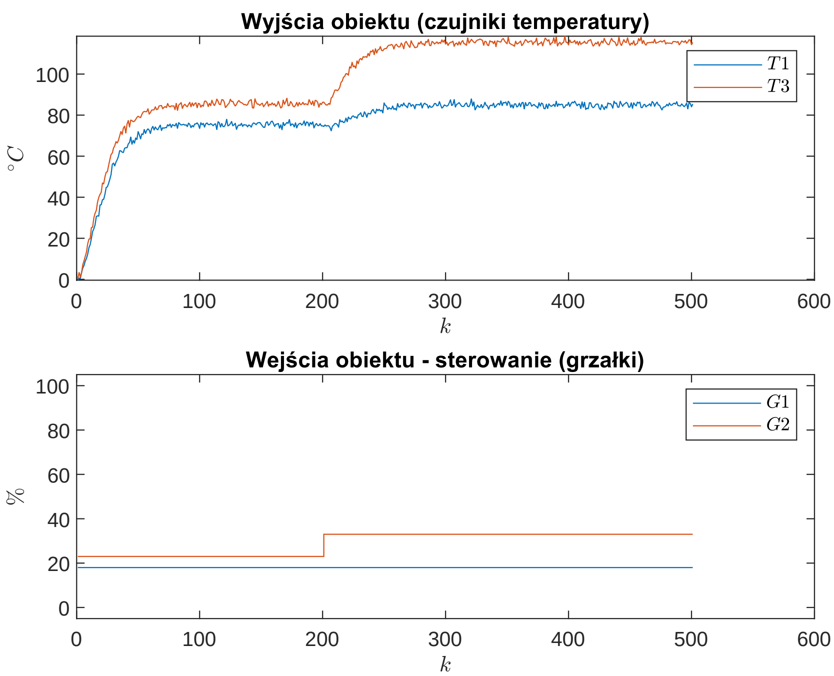
Rys. 2.2. Skok sygnału sterowania $G1$ z 18 na 28 z punktu pracy



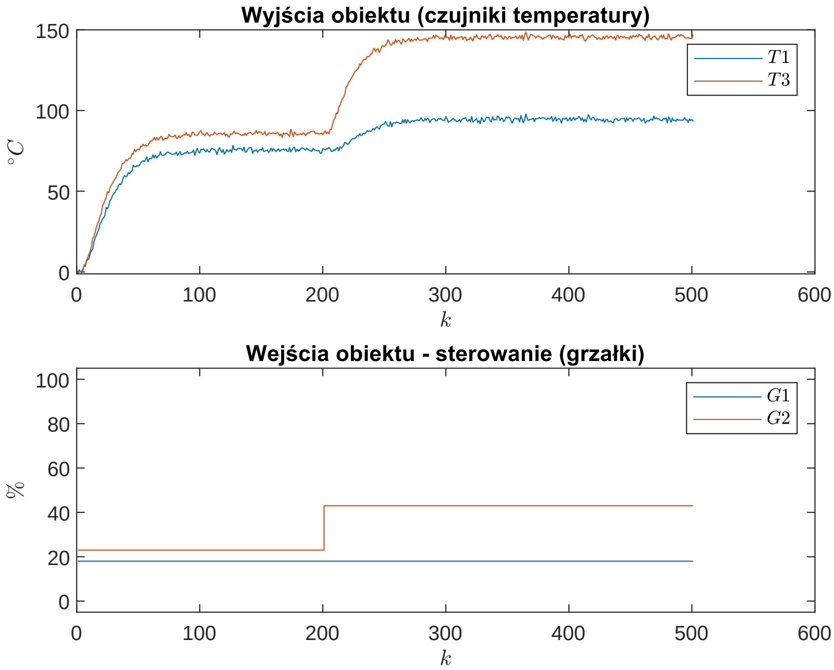
Rys. 2.3. Skok sygnału sterowania $G1$ z 18 na 38 z punktu pracy



