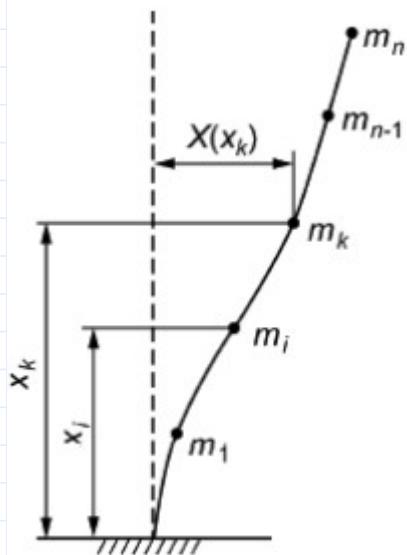


Расчёт на сейсмическое воздействие с применением
консольной РДМ по линейно-спектральному методу
СП 14.13330.2018 методом деформаций

Расчётная динамическая
модель РДМ

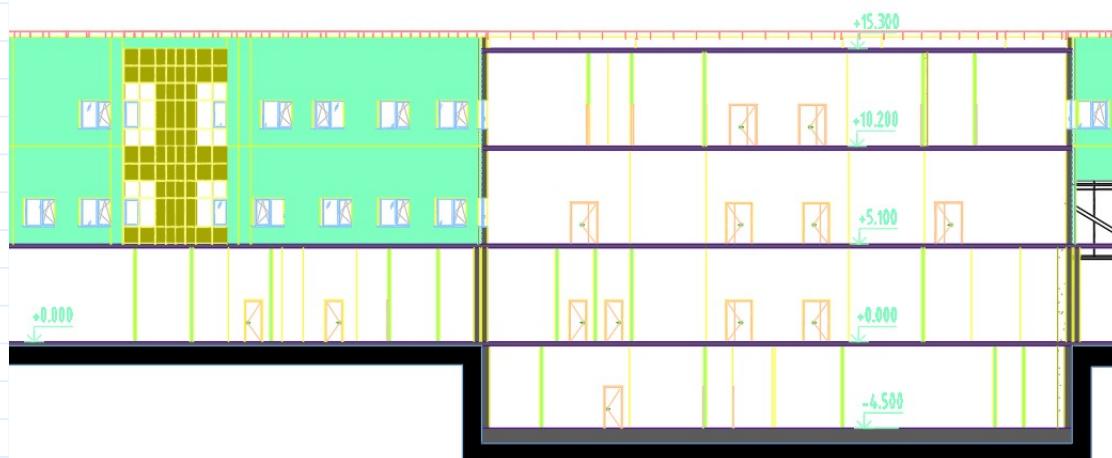


Модуль упругости бетона

$$E_b := 36000 \text{ MPa}$$

Плотность бетона

$$\gamma := 2750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Толщина диафрагм

$$td := \begin{bmatrix} 300 \\ 300 \\ 300 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Длина диафрагм

$$ld := \begin{bmatrix} 7.2 \\ 7.2 \\ 7.2 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Количество диафрагм

$$n_d := 8$$

Толщина перекрытий	Отметки этажей	Площади этажей
$tp := \begin{bmatrix} 200 \\ 200 \\ 200 \end{bmatrix} \text{ mm}$	$x_i := \begin{bmatrix} 5.1 \\ 10.2 \\ 15.3 \end{bmatrix} \text{ m}$	$la := \begin{bmatrix} 1650 \\ 1650 \\ 1650 \end{bmatrix} \text{ m}^2$
Постоянные нагрузки		Временные нагрузки
$dlv := \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} \cdot \text{kPa}$		$llv := \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot \text{kPa}$
Моменты инерции и площади диафрагм		
$I_s := \frac{\overline{td} \cdot \overline{ld}^3}{12} \cdot n_d$	$A_s := \overline{td} \cdot \overline{ld} \cdot n_d$	$n := \text{rows}(x_i) = 3$
Общая длина		$L := x_{i_{n-1}} = 15.3 \text{ m}$
коэффициент учёта других конструкций		$k_w := 1.1$
Матрица масс		
$M_{-s} := \left\ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad \left\ M_{i,i} \leftarrow \left(tp_i \cdot \gamma + \frac{dlv_i}{g} + \frac{llv_i}{g} \right) \cdot la_i \cdot k_w \right\ \\ \quad M \end{array} \right\ $		
$M_{-s} = \begin{bmatrix} 2.108721 \cdot 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 2.108721 \cdot 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.923642 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \text{ tonne}$		

