

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Projektowanie układów sterowania
(projekt grupowy)

Sprawozdanie z projektu i ćwiczenia laboratoryjnego
nr 2, zadanie nr 3

Wojciech Rokicki, Radosław Pietkun, Jakub Gruszecki

Warszawa, 2020

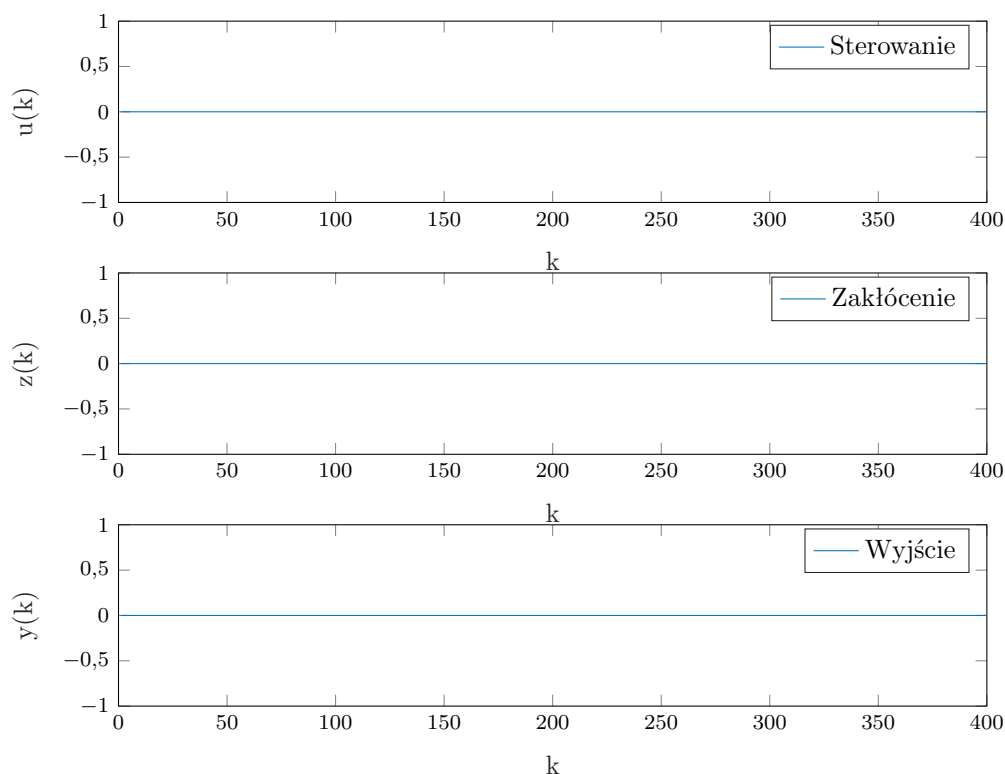
Spis treści

1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy	2
1.1. Poprawność wartości sygnałów w punkcie pracy	2
1.2. Wnioski	2
1.3. Implementacja	2
2. Odpowiedzi skokowe i charakterystyka statyczna	3
2.1. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru wejście-wyjście procesu	3
2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru zakłócenie-wyjście procesu	3
2.3. Charakterystyka statyczna	4
2.4. Wzmocnienie statyczne procesu	4
2.5. Implementacja	5
3. Odpowiedzi skokowe dla algorytmu DMC	6
3.1. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście procesu	6
3.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście procesu	6
3.3. Implementacja	7
4. Implementacja algorytmu DMC w najprostszej wersji analitycznej	8
4.1. Regulator DMC z uwzględnieniem zakłóceń	8

1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

1.1. Poprawność wartości sygnałów w punkcie pracy

W celu sprawdzenia poprawności wartości sygnałów U_{pp} , Z_{pp} oraz Y_{pp} obiekt został pobudzony sygnałami o wartościach: $U_{pp} = 0$ i $Z_{pp} = 0$. Wartości sygnałów w punkcie pracy będą poprawne, jeśli sygnał wyjściowy przyjmie wartość stałą $Y_{pp} = 0$.