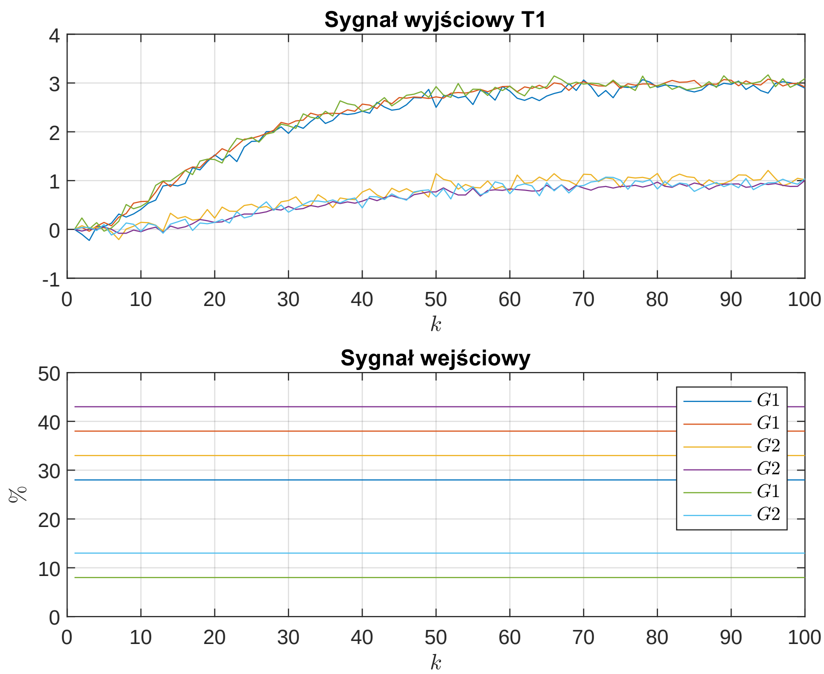
Rys. 2.4. Skok sygnału sterowania $G2$ z 23 na 13 z punktu pracy



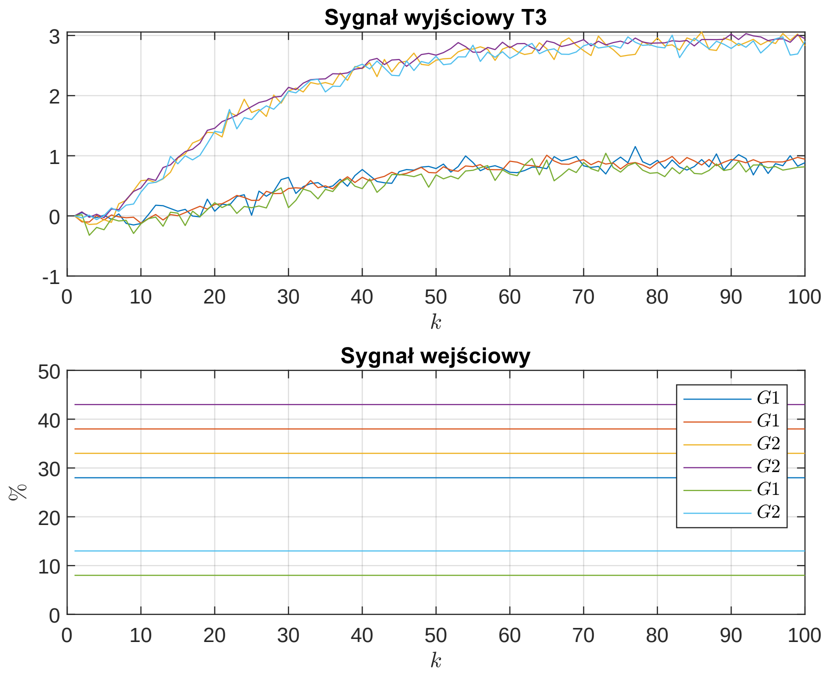
Rys. 2.5. Skok sygnału sterowania $G2$ z 23 na 33 z punktu pracy



Rys. 2.6. Skok sygnału sterowania $G2$ z 23 na 43 z punktu pracy



Rys. 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 $T1$:

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

Wzmocnienie statyczne $G2$ dla $T1$:

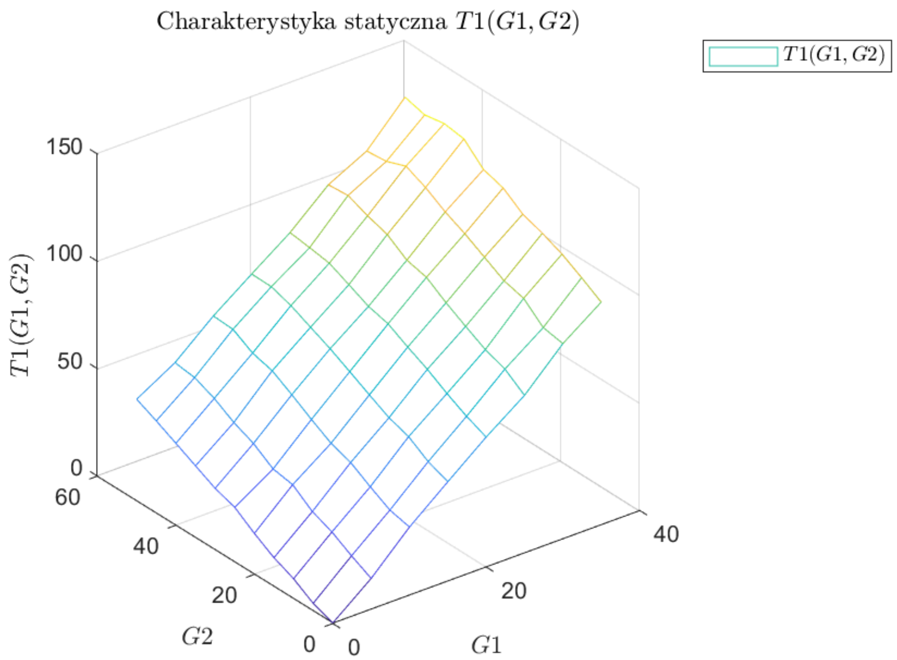
$$K_{G2}^{T1} = \frac{T1(g_1, G2^{\max}) - T1(g_1, G2^{\min})}{G2^{\max} - G2^{\min}} = \frac{47{,}0235 - 0{,}2685}{50 - 0} = 0{,}9351 \tag{2.2}$$

Wzmocnienie statyczne $G1$ dla $T3$:

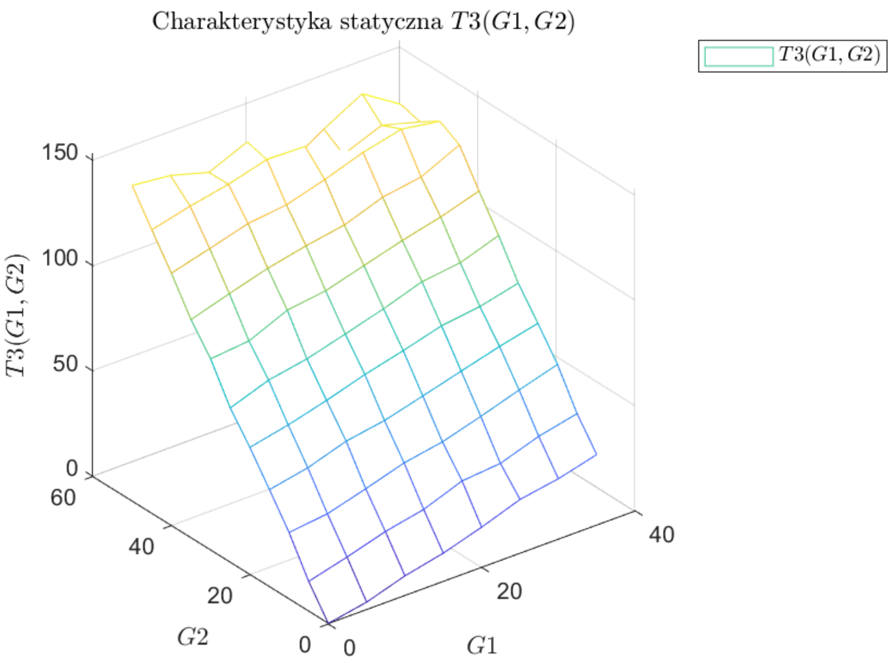
$$K_{G1}^{T3} = \frac{T3(G1^{\max}, g_2) - T3(G1^{\min}, g_2)}{G1^{\max} - G1^{\min}} = \frac{33{,}1517 - 0{,}2797}{35 - 0} = 0{,}9392 \tag{2.3}$$

Wzmocnienie statyczne $G2$ dla $T3$:

$$K_{G2}^{T3} = \frac{T3(g_1, G2^{\max}) - T_3(g_1, G2^{\min})}{G2^{\max} - G2^{\min}} = \frac{146{,}9235 - 0{,}2685}{50 - 0} = 2{,}9331 \tag{2.4}$$