Узлы

x (m)	z (m)	U_x	U_z	R_y	m_x (tonne)
0	0	1	1	1	0
0	5.1	0	0	0	2108.721
0	10.2	0	0	0	2108.721
0	15.3	0	0	0	1923.642

1 - закрепление

количество узлов $n_j := \text{rows}(x) = 4$

Элементы

j_s	j_e	R_s	R_e	A (m^2)	J (m^4)	E (MPa)
0	1	0	0	17.28	74.6496	36000
1	2	0	0	17.28	74.6496	36000
2	3	0	0	1.44	74.6496	36000

1 - шарнир

количество элементов $n_f := \text{rows}(j_s) = 3$

Длины элементов

$$l := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f-1 \\ \quad \left\| l_i \leftarrow \sqrt{\left(x_{j_{e_i}} - x_{j_{s_i}} \right)^2 + \left(z_{j_{e_i}} - z_{j_{s_i}} \right)^2} \right\| \\ \end{array} \right\|$$

Косинусы α

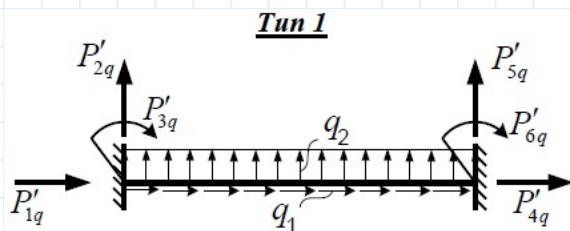
$$\cos := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f-1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} x_{j_{e_i}} - x_{j_{s_i}} \\ c_i \leftarrow \frac{x_{j_{e_i}} - x_{j_{s_i}}}{l_i} \end{array} \right\| c \end{array} \right\|$$

Синусы α

$$\sin := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f-1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} z_{j_{e_i}} - z_{j_{s_i}} \\ s_i \leftarrow \frac{z_{j_{e_i}} - z_{j_{s_i}}}{l_i} \end{array} \right\| s \end{array} \right\|$$

Матрица преобразования координат

$$T_\alpha(i) := \begin{bmatrix} \cos_i & \sin_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin_i & \cos_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos_i & \sin_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin_i & \cos_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Матрица приведения размерностей

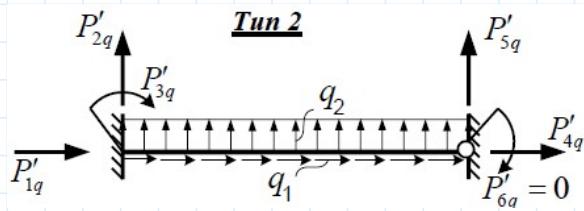
$$u_1 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & 1 \\ m & 1 & \frac{1}{m} & m & 1 & \frac{1}{m} \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & 1 \\ m & 1 & \frac{1}{m} & m & 1 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_1(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & \frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{4 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} & 0 & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{2 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} \\ \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & \frac{12 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & -\frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{2 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} & 0 & \frac{6 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{4 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_1(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_1(i)} \cdot u_1 \cdot T_\alpha(i)$$



Матрица приведения размерностей

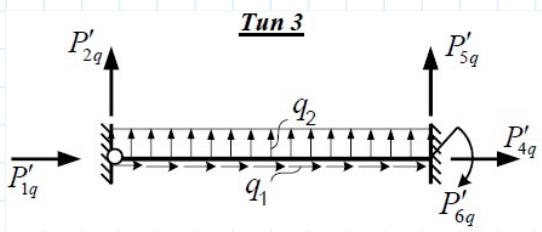
$$u_2 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & m \\ m & 1 & \frac{1}{m} & m & 1 & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & 1 & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_2(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 \\ 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 \\ -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_2(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_2(i)} \cdot u_2 \cdot T_\alpha(i)$$



