

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania  
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego nr 4

Radosław Pietkun, Jakub Gruszecki, Wojciech Rokicki

Warszawa, 2020

## Uwagi wstępne

Niektóre z poniższych zadań były wykonywane na symulowanym obiekcie stanowiska grzejąco-chłodzącego bez włączonych zakłóceń (flaga *Noise\_ON* była ustawiona na 0). Przyczyną jest późne poinformowanie nas o parametrach funkcji symulującej obiekt.

Pomiar oraz regulacja stanowiska grzejąco-chłodzącego następowała z częstotliwością 1s, a stanowiska ze zbiornikami z częstotliwością 0,1s

# Spis treści

<b>1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru oraz wyznaczenie punktu pracy . . . .</b>	<b>3</b>
1.1. Przykładowe sterowanie wraz z odczytem pomiarów . . . . .	3
1.2. Punkt pracy . . . . .	3
<b>2. Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>3. Implementacja regulatora DMC MIMO oraz przygotowanie odpowiedzi skokowych</b>	<b>8</b>
3.1. Implementacja DMC . . . . .	8
3.2. Odpowiedzi skokowe . . . . .	9
3.3. Strojenie DMC . . . . .	9
<b>4. Panel operatora . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>5. Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>6. Implementacja wielopętlowego regulatora PID . . . . .</b>	<b>18</b>
6.1. Dobieranie nastaw PID . . . . .	18

# 1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru oraz wyznaczenie punktu pracy

## 1.1. Przykładowe sterowanie wraz z odczytem pomiarów

Podczas testu będziemy zmieniać sygnały sterujące w następujący sposób:

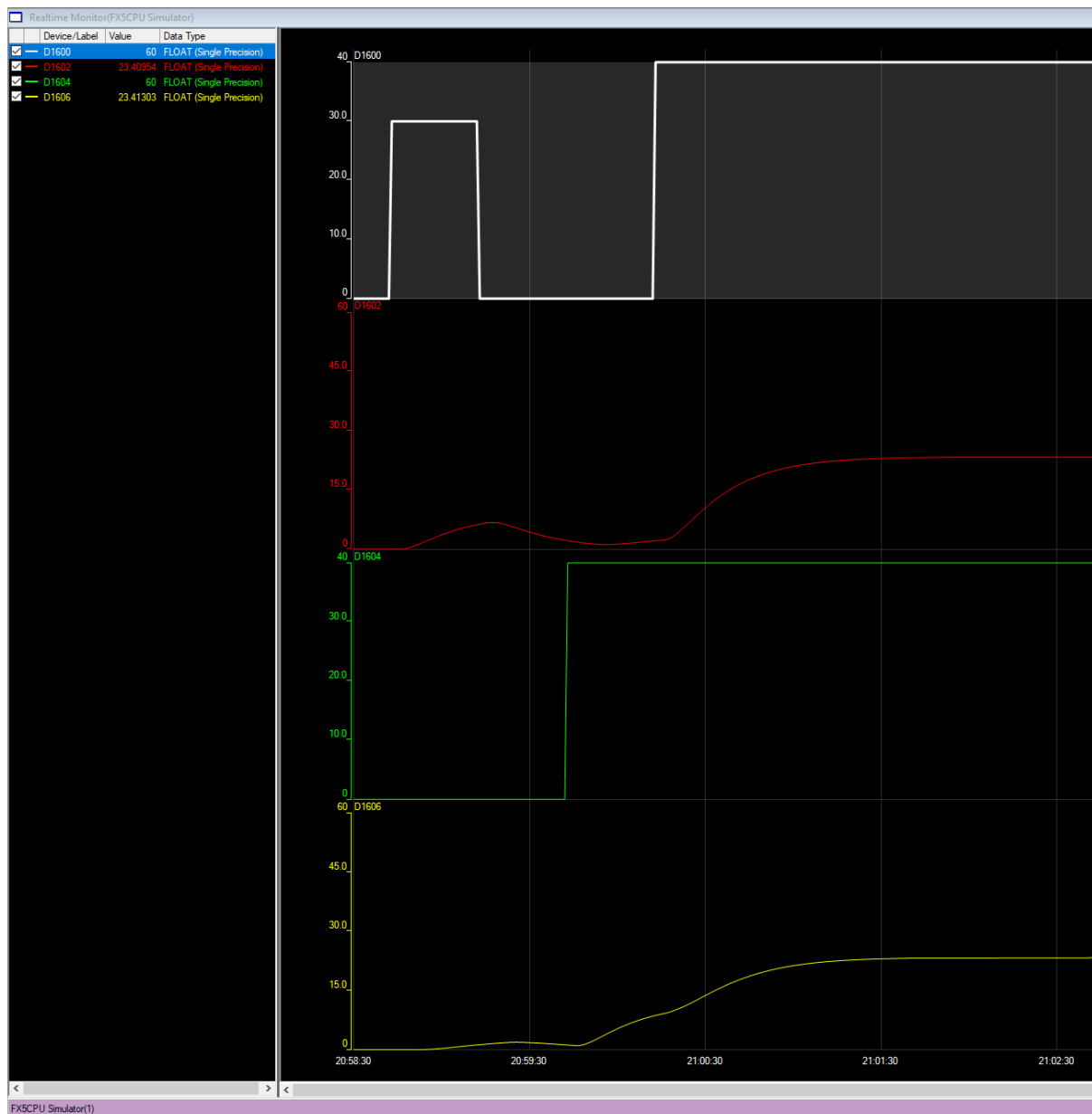
$$\begin{aligned}G1 &= 0 \wedge G2 = 0, \text{ dla } k \in < 0, 10) \\G1 &= 30 \wedge G2 = 0, \text{ dla } k \in < 10, 30) \\G1 &= 0 \wedge G2 = 0, \text{ dla } k \in < 30, 50) \\G1 &= 0 \wedge G2 = 40, \text{ dla } k \in < 50, 70) \\G1 &= 40 \wedge G2 = 40, \text{ dla } k \geq 70\end{aligned}$$

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.

