

П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, Н. Г. ГАРМАШ, Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ТУРБОАГРЕГАТ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

АННОТАЦИЯ Представлены основные особенности методического обеспечения, разработанного на основе метода конечных элементов для расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание при сейсмических воздействиях. Элементы расчетной схемы моделируются произвольно ориентированными стержнями и сосредоточенными массами с моментами инерции, которые соединяются абсолютно жестко или с помощью упруго-демпферных связей. В стержневых элементах с распределенными параметрами учитываются все виды деформаций, которые имеют место при колебаниях. Сейсмическое нагружение моделируется переменными инерционными силами, полученными из экспериментальных акселерограмм землетрясений. При исследовании динамических процессов в системе турбоагрегат-фундамент-основание при сейсмических воздействиях используются расчетные модели различного уровня сложности.

Ключевые слова: турбоагрегат, сейсмическое воздействие, колебания, стержневой конечный элемент, упруго-демпферная связь.

P. GONTAROVSKIY, N. GARMASH, N. SHULZHENKO

METHODOLOGY OF CALCULATION OF THE DYNAMICS OF THE SYSTEM TURBINE-FOUNDATION-BASE POWER UNITS UNDER SEISMIC ACTIONS

ABSTRACT The creation of powerful turbine units of nuclear power plants requires an assessment of the structure response to seismic action. For analysis of dynamic processes in the turbine units under seismic actions is necessary to be taken into account the interaction of the turbine unit and foundation. Method and software for analysis of turbine-foundation-base system under seismic action are proposed. The software package is based on the finite element method with the direct integration of the motion equations by Newmark's or Wilson's method. The rod computational models for solve problems forced flexural, longitudinal, torsional vibrations and transients shafting on complex elastic-damper supports are used. The foundation plates are modeled by of the rods grating that take into account elasticity and inertial properties of foundation elements. The lumped mass at the nodes of rods of foundation are used to account for the mass of the installed equipment and pipelines. The problem of non-stationary dynamic analysis of forced vibrations is solved in the mobile coordinate system associated with the foundation. The accelerations of foundation in three perpendicular directions are specified by using digitized real or synthesized accelerograms. The symmetric matrices of a special structure are used to achieve high performance in the calculations. Created graphical interface allows to visualize the geometry of the structure, its discretization into finite elements, deformation at different times, the graphics of displacement vs. time, velocity and acceleration of individual construction points, as well as forces in the elastic connections. The stresses in elastic connections, their maximum and minimum values and the time of their occurrence are determined for evaluation of strength of the turbine-foundation-base system. The results of analysis of turbine K-1100-23.5 for different design models are shown.

Key words: turbine, seismic action, vibration, rod finite element, elastic-damper connection.

Введение

Создание мощных турбоагрегатов требует оценки реакции конструкции на сейсмические воздействия. При этом используемые расчетные модели должны позволять прогнозирование усилий, возникающих в отдельных элементах турбоагрегата и, прежде всего, в элементах крепления его на фундаменте и в опорном подшипнике, а также оценить возможность задевания роторов валопровода о корпусные элементы [1].

Постановка задачи

Задача динамического анализа вынужденных нестационарных колебаний решается в подвижной системе координат, связанной с основанием, ускорения которого в трех взаимноперпендикулярных направлениях задаются с помощью

оцифрованных реальных или синтезированных акселерограмм.

Возмущение передается от грунта на нижнюю фундаментную плиту. При этом податливость почвы учитывается моделью Винклера. Динамическая система турбоагрегат-фундамент представлена расчетной моделью, включающей фундаментную плиту, на которой установлены конденсаторы, и рамно-стеновой фундамент с установленными на нем корпусами цилиндров высокого и низкого давления, корпусами генератора и возбудителя, выносными подшипниками, на которые через масляный слой опирается валопровод.

Элементы конструкции моделируются набором произвольно ориентированных стержней с распределенной массой и сосредоточенных масс, обладающих моментами инерции, которые соединяются между собой абсолютно жестко или с помощью линейных или нелинейных упруго-

демпферних связей. Пластинчатые составляющие фундамента моделируются решетками из стержней, учитывающими податливость и инерционные свойства его элементов. Сосредоточенные массы в узлах стержней фундамента используются для учета массы установленного оборудования и трубопроводов. Корпуса цилиндров высокого давления, генератора и возбуждителя, корпуса подшипников, конденсаторы могут моделироваться стержнями, системой стержней или сосредоточенными массами. Последнее вполне допустимо, если учесть высокие жесткостные характеристики этих элементов. Тонкостенные и более податливые корпуса цилиндров низкого давления целесообразно представлять системой стержней, характеристики которых определяются на основе предварительных расчетов их динамических характеристик по трехмерным оболочечно-стержневым моделям. Участки роторов моделируются трубчатыми стержневыми элементами соответствующей формы, а облопаченные диски и фланцевые соединения – сосредоточенными массами.