Матрица приведения размерностей

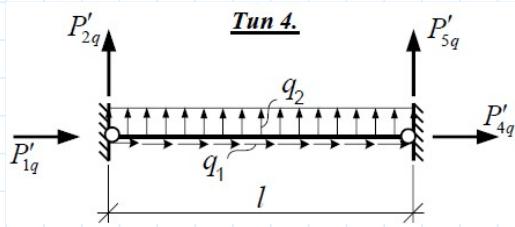
$$u_3 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & 1 \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & 1 \\ m & 1 & m & m & 1 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_3(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 & 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^3} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} \\ 0 & -\frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i^2} & \frac{3 \cdot E_i \cdot J_i}{l_i} \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_3(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_3(i)} \cdot u_3 \cdot T_\alpha(i)$$



Матрица приведения размерностей

$$u_4 := \begin{bmatrix} m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{kN}$$

Матрица КЭ в локальной системе координат

$$K'_4(i) := \begin{bmatrix} \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица КЭ в глобальной системе координат

$$K_4(i) := T_\alpha(i)^T \cdot \overrightarrow{K'_4(i)} \cdot u_4 \cdot T_\alpha(i)$$

Матрица жёсткости конечных элементов

$$K_i(i) := \begin{cases} \text{if } R_{s_i} = 0 \wedge R_{e_i} = 0 \\ \quad \| K \leftarrow K_1(i) \\ \text{else if } R_{s_i} = 0 \wedge R_{e_i} = 1 \\ \quad \| K \leftarrow K_2(i) \\ \text{else if } R_{s_i} = 1 \wedge R_{e_i} = 0 \\ \quad \| K \leftarrow K_3(i) \\ \text{else} \\ \quad \| K \leftarrow K_4(i) \\ K \end{cases}$$

Степени свободы узлов

$$DoF := \begin{cases} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..n_j - 1 \\ \quad \| \text{for } j \in 0..2 \\ \quad \| \quad \| dof_{i,j} \leftarrow i + j + k \\ \quad \| k \leftarrow k + 2 \\ dof \end{cases}$$

Матрица топологии

$$A_f := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \| \text{for } j \in 0..2 \\ \quad \| af_{j,i} \leftarrow DoF_{j_{s_i}, j} \\ \quad \| af_{j+3,i} \leftarrow DoF_{j_{e_i}, j} \\ af \end{cases}$$

Матрица положения КЭ

$$C_i(f) := \begin{cases} \text{for } i \in 0..5 \\ \quad \| \text{for } j \in n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \| \| c_{i,j} \leftarrow 0 \\ \quad \| \text{for } i \in 0..5 \\ \quad \| \| k \leftarrow A_{f_{i,f}} \\ \quad \| \| c_{i,k} \leftarrow 1 \\ c \end{cases}$$

Матрица жесткости в глобальной системе координат

$$K := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \| \text{for } j \in 0..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \| \| k_{i,j} \leftarrow 0 \\ \quad \| \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \| \| k \leftarrow k + C_i(i)^T \cdot K_i(i) \cdot C_i(i) \\ k \end{cases}$$

Границные условия К

```

 $k_r(K) := \begin{cases} K_r \leftarrow K \\ \text{for } i \in 0..n_j-1 \\ \quad \left\| rstr \leftarrow \begin{bmatrix} U_{x_i} \\ U_{z_i} \\ R_{y_i} \end{bmatrix} \right. \\ \quad \text{for } j \in 0..2 \\ \quad \quad \left\| \text{if } rstr_j \neq 0 \right. \\ \quad \quad \quad \left\| rs \leftarrow i \cdot 3 + j \right. \\ \quad \quad \quad \text{for } k \in 0..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \quad \quad \left\| K_{r_{rs,k}} \leftarrow 0 \right. \\ \quad \quad \quad \quad \left\| K_{r_{k,rs}} \leftarrow 0 \right. \\ \quad \quad \quad \quad \left\| K_{r_{rs,rs}} \leftarrow 1 \right. \\ \quad \quad \quad \text{if } K_{r_{i \cdot 3 + 2, i \cdot 3 + 2}} = 0 \\ \quad \quad \quad \quad \left\| K_{r_{i \cdot 3 + 2, i \cdot 3 + 2}} \leftarrow 1 \right. \\ \quad \quad \quad \left\| K_r \right. \end{cases}$ 

