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

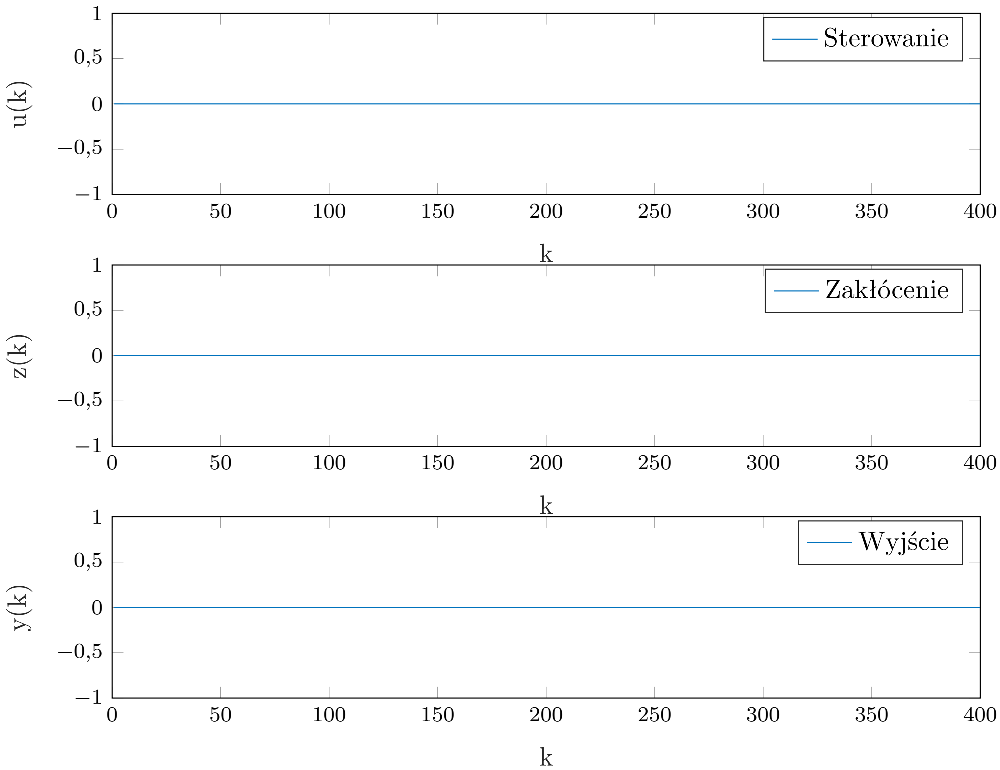
Warszawa, 2020

Spis treści

1. Sprawdzenie poprawności punktu pracy

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: $U_{\mathrm{pp}} = 0$ i $Z_{\mathrm{pp}} = 0$. Wartości sygnałów w punkcie pracy będą poprawne, jeśli sygnał wyjściowy przyjmie wartość stałą $Y_{\mathrm{pp}} = 0$.



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 $U_{\mathrm{pp}} = 0$ oraz stałej wartości sygnału zakłócenia $Z_{\mathrm{pp}} = 0$ wyjście obiektu przyjmuje stałą wartość, równą $Y_{\mathrm{pp}} = 0$. Jest to dowód na to, że podane wartości sygnałów wejsciowego, zakłócenia oraz wyjściowego w punkcie pracy są poprawne.