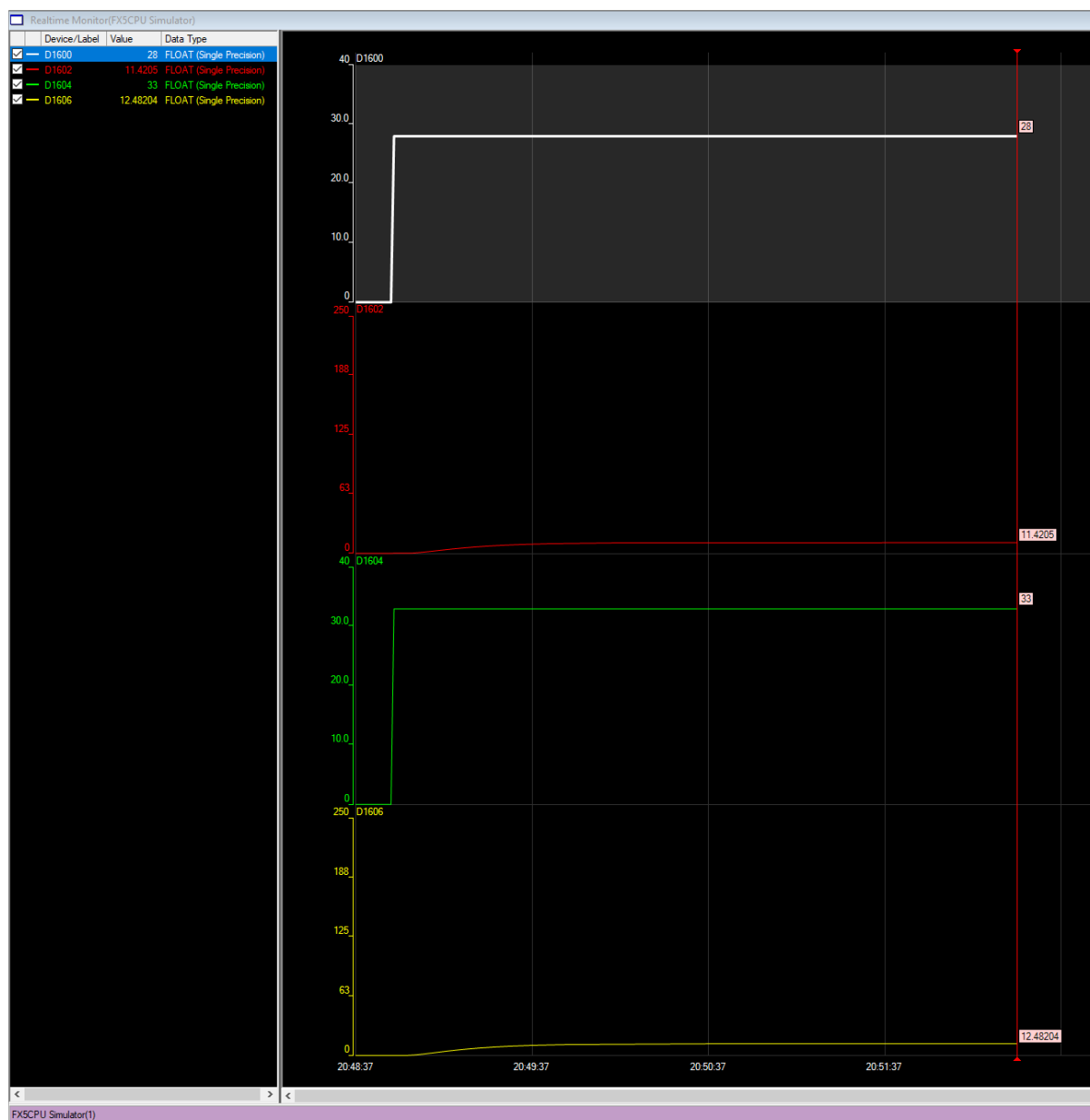
## 1.2. Punkt pracy

Zadany punkt pracy:  $G1 = 28$ ,  $G2 = 33$ . Wyniki symulacji dla tego punktu pracy przedstawiono na rys. 1.2.

Dla powyższego punktu pracy pomiary z czujników wynoszą:  $T1 = 11,4205$ ,  $T3 = 12,48204$ .



Rys. 1.1. Sprawdzenie możliwości sterowania i pomiaru w komunikacji ze stanowiskiem - Sygnały od góry:  $G1$ ,  $T1$ ,  $G2$ ,  $T3$

Rys. 1.2. Punkt pracy - Sygnały od góry:  $G1$ ,  $T1$ ,  $G2$ ,  $T3$

## 2. Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska

W celu zabezpieczenia stanowiska w wypadku uszkodzenia czujnika (tj.  $T1$  lub  $T3$  przekroczy  $250^{\circ}\text{C}$ ) zaimplementowano poniżej przedstawiony (rys. 2.1) mechanizm zabezpieczający.

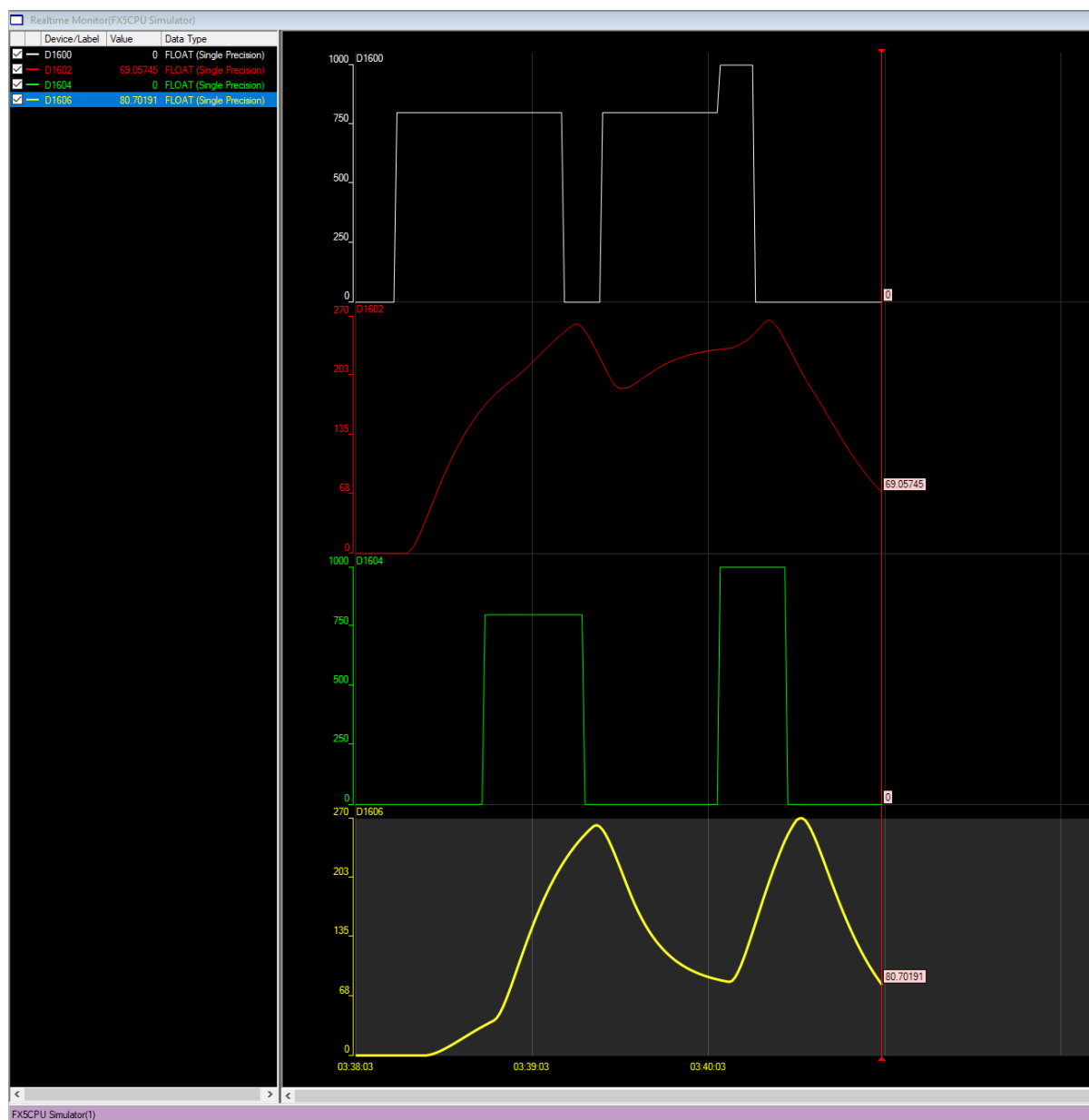
```
// Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska

// Jeśli T1 będzie  $\geq 250$  st. C to wyłącz najbliższą grzałkę G1
≡ IF TEST_HC[2]  $\geq 250$  THEN
    // G1
    TEST_HC[1] := 0;
END_IF;

// Jeśli T3 będzie  $\geq 250$  st. C to wyłącz najbliższą grzałkę G2
≡ IF TEST_HC[4]  $\geq 250$  THEN
    // G2
    TEST_HC[3] := 0;
END_IF;
```

Rys. 2.1. Kod zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska grzejąco-chłodzącego

Jak widzimy na powyższym rysunku (rys. 2.2), gdy temperatura któregoś z wyjść  $T1$  lub  $T3$  zaczyna przekraczać temperaturę  $250^{\circ}\text{C}$  to odpowiednio wyłączane są grzałki  $G1$  dla przekroczenia temperatury przez  $T1$  i  $G2$  dla przekroczenia temperatury przez  $T3$ . Dzięki temu grzałka sąsiadująca z czujnikiem, który zmierzył niebezpieczną temperaturę zostanie wyłączona.