Rys. 1.1. Przebiegi sygnałów $u(k)$, $z(k)$, $y(k)$ w punkcie pracy

1.2. Wnioski

Na podstawie rysunku 1.1 widać, że dla stałej wartości sygnału sterującego $U_{pp} = 0$ oraz stałej wartości sygnału zakłócenia $Z_{pp} = 0$ wyjście obiektu przyjmuje stałą wartość, równą $Y_{pp} = 0$. Jest to dowód na to, że podane wartości sygnałów wejściowego, zakłócenia oraz wyjściowego w punkcie pracy są poprawne.

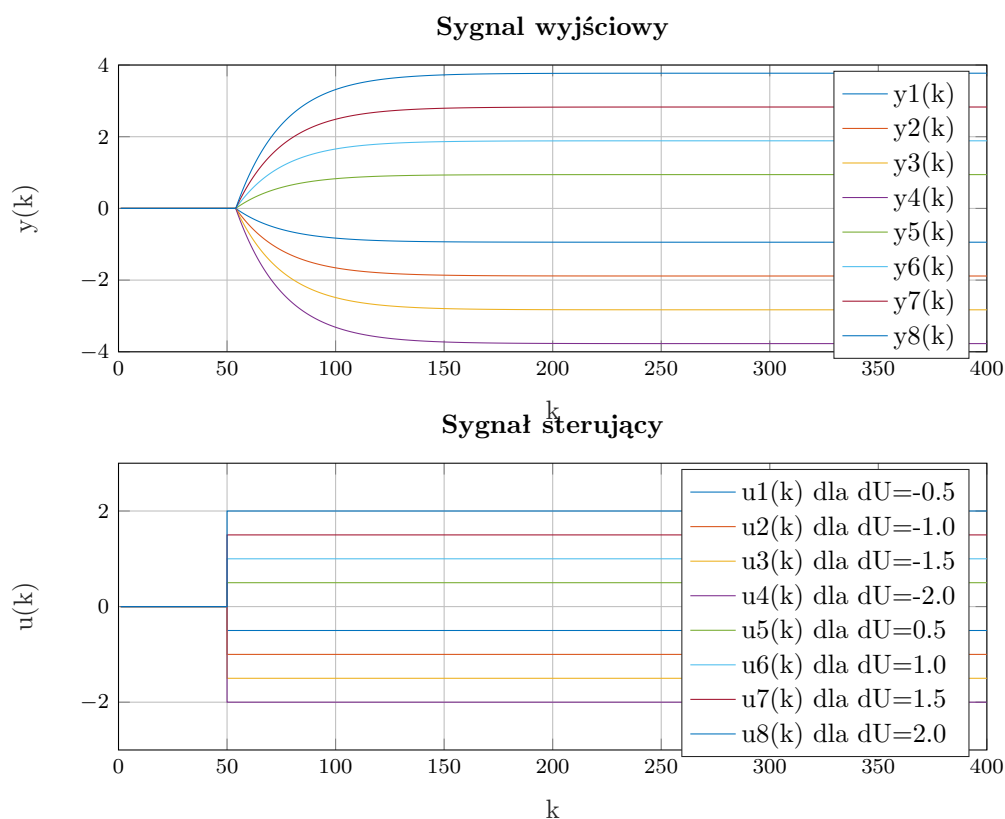
1.3. Implementacja

Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystany został skrypt `zad1.m`.

2. Odpowiedzi skokowe i charakterystyka statyczna

2.1. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru wejście-wyjście procesu

