

УДК 699.841

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

EDN: ANMCTL

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС

В.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора,
ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 5, Москва, 107140, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В настоящей статье представлены материалы по анализу сейсмостойкости строительных конструкций различных зданий, включая строительные конструкции АЭС. Данные материалы являются обобщением результатов многолетней работы автора в области динамики строительных конструкций.

Материалы и методы. Материалы содержат определение концепции динамики, расчетное моделирование динамических процессов, основные соотношения методов динамического анализа, описание воздействий (акселерограмм), понятие резонанса, применение вибродиагностики в динамическом анализе, оценку прочности и устойчивости зданий, описание применяемых программных комплексов. При этом следует отметить, что часть представленных материалов статьи имеет научную новизну.

1. Метод неклассической модальной суперпозиции определения отклика конструкции при динамическом воздействии и поэтажных спектров ответа был представлен автором на международной конференции по ABAQUS (SIMULIA) в Барселоне в 2011 г. Суть метода в достоверном учете «грунтового» демпфера, моделирующего отток энергии в грунт при колебаниях здания, что обеспечивает получение достоверных результатов.
2. Фундаментальное решение учета податливости фундаментной плиты при сейсмических воздействиях.
3. Метод учета податливости фундаментной плиты обеспечивает реалистическое определение отклика конструкции при сейсмическом воздействии, а также позволяет определять поэтажные спектры ответа при падении самолета для зданий, воздействие на оборудование которых передается через фундаментную плиту.
4. Метод учета динамических характеристик фрагментов (пол/стена) зданий, полученных по результатам вибродиагностики, для верификации расчетных моделей, а также для анализа прочности и поэтажных спектров ответа.
5. В приложении представлена разработанная автором, реалистическая тестовая задача по сейсмическому анализу.

Результаты. Статья является обобщением результатов многолетней работы автора в области строительных конструкций АЭС. Материалы содержат научную новизну и имеют широкое практическое применение при разработке проектов АЭС как в РФ, так и за рубежом.

Выводы. Материалы, представленные в статье, могут быть использованы при подготовке курса лекций «Введение в динамику», в том числе, возможно, и для стран-новичков, которые находятся в начале пути строительства объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

Ключевые слова: классический и неклассический методы модальной суперпозиции, поэтажные спектры ответа, вибродиагностика, взаимодействие сооружения с грунтовым основанием, эквивалентные жесткости и затухания

Для цитирования: Коротков В.А. Анализ динамических методов расчета строительных конструкций АЭС. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):7–17. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.04.2023

Поступила после рецензирования 15.05.2023

Принята к публикации 30.05.2023

ANALYSIS OF DYNAMIC METHODS FOR CALCULATING NPP BUILDING STRUCTURES

V.A. KOROTKOV, Cand. Sci. (Engineering)

Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Malaya Krasnoselskaya str., 2/8, bld. 5, Moscow, 107140, Russian Federation

Abstract

Introduction. The present article concerns the seismic performance of various building structures, including NPP objects. The provided materials generalize the results of the author's longstanding work connected with the dynamics of building structures.

Aim. To analyze the seismic performance of various building structures, including NPP objects, and represent the author's material on the dynamics of building structures.

Materials and methods. The presented materials include a definition of the dynamics concept, computational modeling of dynamic processes, main correlations of dynamic analysis methods, and a description of impacts (accelerograms). In addition, the concepts of resonance and vibration diagnostics in the dynamic analysis, assessment of the building strength and stability, as well as the description of applied software systems are provided. Some of the presented materials are characterized by the scientific novelty. The following methods were used in the study. The method of nonclassical modal superposition for determining the response of a structure under dynamic impacts together with floor response spectra were presented by the author at the ABAQUS (SIMULIA) International Conference in Barcelona, 2011. The essence of the method consists in the reliable account for a "soil" damper, modeling the energy outflow into the soil during the vibrations of a building, which ensures reliable results. A fundamental solution for accounting the ductility of the foundation slab under seismic impacts was applied. This method ensures the seismic response of the structure to be reliably determined, as well as the floor response spectra to be obtained in the conditions of the aircraft crashing for buildings, whose impact on the equipment is transmitted through the foundation slab. Additionally, the method of accounting the dynamic characteristics of building fragments (floor/wall), obtained using the vibration diagnostic results, was applied to verify computational models, as well as to analyze the strength and floor response spectra. The appendix includes the realistic test problem of the seismic analysis, developed by the author.

Results. The provided materials generalize the results of the author's longstanding work in the field of NPP building structures. In addition to the scientific novelty, the materials are widely applied in the development of NPP designs both in the Russian Federation and abroad.

Conclusion. The materials, presented in the article, can be used to prepare the "Introduction to Dynamics" lecture course, including, for newcomer countries that are at the beginning of the nuclear facility (NF) construction.