Стержни могут испытывать изгибно-крутильно-продольные деформации. При этом имеет место депланация их поперечных сечений при сдвиге и кручении.

Алгоритм решения задачи

Конструкция рассматривается в правой декартовой системе координат xuz . Для описания ее деформирования используется метод конечных элементов. Каждый узел M имеет шесть степеней свободы $\vec{u}^M = \{u_x^M, u_y^M, u_z^M, \varphi_x^M, \varphi_y^M, \varphi_z^M\}$ – три перемещения в направлении осей xuz и три угла поворота вокруг этих же осей. Расчетная модель может быть набрана из так называемых ответвлений, состоящих из жестко подсоединенных друг за

другом стержней, разбитых на конечные элементы, и масс-ответвлений, содержащих один узел в центре масс и занимающих недеформируемый объем, обладающий центральными моментами инерции относительно осей, параллельных осям глобальной системы координат. С помощью упруго-демпферных связей масса-ответвление может быть соединена с другими узлами конструкции. Положение оси стержня определяется координатами ее начала x_n, y_n, z_n и конца x_k, y_k, z_k . Его деформирование рассматривается в местной системе координат $x'y'z'$, где ось x' направлена вдоль оси стержня, y', z' – главные центральные оси поперечного сечения. В случае стержня общего положения для ориентации оси y' задаются координаты x_0, y_0, z_0 любой точки, лежащей в плоскости $x'y'$ (рис. 1).

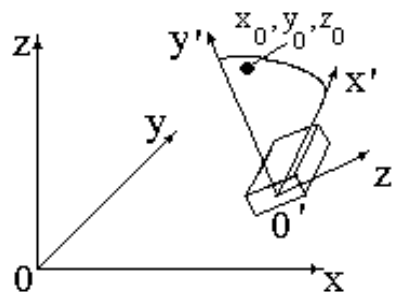


Рис. 1 – Стержневой элемент системы

Геометрические характеристики поперечных сечений определяются величинами $F, J_{y'}, J_{z'}, J_k, f_m, J_p, k_{y'}, k_{z'}$. В случае типичных профилей (прямоугольник, труба, тавр и др.) геометрические характеристики вычисляются по характерным размерам типичного профиля. В начале или конце стержня могут иметь место сосредоточенные массы с моментами инерции.

Матрица жесткости стержневого элемента с узлами ij имеет вид:

$$C_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^3} & 0 & -\frac{6EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ_k}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^2} & 0 & \frac{(1+\alpha_z/2)4EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l} & 0 \\ 0 & \frac{6EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(1+\alpha_y/2)4EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l} \end{bmatrix},$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{EF}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^3} & 0 & -\frac{6EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ_k}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^2} & 0 & \frac{(1-\alpha_z)2EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l} & 0 \\ 0 & -\frac{6EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-\alpha_y)2EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l} \end{bmatrix},$$

$$C_{ji} = \begin{bmatrix} \frac{EF}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^3} & 0 & \frac{6EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ_k}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l^2} & 0 & \frac{(1+\alpha_z/2)4EJ_{y'}}{(1+2\alpha_z)l} & 0 \\ 0 & -\frac{6EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(1+\alpha_y/2)4EJ_{z'}}{(1+2\alpha_y)l} \end{bmatrix},$$

где $\alpha_y = \frac{6EJ_{z'}}{GFk_y l^2}$; $\alpha_z = \frac{6EJ_{y'}}{GFk_z l^2}$.