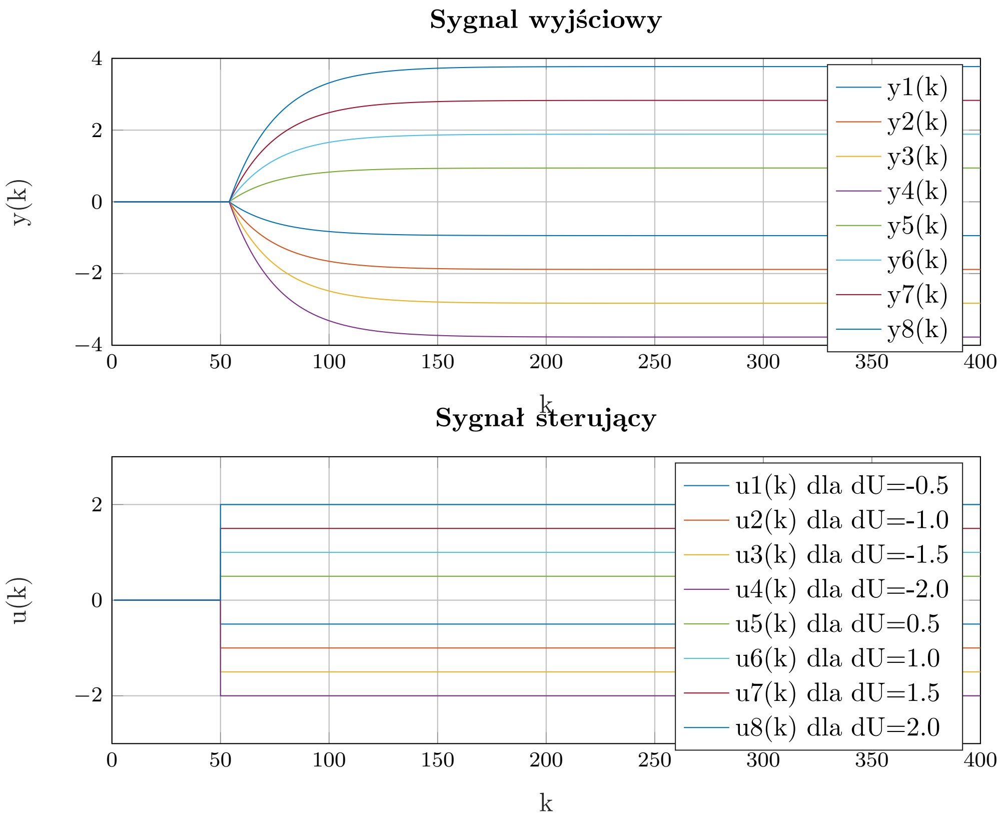
1.3. Implementacja

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

2. Odpowiedzi skokowe i charakterystyka statyczna

2.1. Wyznaczenie odpowiedzi skokowych toru wejście-wyjście procesu

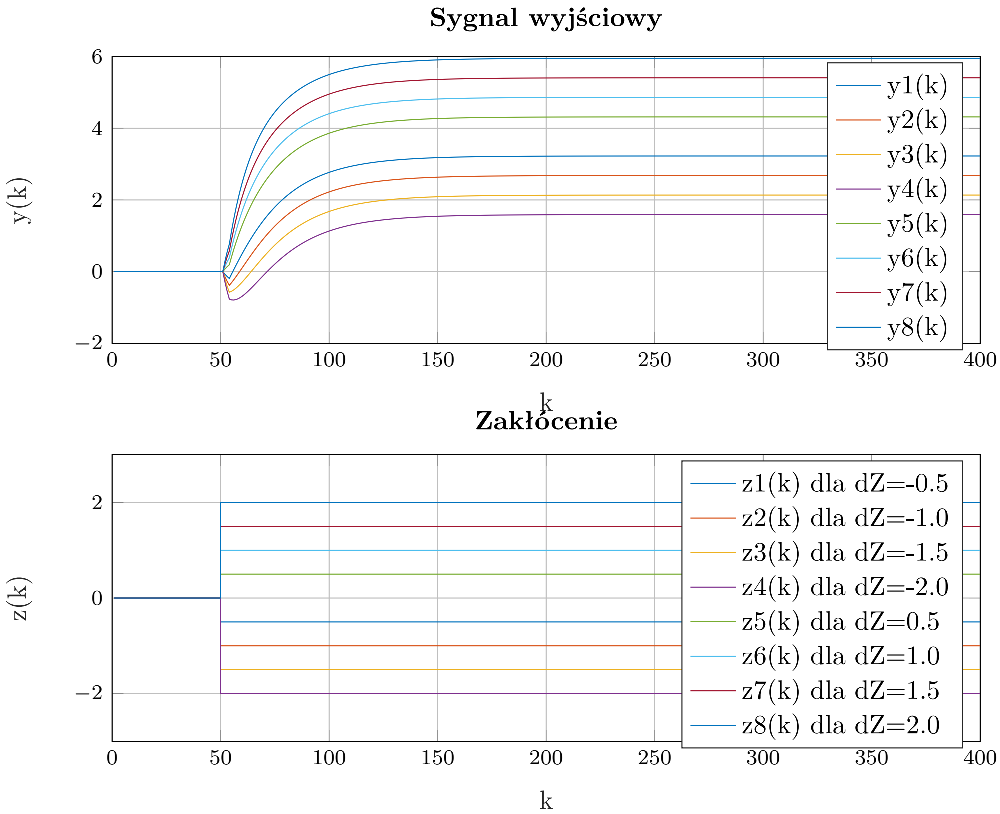
W celu wyznaczenia odpowiedzi skokowych obiekt był pobudzany, w punkcie pracy, różnymi skokami sygnału sterującego w chwili $k = 50$. Przeprowadzono osiem testów dla różnych wartości skoków. Uzyskane odpowiedzi skokowe wraz z odpowiadającymi im przebiegami sygnału sterowania przedstawiono na rys. 2.1.