Rys. 2.2. Wykres prezentujący działanie mechanizmu zabezpieczającego przed uszkodzeniem stanowiska grzejąco-chłodzącego



### 3. Implementacja regulatora DMC MIMO oraz przygotowanie odpowiedzi skokowych

Dzięki przeprowadzeniu eksperymentów z poprzedniego podpunktu byliśmy w stanie wyznaczyć optymalne ograniczenia wartości sterowania tzn.  $< 0, 1000 >$  dla tych wartości wyjścia obiektu oscylowały w granicach ok.  $(0, 300)^\circ C$ .

#### 3.1. Implementacja DMC

Dla regulatora DMC  $2 \times 2$  równania algorytmu przyjmą następującą postać:

$$y(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$y^{\text{zad}}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{\text{zad}}(k) \\ y_2^{\text{zad}}(k) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$S_l = \begin{bmatrix} s_l^{11} & s_l^{12} \\ s_l^{21} & s_l^{22} \end{bmatrix}, l = 1 \dots D \quad (3.4)$$

$$M = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ S_2 & S_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & S_{N-1} & \dots & S_{N-N_u+1} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$M^P = \begin{bmatrix} S_2 - S_1 & S_3 - S_2 & \dots & S_D - S_{D-1} \\ S_3 - S_1 & S_4 - S_2 & \dots & S_{D+1} - S_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N+1} - S_1 & S_{N+2} - S_2 & \dots & S_{N+D-1} - S_{D-1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$K = (M^T M + \lambda I)^{-1} M^T \quad (3.7)$$

$$Y^0(k) = Y(k) + M^P \Delta U^P(k) \quad (3.8)$$

$$\Delta U(k) = K(Y^{\text{zad}}(k) - Y^0(k)) \quad (3.9)$$

Prawo regulacji dla regulatora oszczędnego:

$$\Delta u(k|k) = \overline{K}_1(Y^{\text{zad}}(k) - Y(k) - M^P \Delta U^P(k)) \quad (3.10)$$

$$= \overline{K}_1(Y^{\text{zad}}(k) - Y(k)) - \overline{K}_1 M^P \Delta U^P(k) \quad (3.11)$$

$$= \sum_{i=1}^{N \cdot n_y} \overline{K}_{1,j}(Y^{\text{zad}}(k) - Y(k)) - \overline{K}_1 M^P \Delta U^P(k) \quad (3.12)$$

$$\Delta u(k|k) = \mathbf{K}_e E(k) - \mathbf{K}_u \Delta U^P(k) \quad (3.13)$$

,gdzie

$$E(k) = Y^{\text{zad}}(k) - Y(k) \quad (3.14)$$

$$\mathbf{K}_e = \sum_{i=1}^{N \cdot n_y} K_{1,i} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{K}_u = \overline{\mathbf{K}}_1 \mathbf{M}^P \quad (3.16)$$

### 3.2. Odpowiedzi skokowe

Jako parametry regulatora DMC zostały wybrane odpowiedzi skokowe dla dwóch oddzielnych zmian wartości sterowania  $G1$  z 0 na 800 i  $G2$  z 0 na 800. Odpowiedzi skokowe obu wyjść  $T1$  i  $T3$  dla skoku  $G1$  przedstawiono na rys. 3.1, a dla skoku  $G2$  na rys. 3.2.

Po otrzymaniu powyższych odpowiedzi skokowych w programie **LogViewer** i zapisaniu ich w pliku tekstowym, a następnie poddaniu obróbce w excelu, w celu wybrania interesujących nas wartości, otrzymaliśmy następujące odpowiedzi skokowe - rys. 3.3 i rys. 3.4 (dalej wykorzystane do wyznaczenia parametrów regulatora DMC).

### 3.3. Strojenie DMC

Przy strojeniu DMC kluczową rolę odgrywała optymalizacja rozmiaru horyzontu dynamiki pod kątem zajętości rejestrów oraz czasu wykonania obliczeń do regulacji DMC na sterowniku PLC. Wielokrotnie trzeba było skracać horyzont dynamiki aby rozmiar wektora pozwalał na zakończenie pracy programu **HC\_REGULATION** (w trybie *fixed scan* z przerwaniami 1000ms) w zadanym czasie. Dla zbyt długiego horyzontu obliczenia na wektorach zajmowały zbyt dużo czasu co skutkowało błędem przedstawionym na rys.3.5.

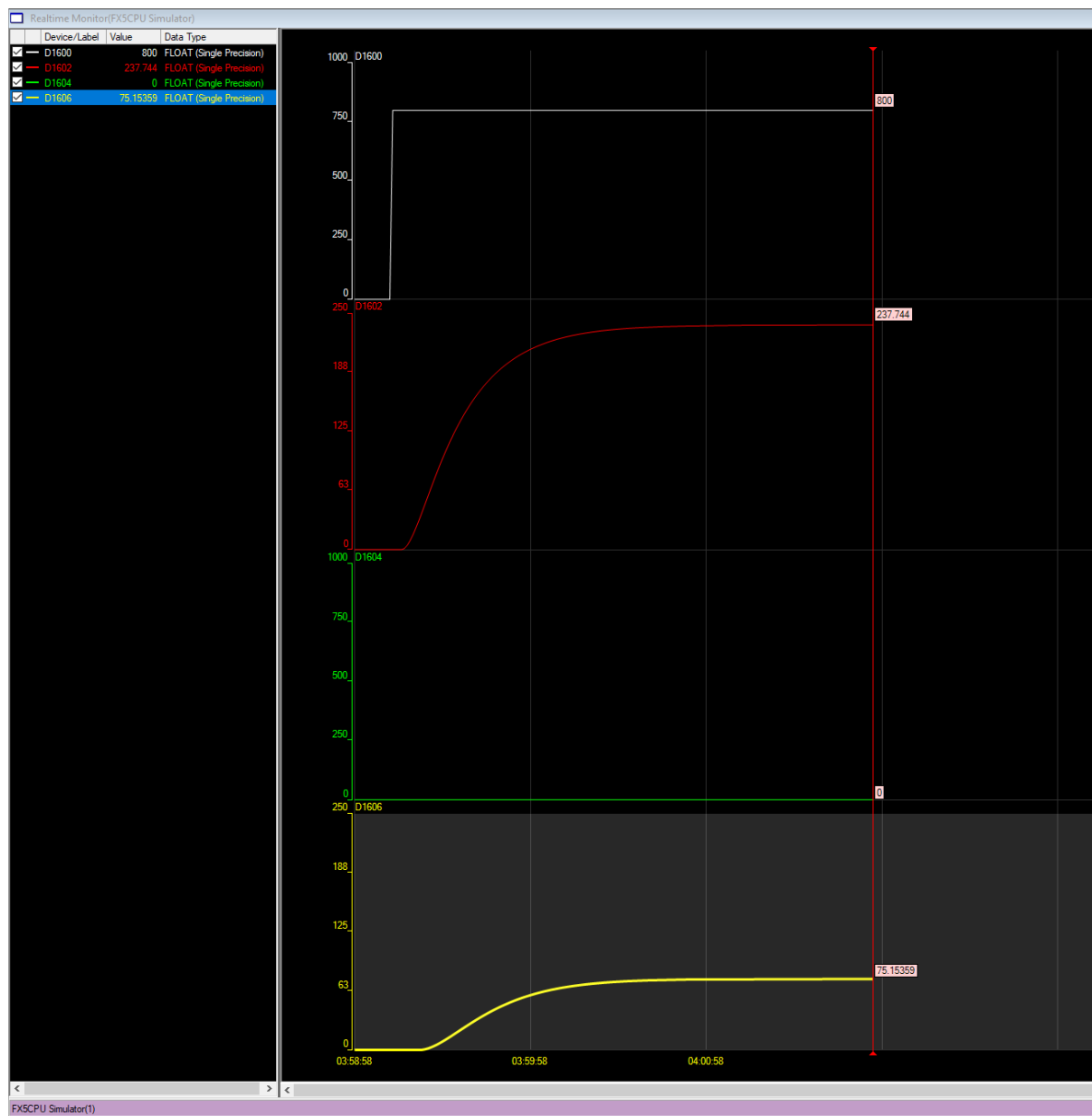
Najdłuższy horyzont dynamiki, który udało nam się użyć to  $D = 90$ . Dla takiego horyzontu dynamiki przyjęliśmy najdłuższe możliwe horyzonty predykcji i sterowania ( $N = 90$ ,  $N_u = 90$ ), ponieważ nie wpływało to na spowolnienie działania symulacji oszczędnego regulatora DMC w środowisku **GxWorks**.