```

$$K_r := k_r(K)$$

Матрица масс в локальной
системе координат

```

 $M'(k) := \begin{cases} \text{for } i \in 0..5 \\ \quad \left\| \text{for } j \in 0..5 \\ \quad \quad \left\| M_{i,j} \leftarrow 0 \right. \right. \\ \quad \quad \quad \left\| m_{x_{j_{s_k}}} \right. \\ \quad \quad \quad \left\| M_{0,0} \leftarrow \frac{\text{tonne}}{m_{x_{j_{s_k}}}} \right. \\ \quad \quad \quad \left\| M_{3,3} \leftarrow \frac{\text{tonne}}{m_{x_{j_{e_k}}}} \right. \\ \quad \quad \quad \left\| M \right. \end{cases}$ 

```

Границные условия F

```

 $f_r(F) := \begin{cases} F_r \leftarrow F \\ \text{for } i \in 0..n_j-1 \\ \quad \left\| rstr \leftarrow \begin{bmatrix} U_{x_i} \\ U_{z_i} \\ R_{y_i} \end{bmatrix} \right. \\ \quad \text{for } j \in 0..2 \\ \quad \quad \left\| \text{if } rstr_j \neq 0 \right. \\ \quad \quad \quad \left\| rs \leftarrow i \cdot 3 + j \right. \\ \quad \quad \quad \left\| F_{r_{rs}} \leftarrow 0 \right. \\ \quad \quad \quad \left\| F_r \right. \end{cases}$ 

```

Матрица масс в глобальной
системе координат

```

 $M := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \left\| \text{for } j \in 0..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \left\| m_{i,j} \leftarrow 0 \right. \right. \\ \quad \quad \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \quad \quad \left\| m_i \leftarrow C_i(i)^T \cdot M'(i) \cdot C_i(i) \right. \\ \quad \quad \quad \text{for } j \in 0..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \quad \quad \quad \left\| \text{if } m_{j,j} = 0 \right. \\ \quad \quad \quad \quad \left\| m_{j,j} \leftarrow m_{i_{j,j},j} \right. \end{cases}$ 

```

Число степеней
свободы масс

$$n_m := \begin{cases} n \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..n_j-1 \\ \quad \begin{cases} \text{if } m_{x_i} \neq 0 \\ \quad \begin{cases} n \leftarrow n+1 \\ \end{cases} \end{cases} \\ n \end{cases}$$

Матрица податливости

$$\delta := K_r^{-1}$$

$$d := \delta \cdot M$$

Собственные значения

$$\lambda := \text{submatrix}(\text{eigenvals}(d), 0, n_m - 1, 0, 0) = \begin{bmatrix} 0.001135 \\ 0.000028 \\ 0.000004 \end{bmatrix}$$

Круговая частота

$$\omega := \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \begin{bmatrix} 29.681545 \\ 189.553551 \\ 505.091096 \end{bmatrix}$$

Период

$$T := \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \begin{bmatrix} 0.211687 \\ 0.033147 \\ 0.01244 \end{bmatrix}$$

Техническая частота

$$f := \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \begin{bmatrix} 4.723965 \\ 30.168385 \\ 80.387745 \end{bmatrix}$$