Здесь E , G – модуль продольной упругости и модуль сдвига материала стержня; l – длина конечного элемента; F , $J_{y'}$, $J_{z'}$ – площадь и моменты инерции поперечного сечения стержня вокруг главных центральных осей y' и z' ; $k_{y'}$, $k_{z'}$ – коэффициенты формы поперечного сечения [2], учиты-

вающие неравномерность распределения касательных напряжений по поперечному сечению стержня при изгибе поперечной силой. Нахождение этих коэффициентов сводится к вычислению определенных интегралов от решений уравнений Пуассона для области поперечного сечения стержня в двух направлениях [3]. Матрица масс для стержневого конечного элемента с узлами ij с учетом деформаций сдвига имеет вид

$$M_{ii} = \frac{\rho l}{420} \cdot \begin{bmatrix} 140F_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4F_m m_{uiy} & 0 & 0 & 0 & F_m l m_{\phi iy} \\ 0 & 0 & 4F_m m_{uiz} & 0 & -F_m l m_{\phi iz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 140J_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -F_m l m_{\phi iz} & 0 & 2F_m l^2 m_{kiz} & 0 \\ 0 & F_m l m_{\phi iy} & 0 & 0 & 0 & 2F_m l^2 m_{kiy} \end{bmatrix},$$

$$M_{ij} = \frac{\rho l}{420} \cdot \begin{bmatrix} 70F_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2F_m m_{ujy} & 0 & 0 & 0 & -F_m l m_{\phi jy} \\ 0 & 0 & 2F_m m_{ujz} & 0 & F_m l m_{\phi jz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70J_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -F_m l m_{\phi jz} & 0 & -F_m l^2 m_{kjz} & 0 \\ 0 & F_m l m_{\phi jy} & 0 & 0 & 0 & -F_m l^2 m_{k jy} \end{bmatrix},$$

$$M_{jj} = \frac{\rho l}{420} \cdot \begin{bmatrix} 140F_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4F_m m_{uiy} & 0 & 0 & 0 & -F_m l m_{\phi iy} \\ 0 & 0 & 4F_m m_{uiz} & 0 & F_m l m_{\phi iz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 140J_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_m l m_{\phi iz} & 0 & 2F_m l^2 m_{kiz} & 0 \\ 0 & -F_m l m_{\phi iy} & 0 & 0 & 0 & 2F_m l^2 m_{kiy} \end{bmatrix},$$

где $m_{uiy} = (39 + 147\alpha_y + 140\alpha_y^2)/(1 + 2\alpha_y)^2$;
 $m_{uiz} = (39 + 147\alpha_z + 140\alpha_z^2)/(1 + 2\alpha_z)^2$;
 $m_{uijy} = (27 + 126\alpha_y + 140\alpha_y^2)/(1 + 2\alpha_y)^2$;
 $m_{uijz} = (27 + 126\alpha_z + 140\alpha_z^2)/(1 + 2\alpha_z)^2$;
 $m_{\phi iy} = (22 + 77\alpha_y + 70\alpha_y^2)/(1 + 2\alpha_y)^2$;
 $m_{\phi iz} = (22 + 77\alpha_z + 70\alpha_z^2)/(1 + 2\alpha_z)^2$;
 $m_{kiy} = (2 + 7\alpha_y + 7\alpha_y^2)/(1 + 2\alpha_y)^2$;
 $m_{kiz} = (2 + 7\alpha_z + 7\alpha_z^2)/(1 + 2\alpha_z)^2$;
 $m_{\phi jy} = (13 + 63\alpha_y + 70\alpha_y^2)/(1 + 2\alpha_y)^2$;

$m_{\phi jz} = (13 + 63\alpha_z + 70\alpha_z^2)/(1 + 2\alpha_z)^2$;
 $m_{kijy} = (3 + 14\alpha_y + 14\alpha_y^2)/(1 + 2\alpha_y)^2$;
 $m_{kijz} = (3 + 14\alpha_z + 14\alpha_z^2)/(1 + 2\alpha_z)^2$,

где ρ – плотность материала стержня; F_m – массовая площадь поперечного сечения стержня; J_p – полярный момент инерции поперечного сечения стержня относительно центра тяжести.

Добавки к матрице масс стержневого конечного элемента, вызванные учетом инерции поворота поперечных сечений стержня при изгибе, имеют вид

$$M_{ii}^{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6\rho J_{z'}}{5l(1+2\alpha_y)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho J_{z'}(1-10\alpha_y)}{10(1+2\alpha_y)^2} \\ 0 & 0 & \frac{6\rho J_{y'}}{5l(1+2\alpha_z)^2} & 0 & -\frac{\rho J_{y'}(1-10\alpha_z)}{10(1+2\alpha_z)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\rho J_{y'}(1-10\alpha_z)}{10(1+2\alpha_z)^2} & 0 & \frac{\rho J_{y'}l(2+5\alpha_z+20\alpha_z^2)}{15(1+2\alpha_z)^2} & 0 \\ 0 & \frac{\rho J_{z'}(1-10\alpha_y)}{10(1+2\alpha_y)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho J_{z'}l(2+5\alpha_y+20\alpha_y^2)}{15(1+2\alpha_y)^2} \end{bmatrix},$$