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



Rys. 2.10. Charakterystyka statyczna obiektu dla wyjścia $T3$

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

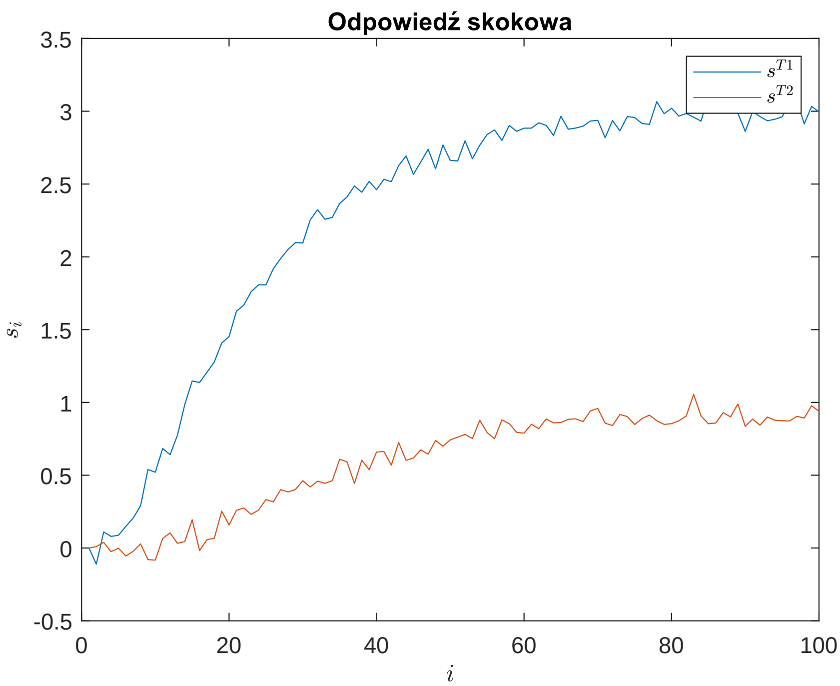
Jako parametry regulatora DMC zostały wybrane odpowiedzi skokowe dla dwóch oddzielnych zmian wartości sterowania $G1$ z 18 na 38 i $G2$ z 23 na 43 z punktu pracy. Odpowiedzi skokowe obu wyjść $T1$ i $T3$ dla skoku $G1$ przedstawiono na rys. 3.1, a dla skoku $G2$ na rys. 3.2.

3.1.1. Implementacja

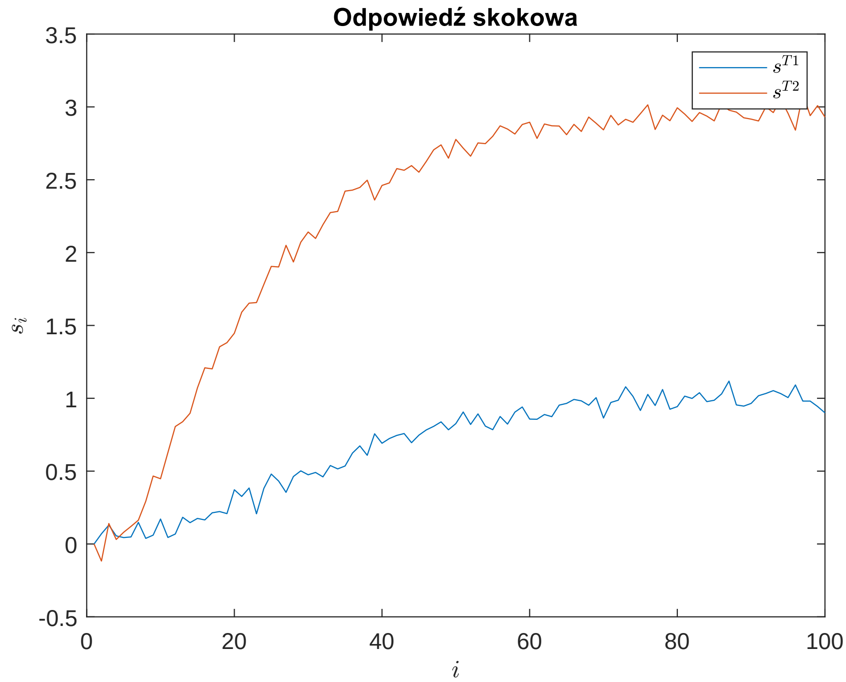
Do zrealizowania zadania zostały użyte skrypty `zad2.m` oraz `odp_skok.m`.

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

$$G(s) = \frac{K}{(sT_1+1)(sT_2+1)} e^{-T_\mathrm{d}s} \tag{3.1}$$

czyli po zastosowaniu transformaty Z

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} z^{-T_\mathrm{d}} \tag{3.2}$$

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 równianie różnicowe o postaci:

$$y(k) = b_1 u(k - T_\mathrm{D} - 1) + b_2 u(k - T_\mathrm{D} - 2) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \tag{3.3}$$

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.