Собственные векторы

$$u := \text{eigenvecs}(d)$$

$$vx := \text{stack}(0 \text{ } \mathbf{m}, x_i) = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.1 \\ 10.2 \\ 15.3 \end{bmatrix} \mathbf{m}$$

$$U := \begin{cases} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 3..n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \begin{cases} \text{for } j \in 0..2 \\ \quad \begin{cases} U_{i-k-3,j} \leftarrow u_{i,j} \\ \end{cases} \end{cases} \\ k \leftarrow k + 2 \\ U \end{cases}$$

$$vy := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad \left\| vy_i \leftarrow \text{stack}(0, U^{(i)}) \right. \\ \end{array} \right\| vy$$

$$c0 := \text{cspline}(vx, vy_0)$$

$$u_{-0}(x) := \text{interp}(c0, vx, vy_0, x)$$

$$c1 := \text{cspline}(vx, vy_1)$$

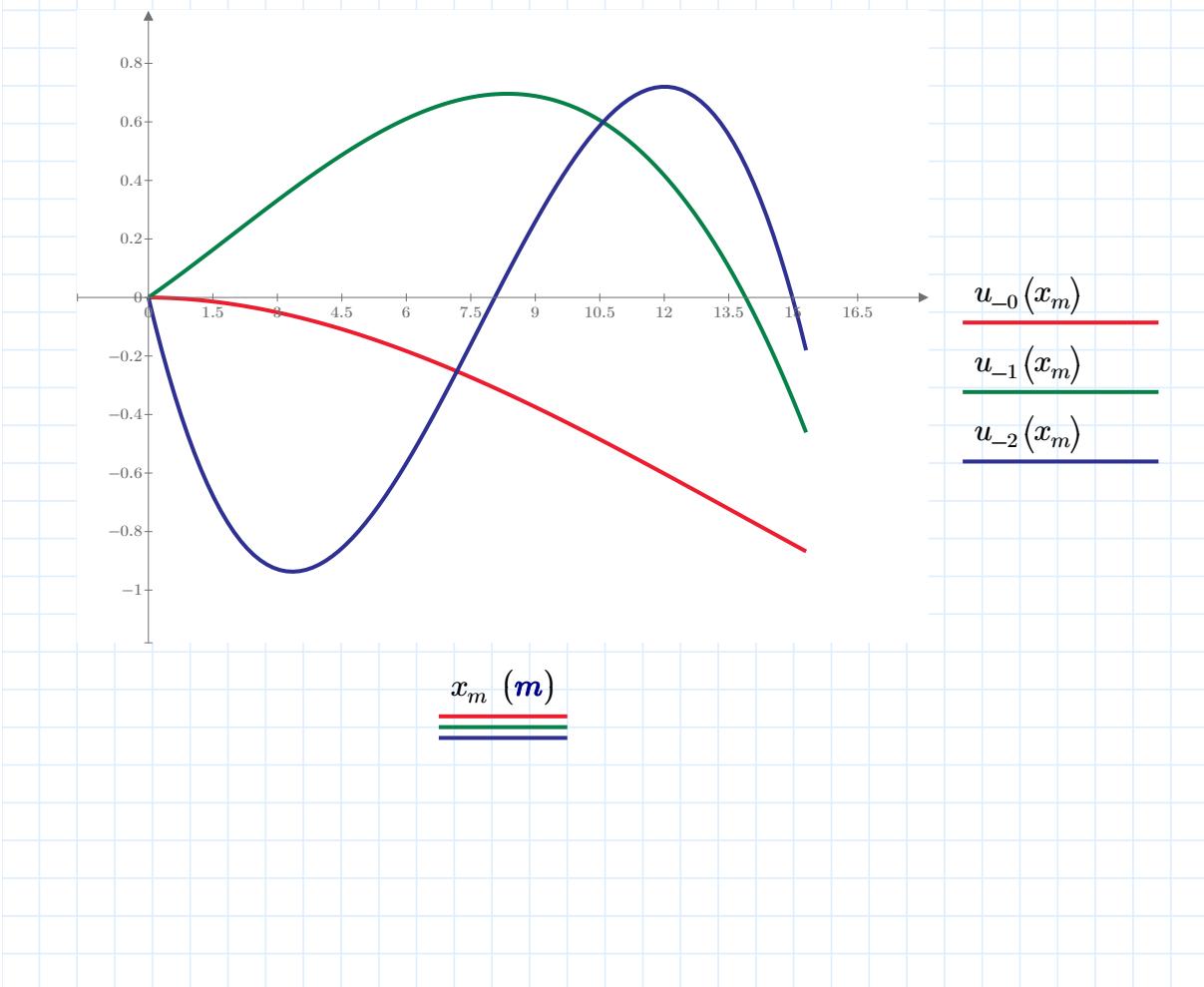
$$u_{-1}(x) := \text{interp}(c1, vx, vy_1, x)$$