$$M_{ij}^{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6\rho J_{z'}}{5l(1+2\alpha_y)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho J_{z'}(1-10\alpha_y)}{10(1+2\alpha_y)^2} \\ 0 & 0 & -\frac{6\rho J_{y'}}{5l(1+2\alpha_z)^2} & 0 & -\frac{\rho J_{y'}(1-10\alpha_z)}{10(1+2\alpha_z)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho J_{y'}(1-10\alpha_z)}{10(1+2\alpha_z)^2} & 0 & -\frac{\rho J_{y'}l(2+10\alpha_z-20\alpha_z^2)}{30(1+2\alpha_z)^2} & 0 \\ 0 & -\frac{\rho J_{z'}(1-10\alpha_y)}{10(1+2\alpha_y)^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho J_{z'}l(2+10\alpha_y-20\alpha_y^2)}{30(1+2\alpha_y)^2} \end{bmatrix},$$

$$M_{jj}^{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6\rho J_{z'}}{5l(1+2\alpha_y)^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho J_{z'}(1-10\alpha_y)}{10(1+2\alpha_y)^2} \\ 0 & 0 & \frac{6\rho J_{y'}}{5l(1+2\alpha_z)^2} & 0 & \frac{\rho J_{y'}(1-10\alpha_z)}{10(1+2\alpha_z)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\rho J_{y'}(1-10\alpha_z)}{10(1+2\alpha_z)^2} & 0 & \frac{\rho J_{y'}l(2+5\alpha_z+20\alpha_z^2)}{15(1+2\alpha_z)^2} & 0 \\ 0 & -\frac{\rho J_{z'}(1-10\alpha_y)}{10(1+2\alpha_y)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho J_{z'}l(2+5\alpha_y+20\alpha_y^2)}{15(1+2\alpha_y)^2} \end{bmatrix}.$$

Матрица жесткости конечного элемента, полученная в системе координат $x'y'z'$, с помощью матрицы направляющих косинусов преобразуется к глобальным координатам. Если системы координат параллельны, вместо перемножения матриц осуществляется перестановка строк и столбцов, что уменьшает объем вычислений.

Ответвление из стержней может одним или обоими своими концами подсоединяться к узлам уже заданных ответвлений. Узлы ответвления могут подсоединяться к узлам уже заданных ответвлений также при помощи упруго-демпферных связей (пружин), присоединяемых в заданных точках. В случае жесткого соединения узлов их координаты могут не совпадать, тогда участок между этими узлами считается абсолютно жестким (недеформируемым) и сохраняется только один предыдущий узел с общим номером.

Рассмотрим случай, часто встречающийся на практике, когда конечный элемент с узлами ij жестко подсоединяется к узлу j предыдущего элемента, при этом координаты узла j предыдущего элемента x_j^M, y_j^M, z_j^M не совпадают с координатами i узла подсоединенного элемента x_i^S, y_i^S, z_i^S (рис. 2).

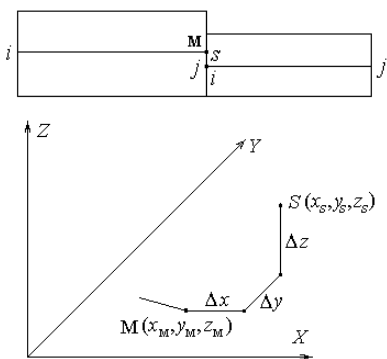


Рис. 2 – Схема жесткого соединения конечных элементов при несовпадении координат их узлов

На рис. 2 $\Delta x = x_s - x_m$, $\Delta y = y_s - y_m$, $\Delta z = z_s - z_m$ – разность между координатами соединяемых узлов. При этом основным узлом является узел предыдущего элемента, к которому должны добавиться слагаемые подсоединенного конечного элемента. Для подсоединяемого элемента справедливы соотношения

$$\bar{P}_i^s = C_{ii}^s \bar{U}_{is} + C_{ij}^s \bar{U}_{js}, \quad \bar{P}_j^s = C_{ij}^s \bar{U}_{is} + C_{jj}^s \bar{U}_{js}, \quad (1)$$