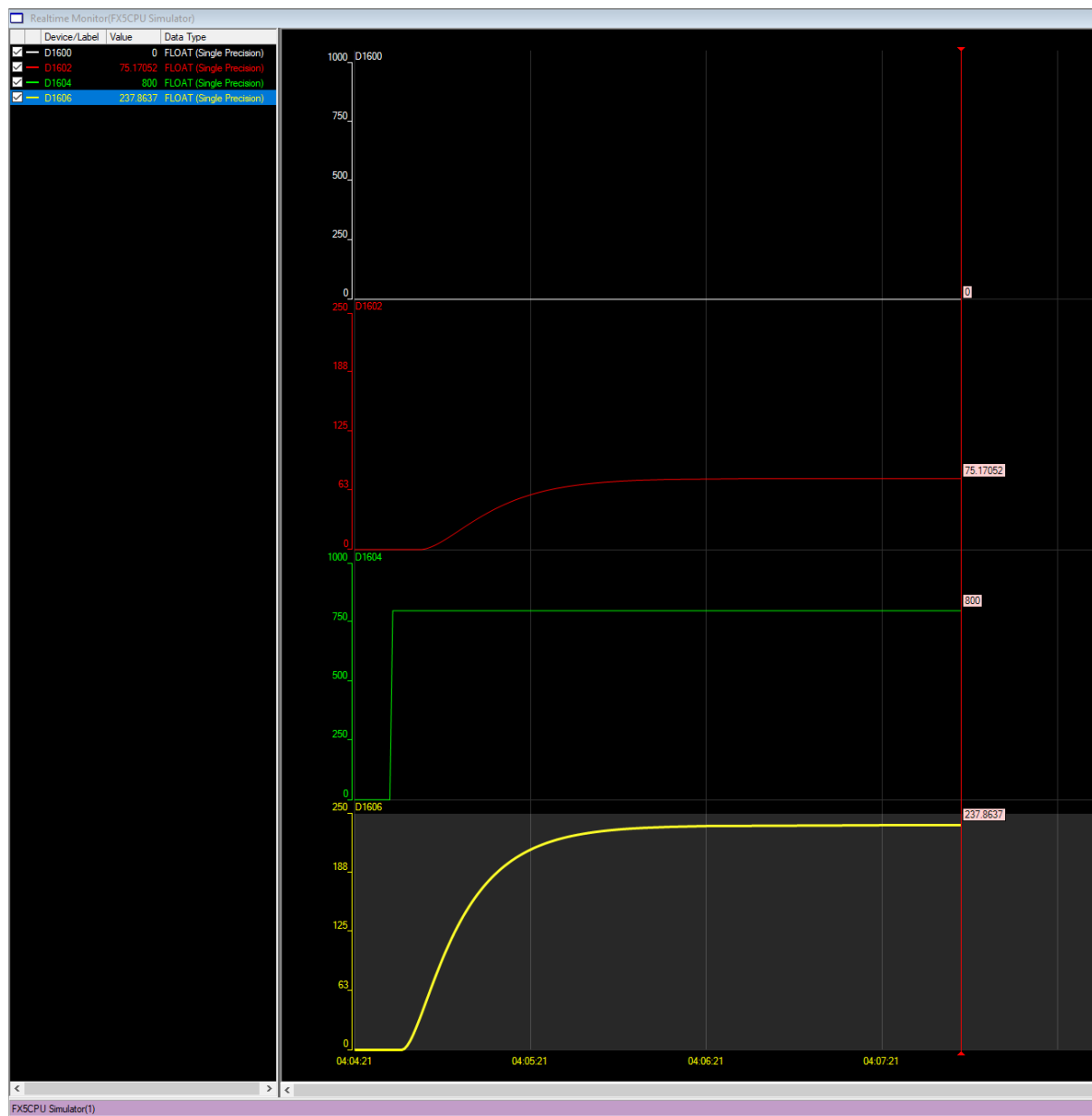
W programie **INIT** następuje inicjalizacja, potrzebnych do regulacji DMC, parametrów (wygenerowanych w programie **MATLAB** - skrypt **matlab/DMC\_CALC.m**), po czym następuje regulacja obiektu w programie **HC\_REGULATION**.

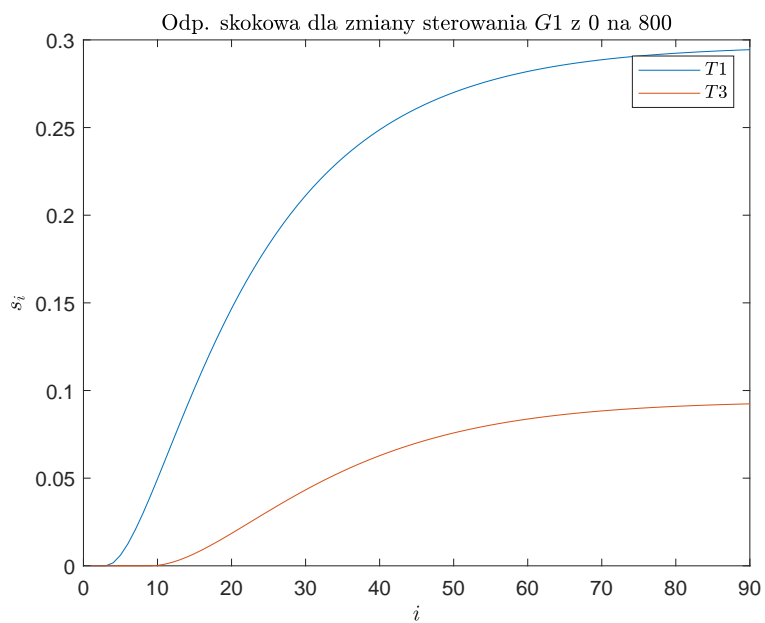
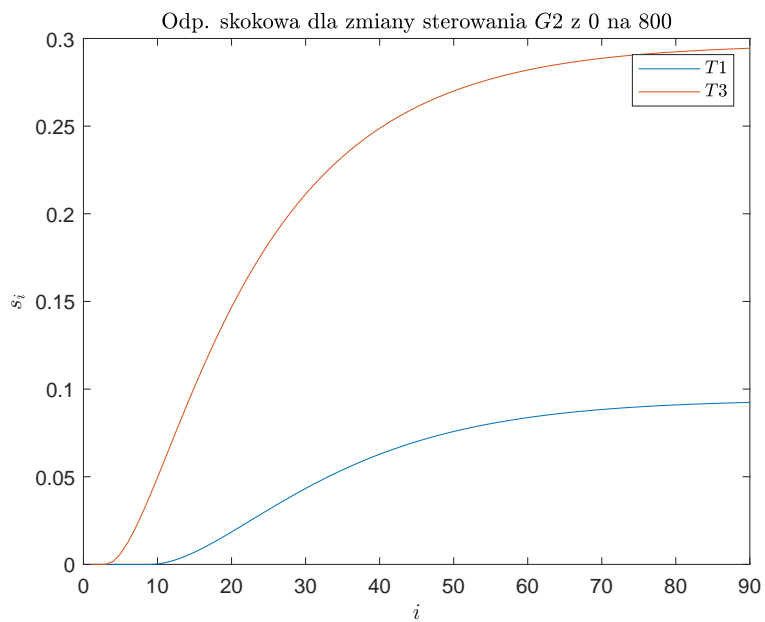
Dla przyjętych początkowych wartości  $\lambda = 1$  regulacja była satysfakcjonująca (rys.3.6), jednak dla  $\lambda = 10$  kosztem szybkości regulacji byliśmy w stanie otrzymać łagodniejsze sterowanie oraz mniejsze przeregulowanie (rys.3.7). Przy większych wartościach współczynnika kary  $\lambda$  regulator był zbyt powolny.