$$c2 := \text{cspline}(vx, vy_2)$$

$$u_{-2}(x) := \text{interp}(c2, vx, vy_2, x)$$

Формы колебаний

$$x_m := 0 \text{ } \textcolor{blue}{m}, \frac{L}{100}..L$$



Матрица весов масс

$$G_m := M \cdot \frac{\mathbf{g} \cdot \mathbf{s}^2}{m}$$

```

G := || k ← 0
      || for i ∈ 3..6..n_j · 3 - 1
      ||   || l ← 0
      ||   || for j ∈ 3..6..n_j · 3 - 1
      ||   ||   || g_{i-3..j-3..l} ← G_{m_{i,j}}
      ||   ||   || l ← l + 2
      ||   || k ← k + 2
      || g
  
```

$$E1 := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ E_i \leftarrow 1 \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия

$$\eta := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ \eta_i \leftarrow \frac{(U^{(i)})^T \cdot G \cdot E1}{(U^{(i)})^T \cdot G \cdot U^{(i)}} \cdot U^{(i)} \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 0.206097 \\ 0.699016 \\ 1.312403 \\ 0.459585 \\ 0.535203 \\ -0.391604 \\ 0.334318 \\ -0.234218 \\ 0.079201 \end{bmatrix}$$

Проверка

$$\left(\eta_0\right)_0 + \left(\eta_1\right)_0 + \left(\eta_2\right)_0 = 1$$

$$\left(\eta_0\right)_1 + \left(\eta_1\right)_1 + \left(\eta_2\right)_1 = 1$$

$$\left(\eta_0\right)_2 + \left(\eta_1\right)_2 + \left(\eta_2\right)_2 = 1$$

значение ускорения в уровне основания

$$As := 4 \frac{m}{s^2}$$

коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность

$$K_0 := 1.1$$

коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений

$$K_{-1} := 0.3$$

коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии

$$K_\psi := 1$$

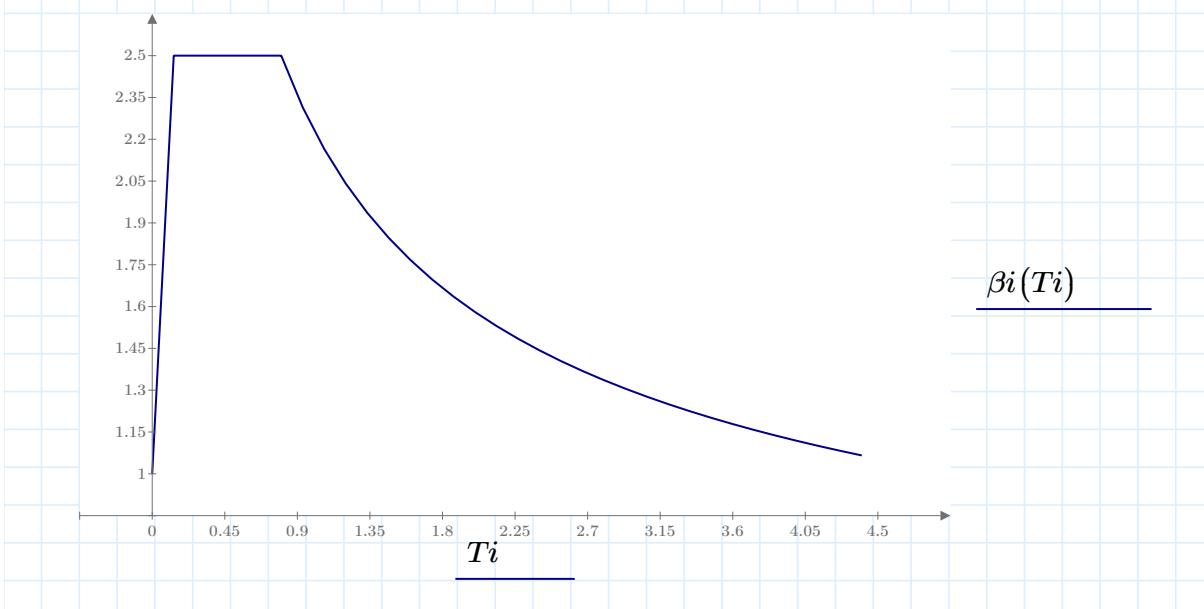
Категории грунтов

$soil := 3$

```
 $\beta_i(T) := \begin{cases} \text{if } soil = 1 \\ \quad \begin{cases} \text{if } T \leq 0.1 \\ \quad \beta_i \leftarrow 1 + 15 \cdot T \\ \text{else if } 0.1 < T < 0.4 \\ \quad \beta_i \leftarrow 2.5 \\ \text{else} \\ \quad \beta_i \leftarrow 2.5 \cdot \left( \frac{0.4}{T} \right)^{0.5} \end{cases} \\ \text{else} \\ \quad \begin{cases} \text{if } T \leq 0.1 \\ \quad \beta_i \leftarrow 1 + 15 \cdot T \\ \text{else if } 0.1 < T < 0.8 \\ \quad \beta_i \leftarrow 2.5 \\ \text{else} \\ \quad \beta_i \leftarrow 2.5 \cdot \left( \frac{0.8}{T} \right)^{0.5} \end{cases} \\ \text{if } \beta_i < 0.8 \\ \quad \beta_i \leftarrow 0.8 \\ \beta_i \end{cases}$ 
```

Значения коэффициента динамичности