где

$$\bar{P}_i^s = \begin{pmatrix} P_{xi}^s \\ P_{yi}^s \\ P_{zi}^s \\ M_{xi}^s \\ M_{yi}^s \\ M_{zi}^s \end{pmatrix}, \quad \bar{U}_{is} = \begin{pmatrix} U_{xi}^s \\ U_{yi}^s \\ U_{zi}^s \\ \varphi_{xi}^s \\ \varphi_{yi}^s \\ \varphi_{zi}^s \end{pmatrix}.$$

Перемещения в точке S можно выразить через перемещения в точке M с учетом жесткого участка MS следующим соотношением

$$\bar{U}_{is} = B \bar{U}_{jm}, \quad P_i^M = B' \bar{P}_i^s, \quad (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta z & -\Delta y \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta z & 0 & \Delta x \\ 0 & 0 & 1 & \Delta y & -\Delta x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta z & \Delta y & 1 & 0 & 0 \\ \Delta z & 0 & -\Delta x & 0 & 1 & 0 \\ -\Delta y & \Delta x & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Подставляя (1) в (2) будем иметь

$$\begin{cases} \bar{P}_i^M = B' \bar{P}_i^s = B' C_{ii}^s B \bar{U}_{jm} + B' C_{ij}^s \bar{U}_{js}, \\ \bar{P}_j^s = C_{ij}^s B \bar{U}_{jm} + C_{jj}^s \bar{U}_{js}. \end{cases} \quad (3)$$

Преобразовав таким образом матрицы жесткости подсоединяемого конечного элемента, можно накопить их в общую матрицу жесткости. Это очень удобно, т.к. не требуется стыковать стержневые элементы узел в узел, вводя дополнительные жесткие элементы, к тому же уменьшается порядок разрешающих уравнений метода конечных элементов.

Упруго-демпферная связь на краях подсоединяется к точкам с координатами, которые не обязательно совпадают с координатами узлов, и сопротивляется взаимным перемещениям с помощью жесткостей $C_x, C_y, C_z, C_{\varphi x}, C_{\varphi y}, C_{\varphi z}$ и демпферов d_x, d_y, d_z , препятствующих скоростям перемещений (рис. 3). Рассмотрим часто встречающуюся ситуацию, когда сформированы матрицы жесткостей узлов M_1 и M_2 . Эти узлы связаны при помощи упругой связи с помощью жесткостей $C_x, C_y, C_z, C_{\varphi x}, C_{\varphi y}, C_{\varphi z}$, где начало связи находится в точке S_1 , а конец – в точке S_2 (рис. 3). Участки $M_1 S_1$ и $M_2 S_2$ абсолютно жесткие. Получим матрицу жесткости упругой связи, которая добавляется в узлы M_1 и M_2 (нумерация элементов представлена на рис. 4).

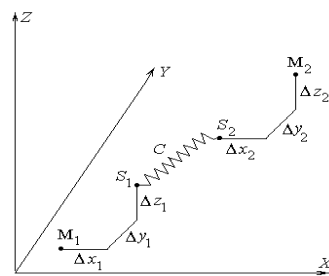


Рис. 3 – Модель соединения узлов с помощью упругой связи

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
		34	35	36	37	38	39	40	41	42	
			43	44	45	46	47	48	49	50	
				51	52	53	54	55	56	57	
					58	59	60	61	62	63	
						64	65	66	67	68	
							69	70	71	72	
								73	74	75	
									76	77	
										78	

Рис. 4 – Нумерація елементів матриці упругої зв'язи

Действуя по аналогии с предыдущим случаем жесткого соединения узлов КЭ, получим зависимости для ненулевых элементов матрицы