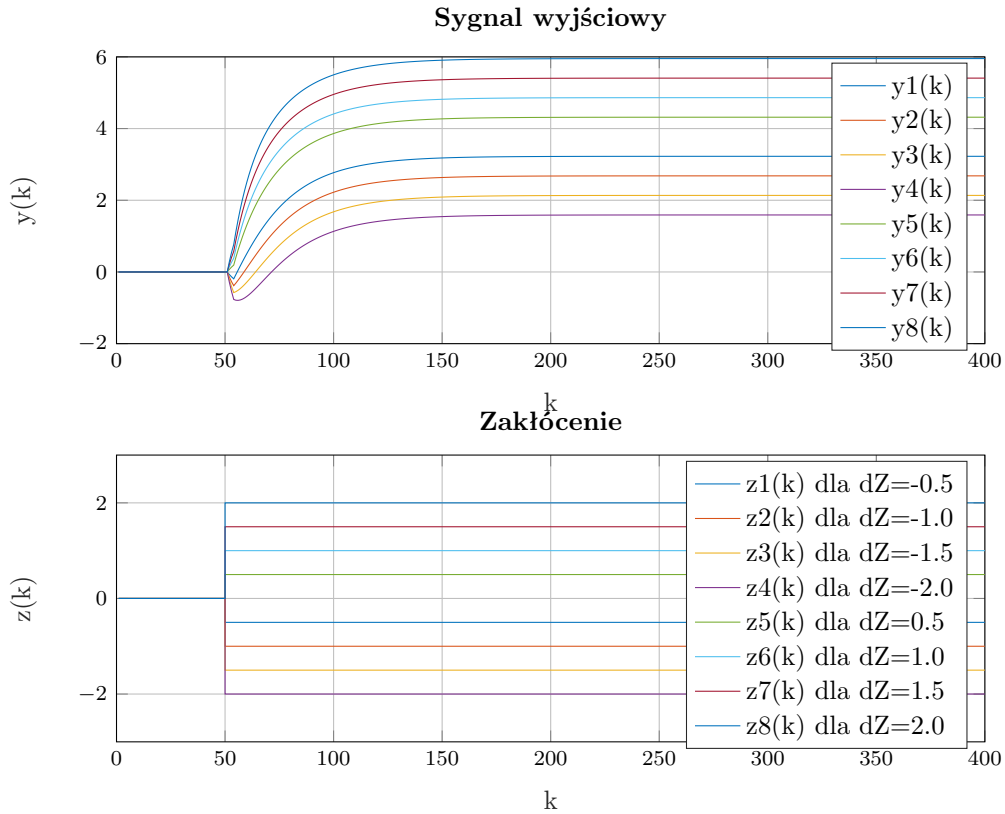
W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowych obiekt był pobudzany, w punkcie pracy, różnymi skokami sygnału sterującego w chwili $k = 50$. Przeprowadzono osiem testów dla różnych wartości skoków. Uzyskane odpowiedzi skokowe wraz z odpowiadającymi im przebiegami sygnału sterowania przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Odpowiedzi skokowe toru wejście-wyjście procesu

2.2. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru zakłócenie-wyjście procesu

W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowych obiekt był pobudzany, w punkcie pracy, różnymi skokami sygnału zakłócenia w chwili $k = 50$. Przeprowadzono osiem testów dla różnych wartości skoków. Uzyskane odpowiedzi skokowe wraz z odpowiadającymi im przebiegami sygnału zakłócenia przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Odpowiedzi skokowe toru zakłócenie-wyście procesu

2.3. Charakterystyka statyczna

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej procesu wyznaczono odpowiedź układu w stanie ustalonym dla pobudzeń różnymi wartościami sygnału sterującego i zakłócenia. Zebrane wyniki przedstawiono na rys. 2.3.