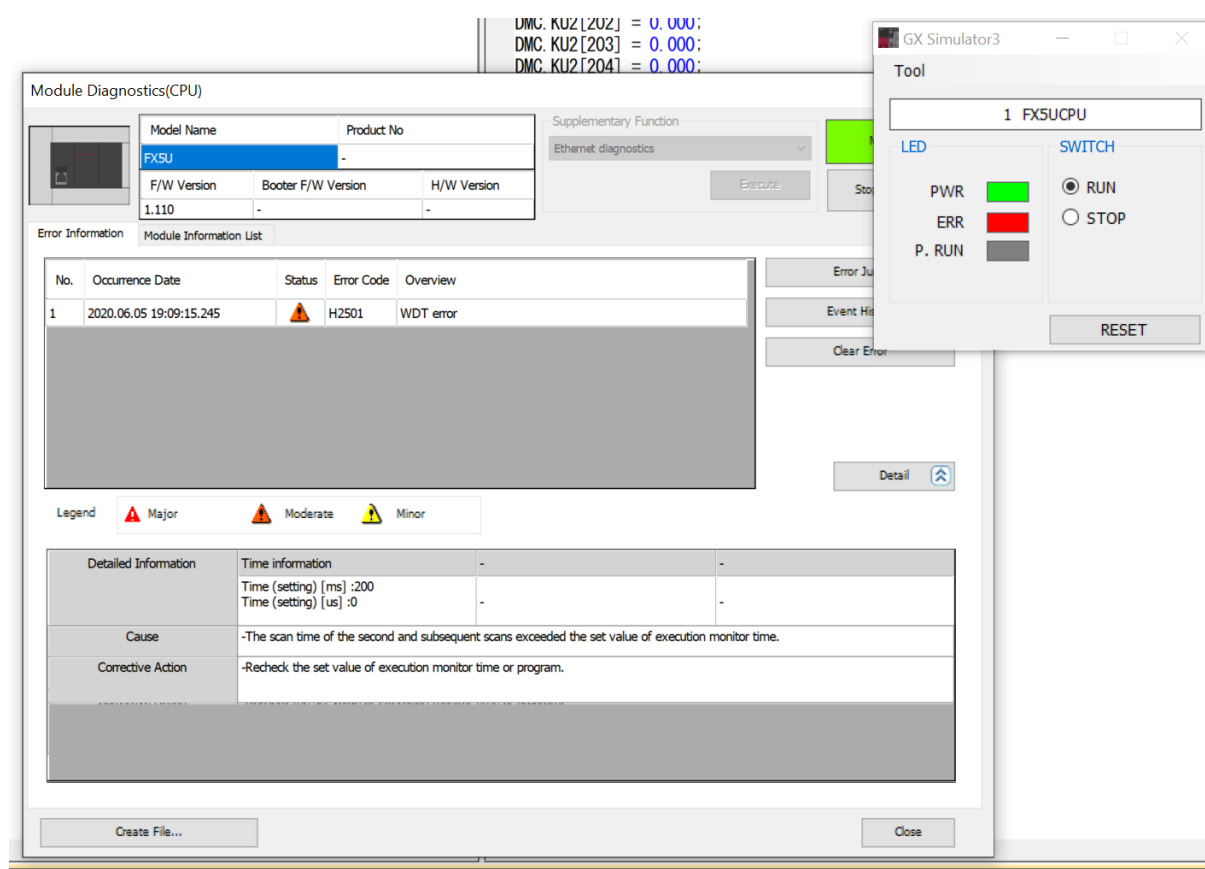
Tor wartości zadanych dla rysunków przedstawiających proces regulacji:

$$\begin{aligned} T1 &= 0 \wedge T3 = 0, \text{ dla } k \in < 0, 10) \\ T1 &= 11,42 \wedge T3 = 12,48, \text{ dla } k \in < 10, 120) \\ T1 &= 54 \wedge T3 = 20, \text{ dla } k \in < 120, 240) \\ T1 &= 150 \wedge T3 = 170, \text{ dla } k \in < 240, 480) \\ T1 &= 22 \wedge T3 = 30, \text{ dla } k \geq 480 \end{aligned}$$

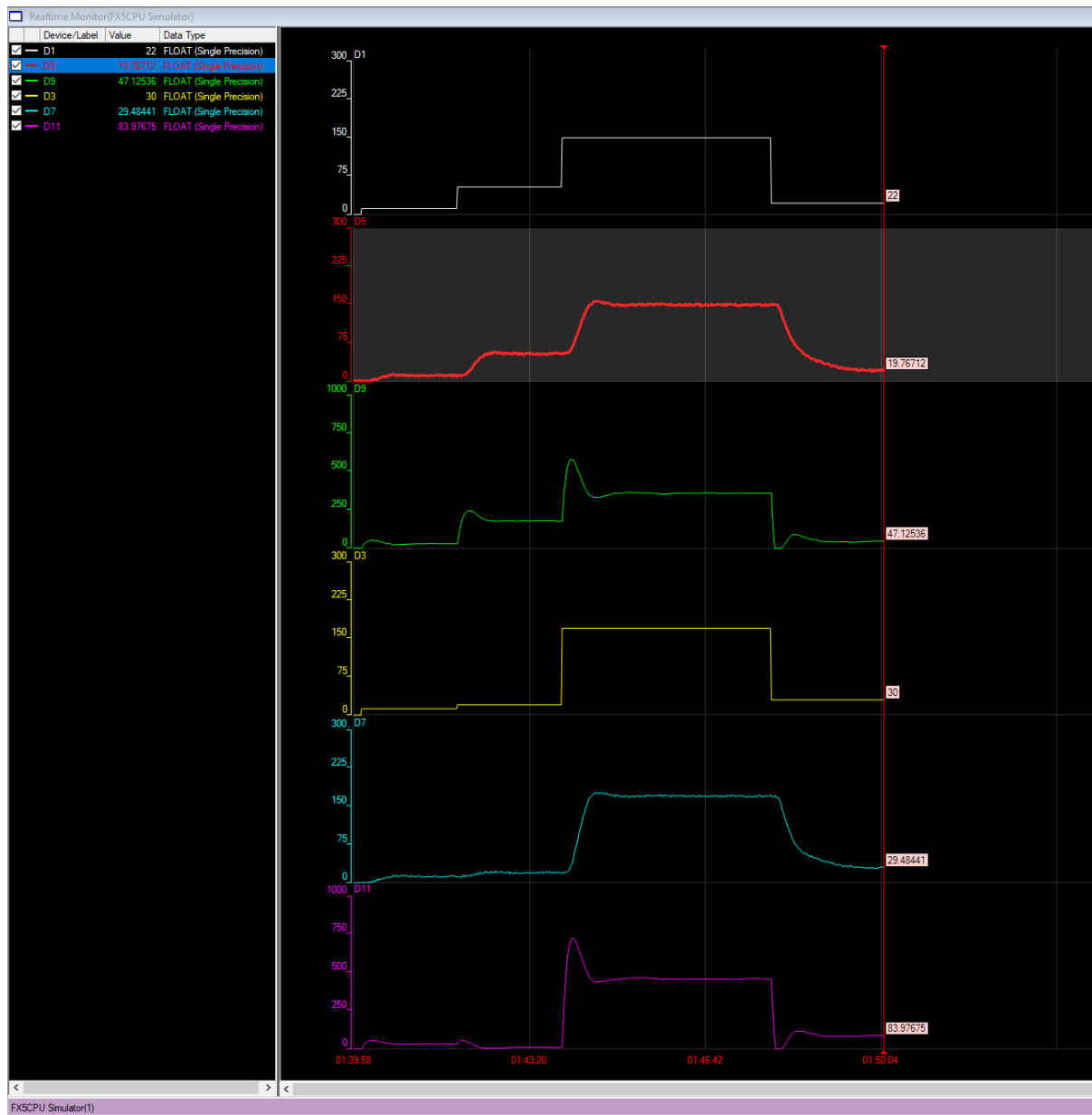
Rys. 3.1. Odpowiedź skokowa dla zmiany sygnału sterowania  $G1$  z 0 na 800