$$\begin{aligned}
 C_1 &= C_x, & C_5 &= C_x \cdot \Delta z_1, & C_6 &= -C_x \cdot \Delta y_1, & C_7 &= -C_x, \\
 C_{11} &= -C_x \cdot \Delta z_2, & C_{12} &= C_x \cdot \Delta y_2, & C_{13} &= C_y, \\
 C_{15} &= -C_y \cdot \Delta z_1, & C_{17} &= C_y \cdot \Delta x_1, & C_{19} &= -C_y, \\
 C_{21} &= C_y \cdot \Delta z_2, & C_{23} &= C_y \cdot \Delta x_2, & C_{24} &= C_z, & C_{25} &= C_z \cdot \Delta y_1, \\
 C_{26} &= -C_z \cdot \Delta x_1, & C_{30} &= -C_z, & C_{31} &= -C_z \cdot \Delta y_2, \\
 C_{32} &= C_z \cdot \Delta x_2, & C_{34} &= C_{\phi x} + C_y \cdot \Delta z_1^2 + C_z \cdot \Delta y_1^2, \\
 C_{38} &= C_z \cdot \Delta z_1, & C_{39} &= -C_z \cdot \Delta y_1, \\
 C_{40} &= -C_{\phi x} - C_y \cdot \Delta z_1 \cdot \Delta z_2 - C_z \cdot \Delta y_1 \Delta y_2, \\
 C_{43} &= C_{\phi y} + C_y \cdot \Delta z_1^2 + C_z \cdot \Delta x_1^2, & C_{45} &= -C_x \cdot \Delta z_1, \\
 C_{47} &= C_z \cdot \Delta x_1, & C_{49} &= -C_{\phi y} - C_y \cdot \Delta z_1 \cdot \Delta z_2 + C_z \Delta x_1 \Delta x_2, \\
 C_{51} &= C_{\phi z} + C_x \cdot \Delta y_1^2 + C_y \Delta x_1^2, & C_{52} &= C_x \cdot \Delta y_1, \\
 C_{53} &= -C_y \cdot \Delta x_1, & C_{57} &= -C_{\phi z} - C_x \cdot \Delta y_1 \cdot \Delta y_2 - C_y \Delta x_1 \Delta x_2, \\
 C_{58} &= C_x, & C_{62} &= C_x \cdot \Delta z_2, & C_{63} &= -C_x \cdot \Delta y_2, & C_{64} &= C_y, \\
 C_{66} &= -C_y \cdot \Delta z_2, & C_{68} &= C_y \cdot \Delta x_2, & C_{69} &= C_z, \\
 C_{70} &= C_z \cdot \Delta y_2, & C_{71} &= -C_z \cdot \Delta x_2, \\
 C_{73} &= C_{\phi x} + C_y \cdot \Delta z_2^2 + C_z \cdot \Delta y_2^2, \\
 C_{76} &= C_{\phi y} + C_y \cdot \Delta z_2^2 + C_z \cdot \Delta x_2^2, \\
 C_{78} &= C_{\phi z} + C_x \cdot \Delta y_2^2 + C_y \cdot \Delta x_2^2.
 \end{aligned}$$

При наличии нелинейных компонент упруго-демпферных связей, кроме линеаризованных жесткостей, задается зависимость усилия от разности смещения их концов в виде:

$$F = \begin{cases} C(\Delta u - \delta)^\alpha, & \text{при } \Delta u > \delta; \\ 0, & \text{при } \Delta u < \delta. \end{cases} \quad (4)$$

Выполнение зависимости (4) на каждом шаге осуществляется методом последовательных приближений путем переноса невязки в правую часть, что не требует пересчета и триангуляции матрицы разрешающих уравнений. На рис. 5 представлена зависимость усилия при наличии нелинейных компонент упруго-демпферных связей.

В случае линеаризованной связи на нулевой итерации определяется ее деформация $\Delta u_{\text{Л}}^0$, ско-

рость деформации $\Delta \dot{u}_{\text{Л}}^0$ и усилие $\Delta P_{\text{Л}}^0 = C \Delta u_{\text{Л}}^0 + d_{\text{Л}} \Delta \dot{u}_{\text{Л}}^0$ в линеаризованной связи, а также усилие в нелинейной связи при той же деформации $\Delta P_{\text{Н}}^0 = C_{\text{Н}} (\Delta u_{\text{Л}} - \delta)^\alpha + d_{\text{Н}} (\Delta u - \delta)^\alpha \Delta \dot{u}_{\text{Л}}^0$.

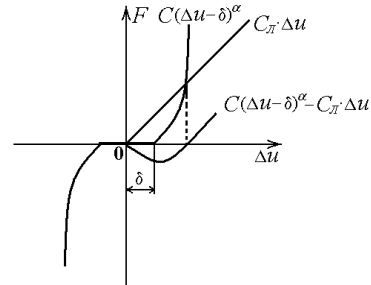


Рис. 5 – Зависимость усилия для нелинейных компонент связей

Разность усилий $F^0 = \Delta P_{\text{Л}}^0 - \Delta P_{\text{Н}}^0$ прикладываемая к упругой связи, выполняем подшаг по времени методом Ньюмарка или Вилсона [4] и определяем перемещение и скорость деформации первой итерации $\Delta u_{\text{Л}}^1$ (рис. 6), а также новую разность усилий $F^1 = P_{\text{Л}}^1 - P_{\text{Н}}^1$. Прикладывая ее к упругой связи и выполняя следующий подшаг, найдем приближенное решение для нелинейной связи.