2.4. Wzmocnienie statyczne procesu

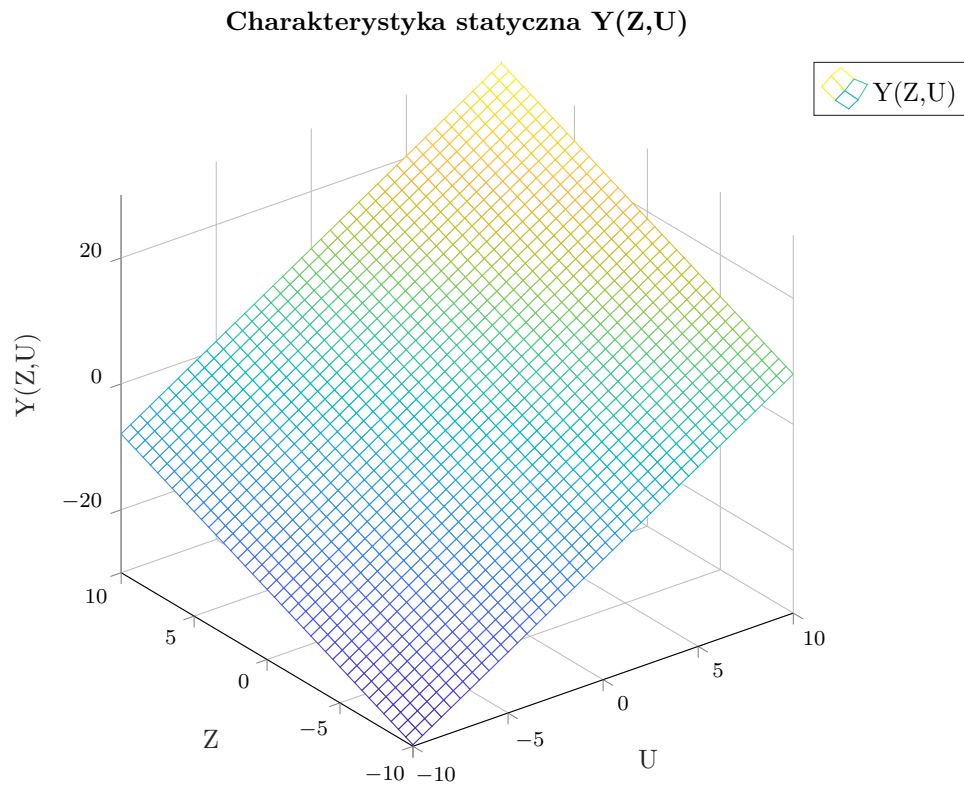
Na podstawie rys. 2.3 można powiedzieć, że obiekt jest w przybliżeniu liniowy. Można zatem wyznaczyć wzmocnienie statyczne obu torów procesu. Wzmocnienie statyczne toru $U - Y$ dla danego zakłócenia Z można obliczyć na podstawie wzoru:

$$K_{\text{stat}_{uy}} = \frac{Y(Z, U_{\max}) - Y(Z, U_{\min})}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (2.1)$$

Natomiast wzmocnienie statyczne toru $Z - Y$ dla danego sterowania U można obliczyć ze wzoru:

$$K_{\text{stat}_{zy}} = \frac{Y(Z_{\max}, U) - Y(Z_{\min}, U)}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (2.2)$$

Dla danego procesu wzmocnienie statyczne toru $U - Y$ wynosi $K_{\text{stat}_{uy}} = 1,8857$, a wzmocnienie statyczne toru $Z - Y$ wynosi $K_{\text{stat}_{zy}} = 1,0906$.



Rys. 2.3. Charakterystyka statyczna procesu

2.5. Implementacja

Implementacje funkcji wykorzystanych do wykonania zadania zawarte są w skryptach `zad2.m` oraz `zad2_char_stat.m`.