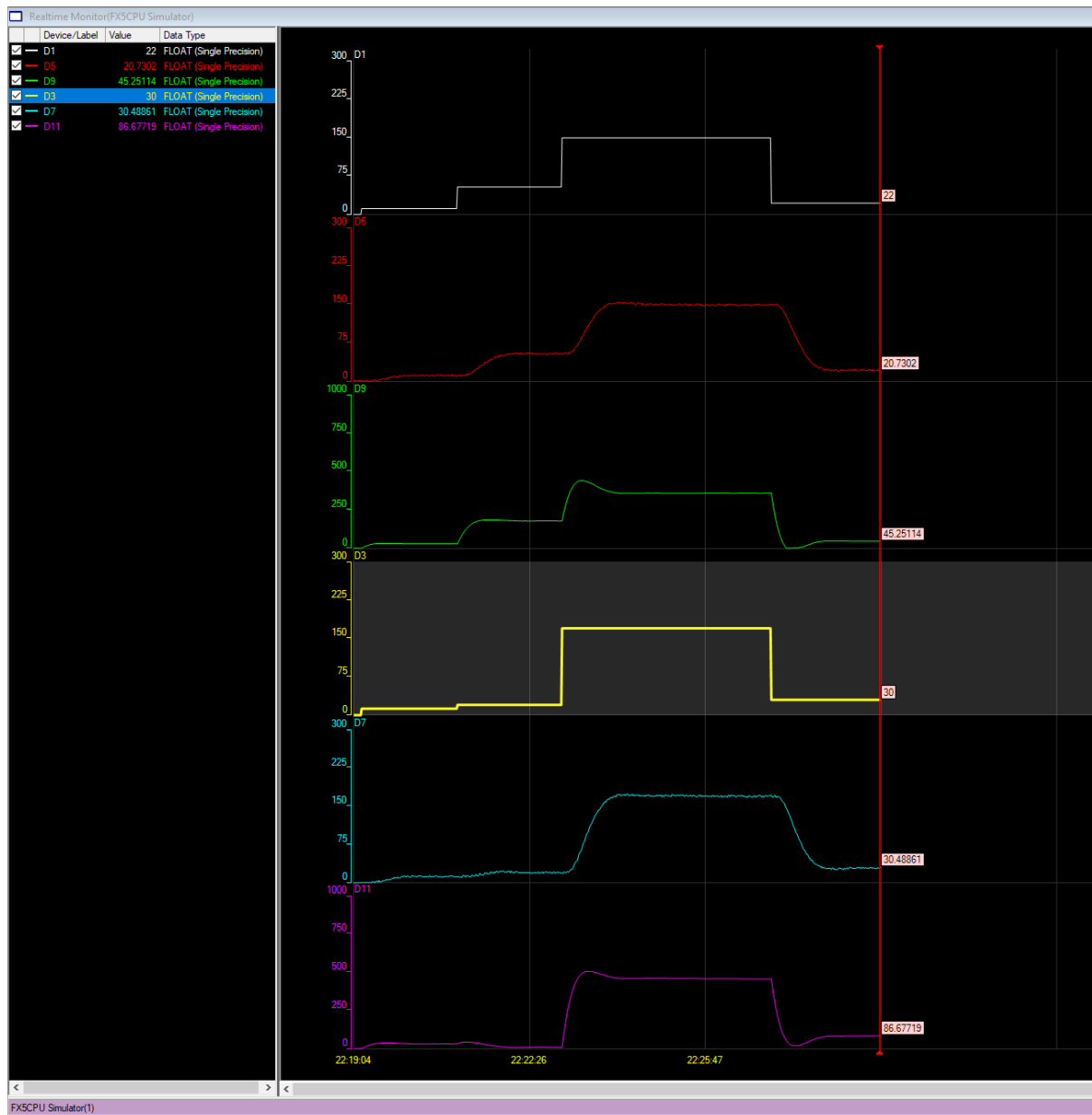
Rys. 3.2. Odpowiedź skokowa dla zmiany sygnału sterowania  $G_2$  z 0 na 800

Rys. 3.3. Odpowiedź skokowa dla zmiany sygnału sterowania  $G1$  z 0 na 800Rys. 3.4. Odpowiedź skokowa dla zmiany sygnału sterowania  $G2$  z 0 na 800



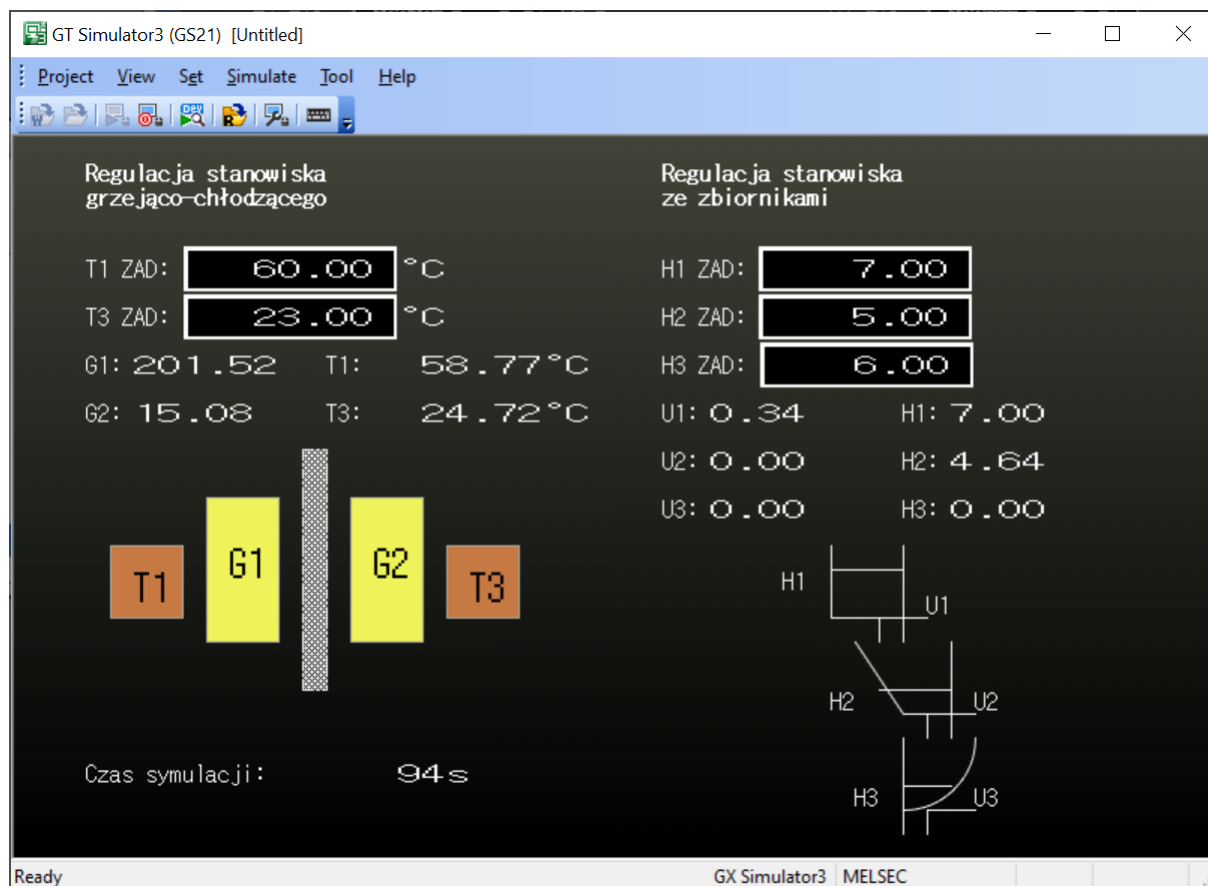
Rys. 3.5. Błąd przekroczenia czasu wykonania programu