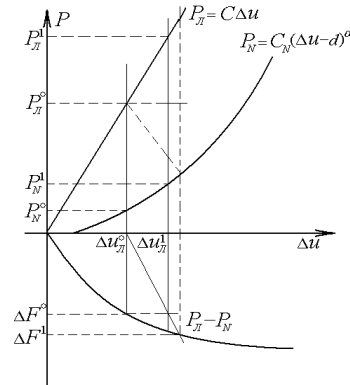


Рис. 6 – Схема определения решения для нелинейной связи

Любая связь между узлами, не являющимися соседними (жесткая или упруго-демпферная), порождает в структуре симметричной трехдиагональной матрицы масс и жесткостей вертикальный столбец между узлами (рис. 7). В случае связи узла с несколькими предыдущими узлами столбец будет общим, поэтому связи следует задавать в порядке возрастания номеров узлов.

При вычислениях в памяти компьютера в одном массиве хранятся клетки диагональной матрицы, а в другом – клетки столбцов, что экономично с точки зрения объема занимаемой памяти и времени вычислений.

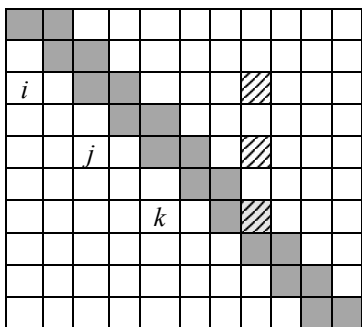


Рис. 7 – Структура симметричной матрицы (узел k связан с узлами i и j)

Уравнения движения деформируемой конструкции в матричной форме записываются в виде:

$$M\ddot{\vec{u}}(t) + C\dot{\vec{u}}(t) + K\vec{u}(t) = \vec{R}(t), \quad (5)$$

где M , C , K – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно, \vec{R} – внешняя нагрузка.

В матрицу демпфирования вносят вклад демпферы связей, а также внутреннее и внешнее трение, которое определяется как линейная комбинация матрицы масс и жесткости:

$$C = mju \cdot M + dekr \cdot K,$$

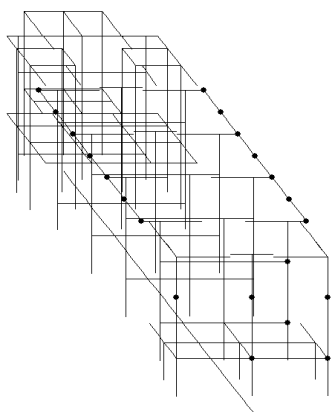


Рис. 8 – Расчетная схема фундамента (253 стержня)

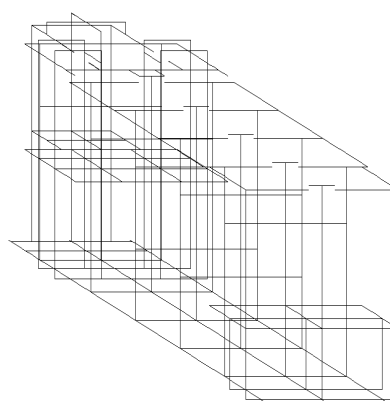


Рис. 9 – Расчетная схема фундамента (378 стержней)

где mju и $dekr$ – коэффициенты внешнего и внутреннего трения.

Интегрирование дифференциального уравнения (5) осуществляется неявными методами Ньюмарка или Вилсона [4].

Созданный графический интерфейс позволяет визуализировать геометрию конструкции, ее дискретизацию на конечные элементы, деформирование в различные моменты времени, графики изменения во времени перемещений, скоростей и ускорений отдельных точек конструкции, а также усилий в упругих связях.

Для оценки прочности системы турбоагрегат-фундамент-основание в упругих связях определяются напряжения, фиксируются их максимальные и минимальные значения, а также время их возникновения.

Выполнен анализ колебаний системы турбоагрегат-фундамент турбины К-1100-23,5 для синтезированной и реальной сейсмограмм [1]. Исследования выполнялись для двух разработанных расчетных моделей фундамента различного уровня сложности (рис. 8, 9), по которым получены результаты, удовлетворительно совпадающие между собой.