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-wyjście 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

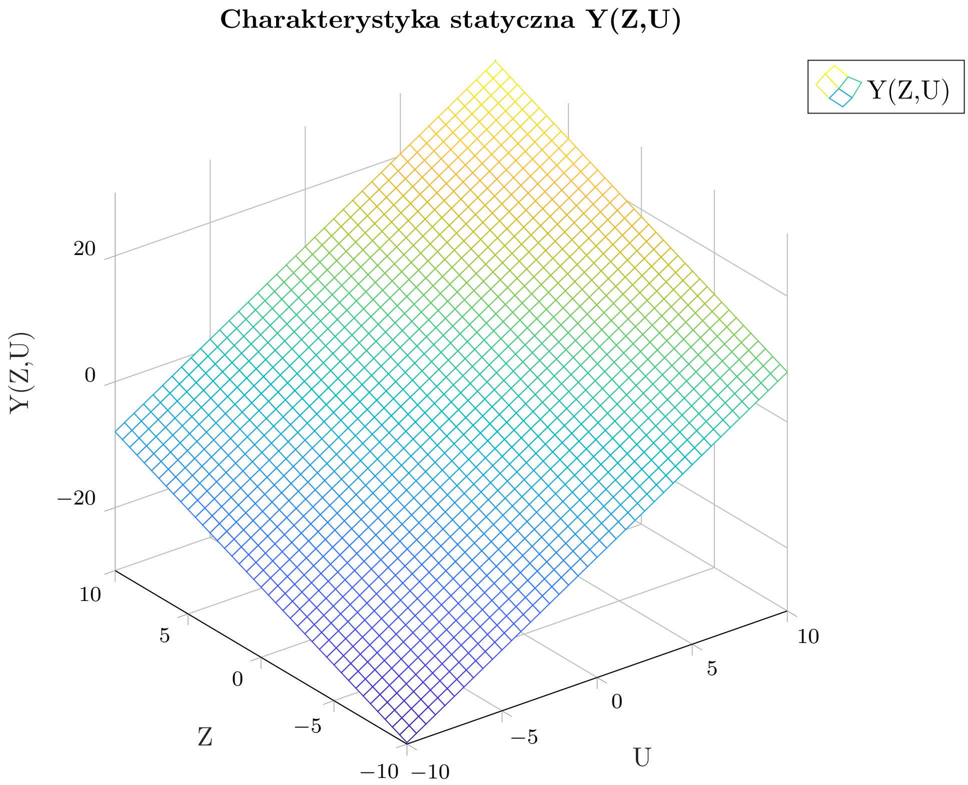
Na podstawie rys. 2.3 można powiedzieć, że obiekt jest w przybliżeniu liniowy. Można zatem wyznaczyć wzmocnienie statyczne obu torów procesu. Wzmocnienie statyczne toru $U - Y$ dla danego zakłócenia Z można obliczyć na podstawie wzoru:

$$K_{\text{stat\_uy}} = \frac{Y(Z, U_{\text{max}}) - Y(Z, U_{\text{min}})}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \tag{2.1}$$