Rys. 3.6. Regulacja dla DMC z parametrami  $D = 90$ ,  $N = 90$ ,  $N_u = 90$ ,  $\lambda = 1$

Rys. 3.7. Regulacja dla DMC z parametrami  $D = 90$ ,  $N = 90$ ,  $N_u = 90$ ,  $\lambda = 10$



## 4. Panel operatora



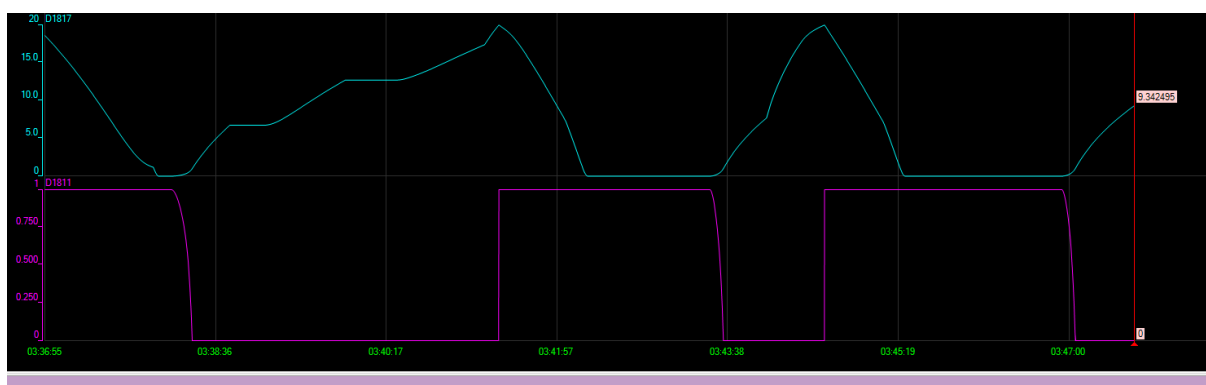
Rys. 4.1. Panel HMI dla operatora pozwalający wprowadzać zadane wartości na wyjściach

## 5. Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska

W celu zabezpieczenia stanowiska przed przepełnieniem zbiorników (tj.  $H1$  lub  $H2$  lub  $H3$  osiągnie wartość 20) zaimplementowano poniżej przedstawiony (rys. 5.1) mechanizm zabezpieczający.

```
108 // Mechanizm zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska
109 // Jeśli H1 będzie większe lub równe 20 to otwórz zawór 1
110 IF TEST_WATER[4] >= 20.0 THEN
111     PID1.MV := 1.0;
112 END_IF;
113 // Jeśli H2 będzie większe lub równe 20 to otwórz zawór 2
114 IF TEST_WATER[5] >= 20.0 THEN
115     PID2.MV := 1.0;
116 END_IF;
117 // Jeśli H3 będzie większe lub równe 20 to otwórz zawór 3
118 IF TEST_WATER[6] >= 20.0 THEN
119     PID3.MV := 1.0;
120 END_IF;
```

Rys. 5.1. Kod zabezpieczający przed uszkodzeniem stanowiska ze zbiornikami

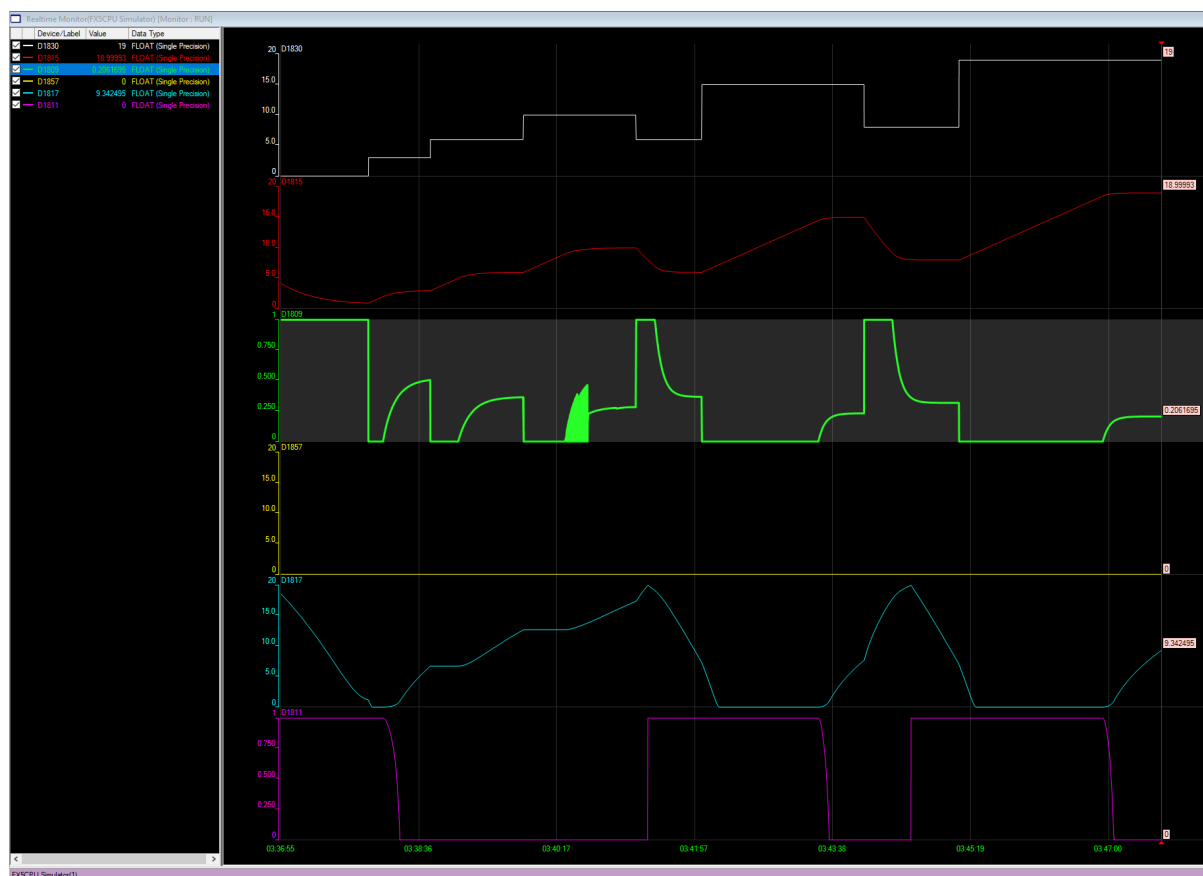


Rys. 5.2. Wykres prezentujący działanie mechanizmu zabezpieczającego przed uszkodzeniem stanowiska ze zbiornikami na górze  $H2$ , na dole sterowanie  $U2$

Jak widzimy na powyższym rysunku (rys. 5.2), gdy wysokość cieczy któregoś z wyjść  $H1$  lub  $H2$  lub  $H3$  jest równa 20 to odpowiednio otwierane są zawory  $U1$  dla osiągnięcia wysokości przez  $H1$ ,  $U2$  dla osiągnięcia wysokości przez  $H2$  i  $U3$  dla osiągnięcia wysokości przez  $H3$ . Dzięki temu zawór odpowiedniego zbiornika, który osiąga niebezpieczny poziom cieczy zostanie otworzony.