$Ti := 0, \frac{2}{15} \dots 4.5$



$$\beta := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \beta_i \leftarrow \beta_i(T_i) \\ \beta \end{array} \right\| \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 2.5 \\ 1.497209 \\ 1.186596 \end{bmatrix}$$

$$S_0 := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} S_{0,i} \leftarrow \frac{G}{g} \cdot \eta_i \cdot A_s \cdot \beta_i \cdot K_\Psi \cdot kN \\ S_0 \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Расчетная сейсмическая нагрузка

$$S := K_0 \cdot K_{-1} \cdot S_0$$

$$F_z := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} kN$$

$$M_y := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} kN \cdot m$$

Узловые нагрузки

$$F_p(F_x) := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in n_j \cdot 3 - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_i \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} F_{x,j_{s_i}} \\ f_{i \cdot 3 + 3} \leftarrow \frac{F_{x,j_{s_i}}}{kN} \\ F_{z,j_{s_i}} \\ f_{i \cdot 3 + 4} \leftarrow \frac{F_{z,j_{s_i}}}{kN} \\ f_{i \cdot 3 + 5} \leftarrow \frac{M_{y,j_{s_i}}}{kN \cdot m} \\ f \end{array} \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Перемещения узлов

$$U_i(U) := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_j - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} u_i \leftarrow \begin{bmatrix} U_{i \cdot 3} \cdot m \\ U_{i \cdot 3 + 1} \cdot m \\ U_{i \cdot 3 + 2} \cdot rad \end{bmatrix} \\ u \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Узловые усилия в КЭ

$$S_i(U) := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} U_- \leftarrow C_i(i) \cdot U \\ s_i \leftarrow (T_\alpha(i) \cdot K_i(i)) \cdot U_- \\ s \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U) := \left\| \begin{array}{l} S \leftarrow S_i(U) \\ \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} q_i \leftarrow \left[-\left(S_i\right)_1 \left(S_i\right)_4 \right] kN \\ q \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U) := \left\| \begin{array}{l} S_i \leftarrow S_i(U) \\ \text{for } i \in 0..n_f - 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} m_i \leftarrow \left[\left(S_i\right)_2 - \left(S_i\right)_5 \right] \cdot kN \cdot m \\ m \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Решение по форме 0