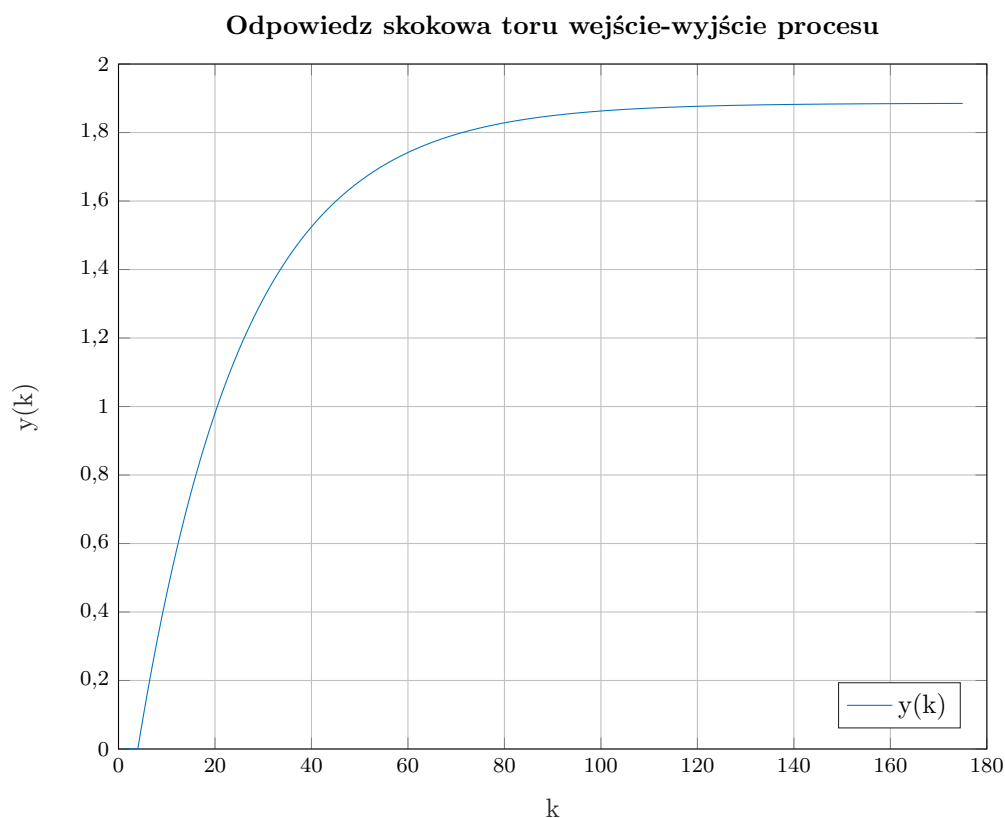
3. Odpowiedzi skokowe dla algorytmu DMC

3.1. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyście procesu

Do wyznaczania odpowiedzi skokowej toru $U - Y$ dla algorytmu DMC wybrana została odpowiedź procesu dla jednostkowej zmiany sygnału sterującego:

$$u(k) = \begin{cases} 0 & \text{dla } k < 0 \\ 1 & \text{dla } k \geq 0 \end{cases}$$

W trakcie symulacji sygnał zakłócenia miał cały czas wartość zerową, odpowiadającą wartości z punktu pracy. Otrzymaną odpowiedź skokową przedstawiono na rys. 3.1.



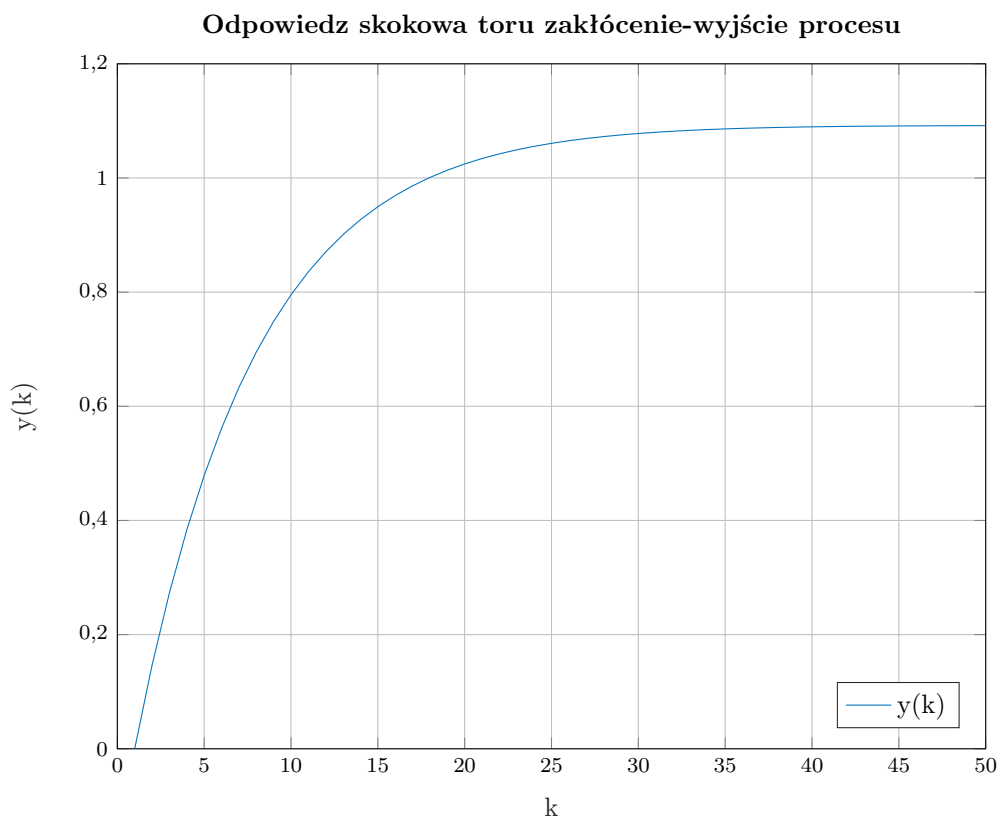
Rys. 3.1. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście procesu dla algorytmu DMC