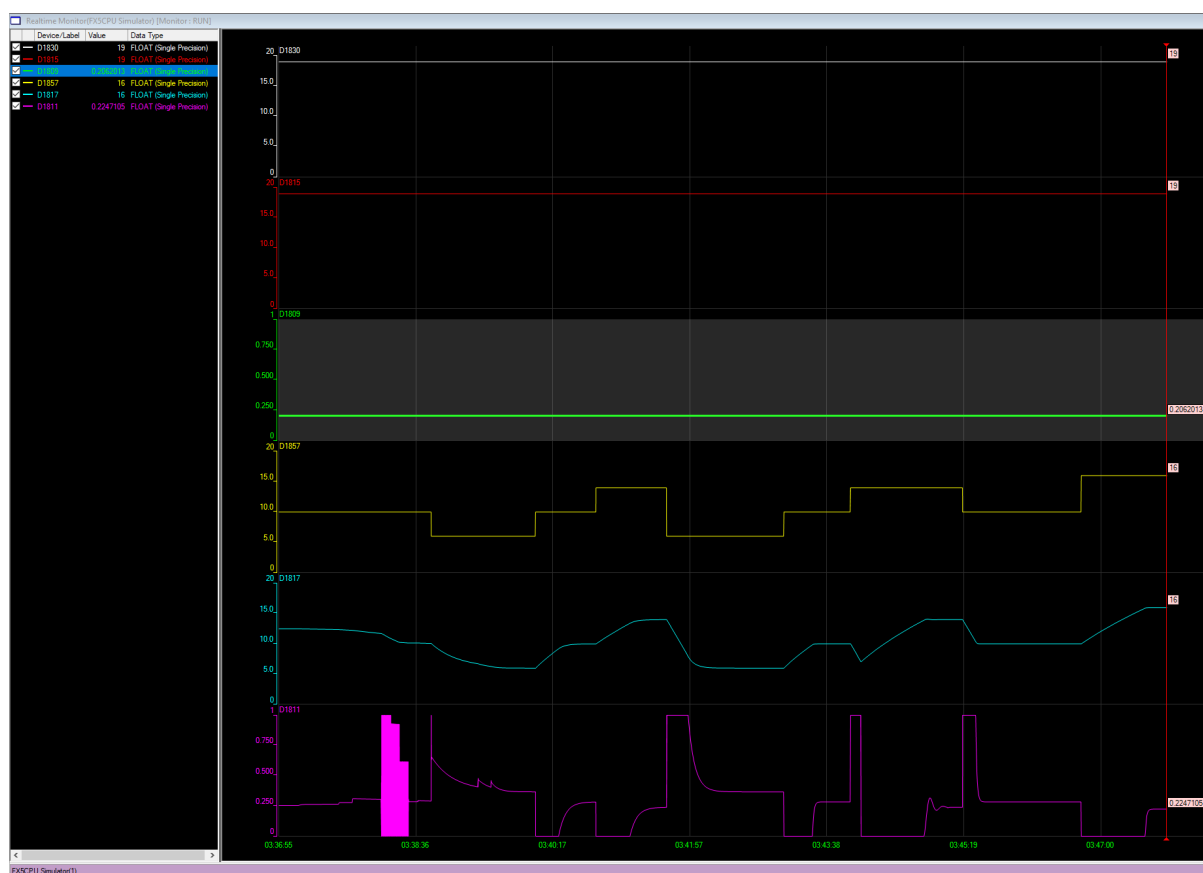
## 6. Implementacja wielopętlowego regulatora PID

### 6.1. Dobieranie nastaw PID

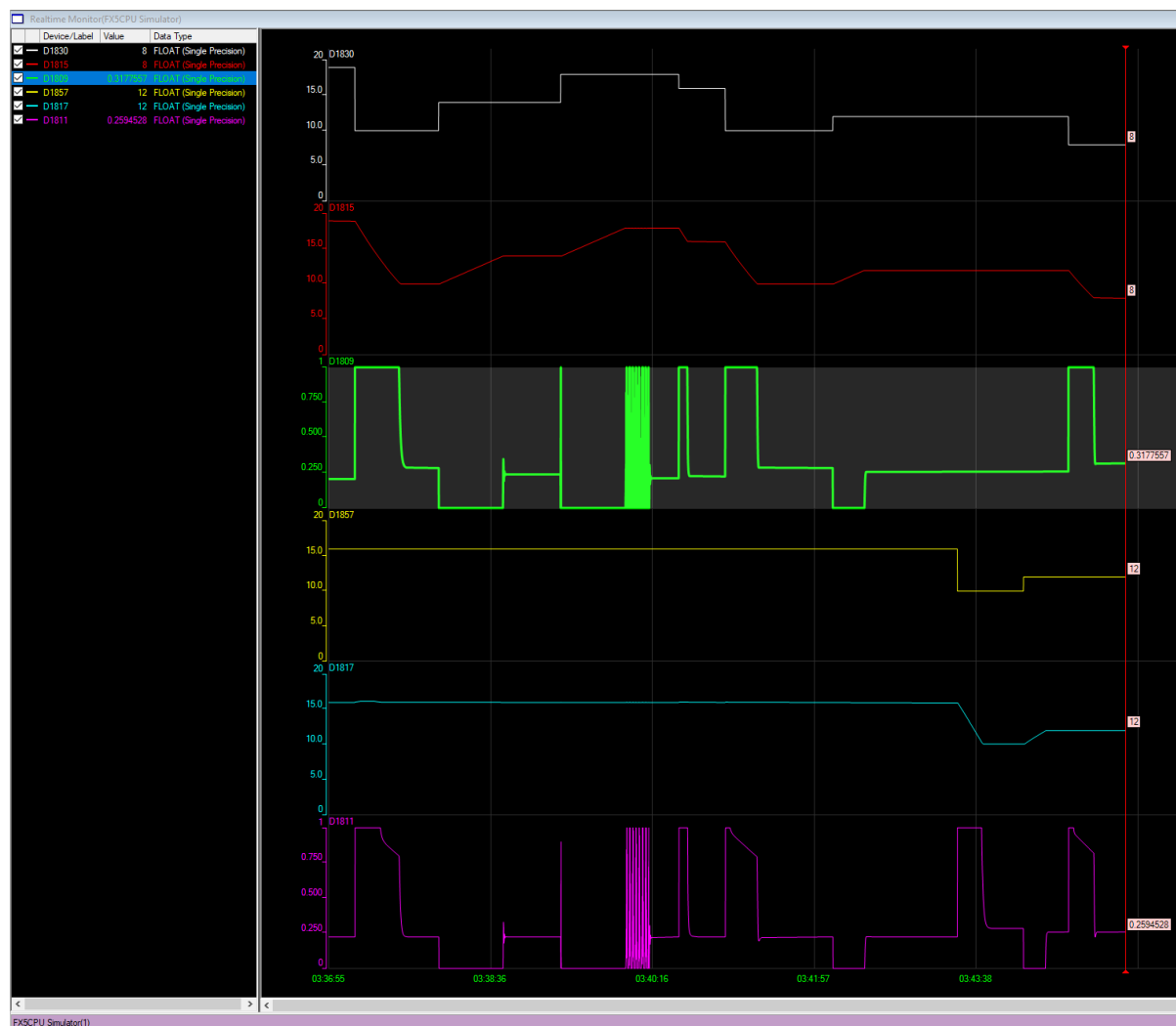


Rys. 6.1. Wykres prezentujący przebieg podczas strojenia

ok  $k_1 = -80$ ,  $ti_1 = 50$   
ok  $k_1 = -20$ ,  $ti_1 = 5$  -  $i_1$  1  
 $k_1 = -20$   $ti = 0.4$



Rys. 6.2. Wykres prezentujący przebieg podczas strojenia



Rys. 6.3. Wykres prezentujący przebieg podczas strojenia