$$E = \sum_{i=1}^{\mathrm{D}} (s_i - \widehat{s}_i)^2 \tag{3.4}$$

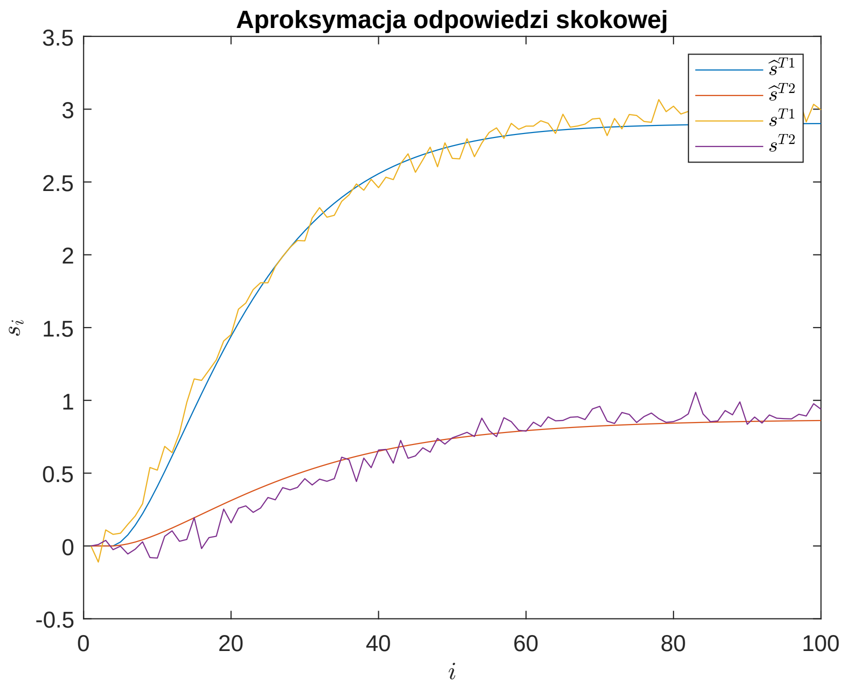
gdzie $\widehat{s}$ jest aproksymacją.

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

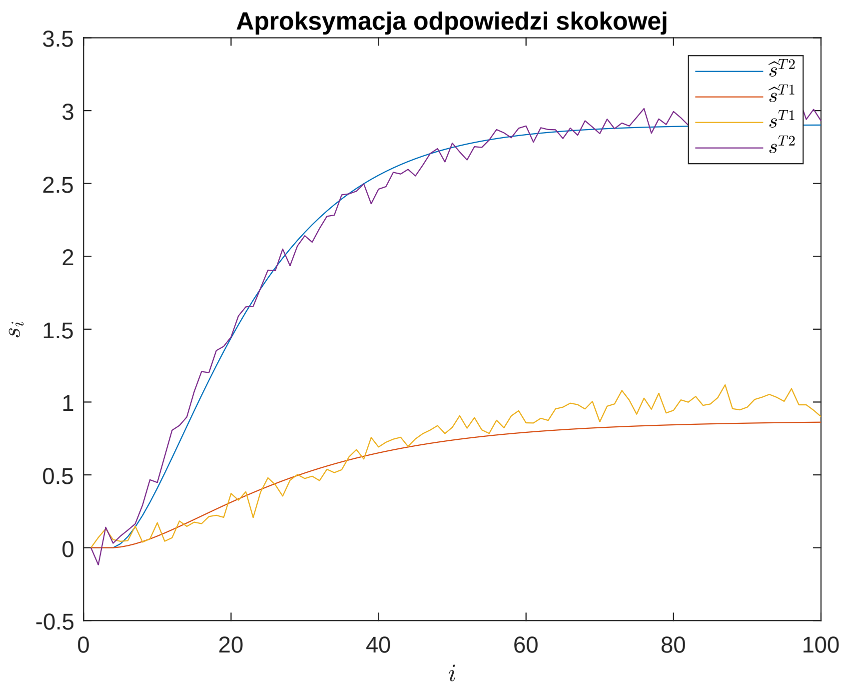
Oryginalne i aproksymowane odpowiedzi skokowe obu wyjść dla skoku $G1$ przedstawiono na rys. 3.3, a dla skoku $G2$ na rys. 3.4.

3.2.1. Implementacja

Do zrealizowania zadania zostały użyte skrypty `odpSkokAproksymowane.m` (główny skrypt wyliczający odpowiedzi apkroksymowane 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:

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

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

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

$$S_l = \begin{bmatrix} s_l^{11} & s_l^{12} \\ s_l^{21} & s_l^{22} \end{bmatrix}, l = 1...D \tag{4.4}$$

$$M = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & S_{N-1} & \dots & S_{N-N_{\mathrm{u}}+1} \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

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

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

$$Y^0(k) = Y(k) + M^{\mathrm{P}} \Delta U^{\mathrm{P}}(k) \tag{4.8}$$

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

4.2. Strojenie DMC

4.3. Regulacja DMC