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

$$K_{\text{stat\_zy}} = \frac{Y(Z_{\text{max}}, U) - Y(Z_{\text{min}}, U)}{Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}} \tag{2.2}$$

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

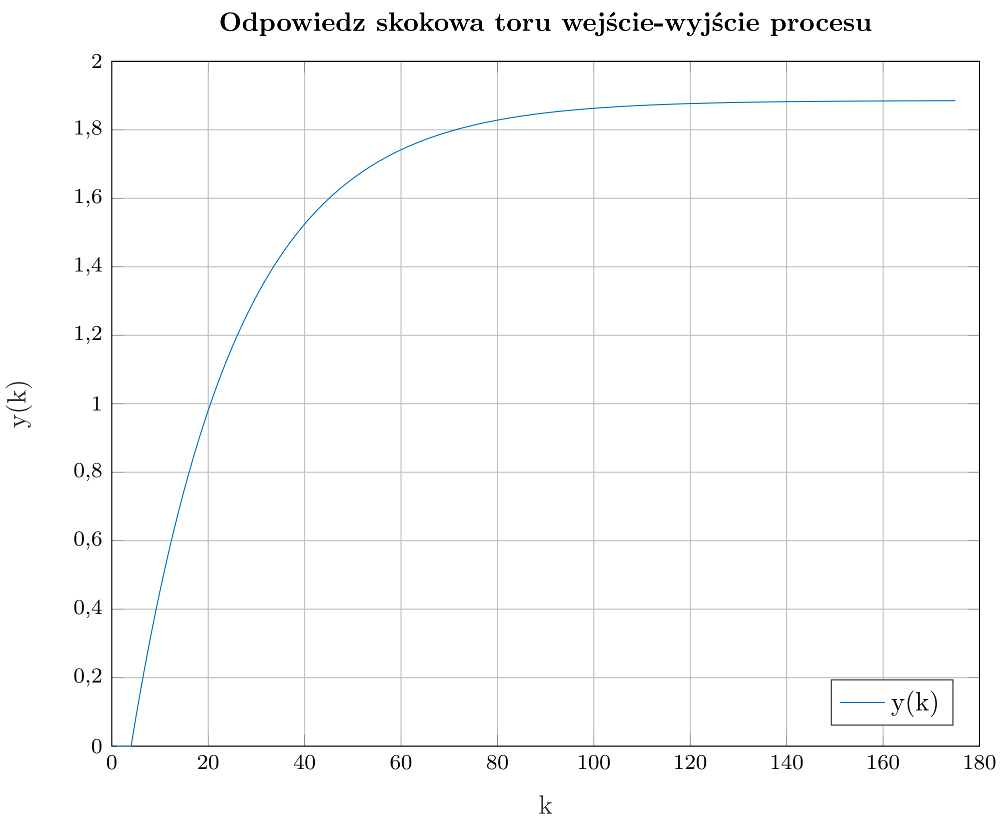
3. Odpowiedzi skokowe dla algorytmu DMC

3.1. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście procesu

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

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

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



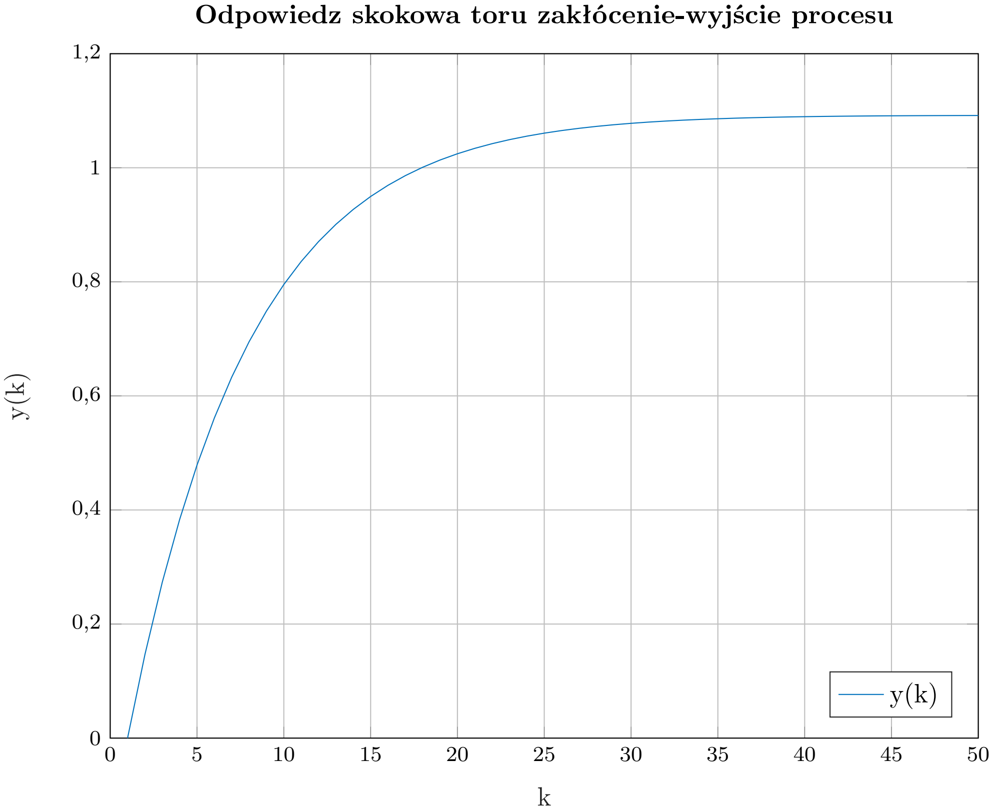
Rys. 3.1. Odpowiedź skokowa toru wejście-wyjście procesu dla algorytmu DMC

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:

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

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 fukcji 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:

$$\begin{aligned} \triangle U(k) &= \boldsymbol{K}[Y^{\mathrm{zad}}(k) - Y^{0}(k)] && (4.1)\\ &= \boldsymbol{K}[Y^{\mathrm{zad}}(k) - Y(k) - \boldsymbol{M}^{\mathrm{P}} \triangle U^{\mathrm{P}}(k) - \boldsymbol{M}^{\mathrm{zP}} \triangle Z^{\mathrm{P}}(k)] && (4.2) \end{aligned}$$

gdzie:

$$\boldsymbol{K} = (\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M} + \lambda I)^{-1}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} \tag{4.3}$$

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_{\mathrm{u}}+1} \end{bmatrix}_{N \times N_u} \tag{4.4}$$

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

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

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

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

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.

$$\triangle u(k|k) = k_{\mathrm{e}} e(k) - \sum_{j=1}^{D-1} \boldsymbol{k}_j^{\mathrm{u}} \triangle u(k-j) - \sum_{j=1}^{D^{\mathrm{z}}} \boldsymbol{k}_j^{\mathrm{z}} \triangle u(k-j-1) \tag{4.9}$$

$$k_{\mathrm{e}} = \sum_{i=1}^{N} k_{1,i} \tag{4.10}$$

$$\boldsymbol{k}_j^{\mathrm{u}} = \overline{\boldsymbol{K}}_1 \boldsymbol{M}_j^{\mathrm{P}}, \quad j = 1, \ldots, D-1 \tag{4.11}$$

$$\boldsymbol{k}_j^{\mathrm{z}} = \overline{\boldsymbol{K}}_1 \boldsymbol{M}_j^{\mathrm{zP}}, \quad j = 1, \ldots, D^{\mathrm{z}} \tag{4.12}$$