3.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście procesu

Do wyznaczania odpowiedzi skokowej toru $Z - Y$ dla algorytmu DMC wybrana została odpowiedź procesu dla jednostkowej zmiany sygnału zakłócenia:

$$z(k) = \begin{cases} 0 & \text{dla } k < 0 \\ 1 & \text{dla } k \geq 0 \end{cases}$$

W trakcie symulacji sygnał sterujący miał cały czas wartość zerową, odpowiadającą wartości z punktu pracy. Otrzymaną odpowiedź skokową przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Odpowiedź skokowa toru zakłócenie-wyjście procesu dla algorytmu DMC

3.3. Implementacja

Implementacje funkcji wykorzystanych do wykonania zadania są zawarte w skryptach `zad_skokU.m` oraz `zad_skokZ.m`.

4. Implementacja algorytmu DMC w najprostszej wersji analitycznej

4.1. Regulator DMC z uwzględnieniem zakłóceń

Regulator DMC jest to regulator predykcyjny - działa on z wyprzedzeniem, zanim nastąpią zmiany wartości sygnału wyjściowego. Wektor przyrostów sterowań dany jest wzorem:

$$\Delta U(k) = \mathbf{K}[Y^{\text{zad}}(k) - Y^0(k)] \quad (4.1)$$

$$= \mathbf{K}[Y^{\text{zad}}(k) - Y(k) - \mathbf{M}^P \Delta U^P(k) - \mathbf{M}^{zP} \Delta Z^P(k)] \quad (4.2)$$

gdzie:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M} + \lambda I)^{-1} \mathbf{M}^T \quad (4.3)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{N \times N_u} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{M}^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \dots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix}_{N \times (D-1)} \quad (4.5)$$

$$\Delta U^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k - (D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1) \times 1} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{M}^{zP} = \begin{bmatrix} s_1^z & s_2^z - s_1^z & s_3^z - s_2^z & \dots & s_{D^z}^z - s_{D^z-1}^z \\ s_2^z & s_3^z - s_1^z & s_4^z - s_2^z & \dots & s_{D^z+1}^z - s_{D^z-1}^z \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ s_N^z & s_{N+1}^z - s_1^z & s_{N+2}^z - s_2^z & \dots & s_{N+D^z-1}^z - s_{D^z-1}^z \end{bmatrix}_{N \times (D^z-1)} \quad (4.7)$$

$$\Delta Z^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta z(k-1) \\ \vdots \\ \Delta z(k - (D^z-1)) \end{bmatrix}_{(D^z-1) \times 1} \quad (4.8)$$

gdzie N - horyzont predykcji, N_u - horyzont sterowania, D - horyzont dynamiki, D^z - horyzont dynamiki zakłóceń, λ - kara za zmianę sterowania

W tym przypadku należy wyznaczyć tylko pierwszy element macierzy $\Delta U(k)$ czyli $\Delta u(k|k)$. Aktualne sterowanie uzyskuje się poprzez zsumowanie $\Delta u(k|k)$ z poprzednim sterowaniem.

$$\Delta u(k|k) = k_e e(k) - \sum_{j=1}^{D-1} \mathbf{k}_j^u \Delta u(k-j) - \sum_{j=1}^{D^z} \mathbf{k}_j^z \Delta u(k-j-1) \quad (4.9)$$

$$k_e = \sum_{i=1}^N k_{1,i} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{k}_j^u = \overline{\mathbf{K}}_1 \mathbf{M}_j^P, \quad j = 1, \dots, D-1 \quad (4.11)$$

$$\mathbf{k}_j^z = \overline{\mathbf{K}}_1 \mathbf{M}_j^{zP}, \quad j = 1, \dots, D^z \quad (4.12)$$

4.2. Dobieranie parametrów D , N , N_u i λ algorytmu DMC

4.3. Implementacja

Implementacja algorytmu DMC jest zawarta w skrypcie `zad4_DMC.m`.