Перемещения узлов

$$U_0 := \text{lsolve}(K_r, f_r(F_p(S_0)))$$

$$U_i(U_0) = \begin{bmatrix} 0 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ 0 \\ 0.000772 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ 0.000279 \\ 0.002618 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ 0.000424 \\ 0.004916 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ 0.000464 \end{bmatrix}$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U_0) = \begin{bmatrix} [-1.462964 \cdot 10^7 \quad -1.462964 \cdot 10^7] \text{ } N \\ [-1.319546 \cdot 10^7 \quad -1.319546 \cdot 10^7] \text{ } N \\ [-8.33116 \cdot 10^6 \quad -8.33116 \cdot 10^6] \text{ } N \end{bmatrix} \text{ } N$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U_0) = \begin{bmatrix} [-184396.913 \quad -109785.74] \\ [-109785.74 \quad -42488.914] \\ [-42488.914 \quad 0] \end{bmatrix} \text{ } kN \cdot m$$

Решение по форме 1

Перемещения узлов

$$U_1 := \text{lsolve}(K_r, f_r(F_p(S_1)))$$

$$U_i(U_1) = \begin{bmatrix} 0 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ 0 \\ 0.000025 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ 0.000006 \\ 0.000029 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ -0.000005 \\ -0.000022 \text{ } m \\ 0 \text{ } m \\ -0.000012 \end{bmatrix}$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U_1) = \begin{bmatrix} [-2.657005 \cdot 10^6 \quad -2.657005 \cdot 10^6] \text{ } N \\ [-7.416868 \cdot 10^5 \quad -7.416868 \cdot 10^5] \text{ } N \\ [1.48877 \cdot 10^6 \quad 1.48877 \cdot 10^6] \text{ } N \end{bmatrix} \text{ } N$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U_1) = \begin{bmatrix} [-9740.601 \quad 3810.125] \\ [3810.125 \quad 7592.727] \\ [7592.727 \quad 0] \end{bmatrix} \text{ } kN \cdot m$$

Решение по форме 2

Перемещения узлов

$$U_2 := \text{lsolve}(K_r, f_r(F_p(S_2)))$$

Поперечные силы в сечениях КЭ

$$Q_i(U_2) = \begin{bmatrix} [-5.692523 \cdot 10^5 & -5.692523 \cdot 10^5] \\ [5.34968 \cdot 10^5 & 5.34968 \cdot 10^5] \\ [-2.386327 \cdot 10^5 & -2.386327 \cdot 10^5] \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

$$U_i(U_2) = \begin{bmatrix} 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \\ 0.000002 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \\ -0.000001 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0.000001 \end{bmatrix}$$

Изгибающие моменты в сечениях КЭ

$$M_i(U_2) = \begin{bmatrix} [-1391.876 & 1511.31] \\ [1511.31 & -1217.027] \\ [-1217.027 & 0] \end{bmatrix} \mathbf{kN} \cdot \mathbf{m}$$

Перемещения от сейсмического воздействия

$$U_s := U_i(\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2}) = \begin{bmatrix} 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0 \\ 0.000772 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0.000279 \\ 0.002619 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0.000424 \\ 0.004916 \ \mathbf{m} \\ 0 \ \mathbf{m} \\ 0.000464 \end{bmatrix}$$

Поперечные силы от сейсмического воздействия

$$Q_s := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f-1 \\ Q_i \leftarrow Q_i (U_0)_i^T + Q_i (U_1)_i^T + Q_i (U_2)_i^T \\ \sqrt{Q} \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 14879.857 \\ 14879.857 \\ 13227.107 \\ 13227.107 \\ 8466.499 \\ 8466.499 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

Моменты от сейсмического воздействия

$$M_s := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_f-1 \\ M_i \leftarrow M_i (U_0)_i^T + M_i (U_1)_i^T + M_i (U_2)_i^T \\ \sqrt{M} \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 184659.249 \\ 109862.231 \\ 109862.231 \\ 43179.144 \\ 43179.144 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$