Выводы

Разработано методическое и программное обеспечение для расчета системы турбоагрегат-фундамент-основание на сейсмические воздействия в трех взаимноперпендикулярных направлениях. Интегрирование уравнений движения во времени осуществляется устойчивыми методами Ньюмарка или Вилсона в подвижной системе координат, связанной с основанием. Расчетная модель представляется набором стержней, сосредоточенных масс, моментов инерции и упруго-демпферных связей.

Из проведенных исследований следует, что формирование расчетной модели, содержащей большое количество элементов, и определение ее

параметров (жесткость Винклерова основания, коэффициенты демпфирования в системе, жесткость масляного слоя подшипников и упругих связей и т.п.) имеет важное значение при оценке сейсмостойкости [5] и прочности основных узлов системы.

Список литературы

- 1 РТМ 108.020.37-81. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии. – Введ. 04.06.81. – Ленинград : НПО ЦКТИ, 1981. – 39 с.

- 2 Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С. П. Тимошенко. – М. : Физматгиз, 1959. – 440 с.
- 3 Воробьев, Ю. С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю. С. Воробьев // Киев: Наук. думка, 1988. – 222 с.
- 4 Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вильсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.
- 5 Кириллов, А. П. Сейсмостойкость атомных электростанций [Текст] / А. П. Кириллов, Ю. К. Амбришвили. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 The equipment of nuclear power plants. Calculation of the strength of the seismic impact: RTM 108.020.37-81.-vved. 04.06.81. / L.: NPO TsKTI, 1981.-39
- 2 Timoshenko, S.P. Oscillations in engineering. M.: Fizmatgiz, 1959. – 440
- 3 Vorobev, Yu. S. Oscillations turbomachinery blading. Kiev: Naukova dumka, 1988. – 222
- 4 Bate, K., Wilson E. Numerical methods of analysis and finite element method. M.: Stroyizdat, 1982. – 448
- 5 Kirillov, A. P. and Ambriashvili, Yu. K. Seismic resistance of nuclear power plants. M.: Energoatomizdat.– 1985, 184

Сведения об авторах (About authors)

Гонтаровский Павел Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела вибрационных и термостойкостных исследований, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Gontarovskiy Pavel Petrovich – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Senior Staff Scientist of department of vibration and termostrength researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Гармаш Наталия Григорьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, старший научный сотрудник отдела вибрационных и термостойкостных исследований, Харьков, Украина; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0002-4890-8152.

Garmash Nataliya Grigor'evna – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Senior Staff Scientist of department of vibration and termostrength researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Шульженко Николай Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, заведующий отделом вибрационных и термостойкостных исследований, Харьков, Украина; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua

Shulzhenko Nikolay Grigor'evich – Doctor of Technical Science, Professor, head of a department of vibration and termostrength researches, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Пожадуїста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гонтаровський, П. П. Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях [Текст] / П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, Н. Г. Шульженко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 153–160. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.

Please cite this article as:

Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Shulzhenko, N. (2016), “Methodology of calculation of the dynamics of the system turbine-foundation-base power units under seismic actions”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 153–160, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гонтаровський, П. П. Методика розрахунку динаміки системи турбоагрегат-фундамент-основа енергоблоків при сейсмічних діях [Текст] / П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, М. Г. Шульженко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 153–160. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.

АНОТАЦІЯ Представлені основні особливості методичного забезпечення, розробленого на основі методу скінченних елементів для розрахунку динаміки системи турбоагрегат-фундамент-основа при сейсмічних впливах. Елементи розрахункової схеми моделюються довільно орієнтованими стержнями і зосередженими масами з моментами інерції, які з'єднуються абсолютно жорстко або за допомогою пружно-демпферних зв'язків. У стержневих елементах з розподіленими параметрами враховуються всі види деформацій, які мають місце при коливаннях. Сейсмічне навантаження моделюється змінними інерційними силами, отриманими з експериментальних акселерограм землетрусів. При дослідженні динамічних процесів в системі турбоагрегат-фундамент-основа при сейсмічних впливах використовуються розрахункові моделі різного рівня складності.

Ключові слова: турбоагрегат, сейсмічна дія, коливання, стержневий скінченний елемент, пружно-демпферний зв'язок.

Поступила (received) 15.01.2016