Keywords: classical and nonclassical modal superposition methods, floor response spectra, vibration diagnostics, soil base – structure interaction, equivalent stiffness and attenuation

For citation: Korotkov V.A. Analysis of dynamic methods for calculating NPP building structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):7–17. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

Author contribution statement

The author takes responsibility of all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 13.04.2023

Revised 15.05.2023

Accepted 30.05.2023

Предисловие

После аварии на АЭС Фукусима в Японии в 2011 году и землетрясения магнитудой 7,8 балла в Турции в 2023 году вопросам обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций, зданий и сооружений АЭС необходимо уделять повышенное внимание.

В представленных ниже материалах использовались инициированные автором лекции по динамике с применением программы ABAQUS, которые проводились в Швеции в 2005 г., материалы по аттестации ABAQUS 2018 в Ростехнадзоре в 2021 г., а также материалы по защите проектов АЭС в Индии в 2019 г.

Список определений

1. *Сейсмостойкость* – это способность конструкций сохранять предусмотренные проектом функции после сейсмического воздействия.

2. *Сейсмическое воздействие* – это особый вид нагрузки, возникающей при движении грунта из-за природных или техногенных факторов, например землетрясение, взрывы, движение транспорта.

Сейсмическое воздействие может описываться акселерограммой, велосиграммой, сейсмограммой, а также спектром ответа.

3. *Спектр ответа* – это зависимость максимальных ответных ускорений (скоростей или перемещений) линейного неконсервативного осциллятора от частоты при фиксированном значении затухания и при воздействии, заданном в виде акселерограммы.

Спектр ответа может определяться как на грунте для расчетов нагрузок на строительные конструкции, так и в местах расположения оборудования для расчетов нагрузок на оборудование.

Когда решаемая задача является динамической?

1. Решаемая задача является динамической, когда инерционные силы имеют важное значение и быстро изменяются во времени.
2. Инерционные силы пропорциональны ускорениям масс в конструкциях.
3. Если нагрузка меняется «достаточно медленно» и инерционные силы «малы», отклик можно рассматривать как квазистатический.
4. Иногда мы имеем большие инерционные силы, но можем выполнять статический анализ, так как нагрузка медленно меняется со временем, например, центробежная нагрузка.
5. Иногда задача о динамических колебаниях может эффективно решаться на основе модального анализа, когда для этого требуется учитывать небольшое количество мод колебаний.

Расчетное моделирование динамических процессов

Расчетное моделирование динамических процессов включает в себя разработку методик динамического анализа и разработку расчетных схем. Последующее выполнение динамических расчетов производится в соответствии с российскими и международными нормами сейсмостойкого проектирования.

Для выполнения расчетов зданий АЭС необходимо разработать конечно-элементные расчетные схемы, обеспечивающие геометрически подобное моделирование систем «сооружение + грунтовое основание». Для этого применяются следующие типы конечных элементов:

- треугольные и четырехугольные элементы пластинки/оболочки с учетом деформаций поперечного сдвига для моделирования конструктивных элементов зданий (пол, стена);
- балочные элементы, учитывающие деформации поперечного сдвига для моделирования колонн и ригелей;
- восьмиузловые элементы сплошной среды для моделирования грунтового массива в прямом методе анализа;
- элементы пружин и демпферов для моделирования жесткостных и диссипативных свойств грунта в методе импедансов;
- сосредоточенные массы (обобщенные) для моделирования различных единиц оборудования.

Система уравнений движения при сейсмических колебаниях «сооружения + грунтовое основание»

$$[K]U + [C]\dot{U} + [M]\ddot{U} = -[M]\ddot{U}_0, \quad (1)$$

- где $[K]$ – матрица жесткости системы «сооружение + грунтовое основание»;
 $[C]$ – матрица демпфирования системы «сооружение + грунтовое основание»;
 $[M]$ – матрица массы сооружения;
 U, \dot{U}, \ddot{U} – векторы относительных перемещений, скоростей и ускорений;
 \ddot{U}_0 – исходная акселерограмма.

Обоснование сейсмостойкости строительных конструкций АЭС необходимо проводить в соответствии с [1]. Для этого применяются представленные ниже методы.

Классический метод модальной суперпозиции (основан на разложении системы уравнений движения (1) по формам колебаний)

$$\ddot{q}_\beta + 2\xi_\beta \omega_\beta \dot{q}_\beta + \omega_\beta^2 q_\beta = (f_t)_\beta, \quad (2)$$

где $(f_t)_\beta$ – обобщенная сила.

В (2) учтены следующие условия ортогональности:

$$\Phi_\alpha^T K \Phi_\beta = \begin{cases} 0, & \alpha \neq \beta \\ \omega_\beta^2, & \alpha = \beta \end{cases}, \quad (3)$$

$$\Phi_\alpha^T M \Phi_\beta = \begin{cases} 0, & \alpha \neq \beta \\ 1, & \alpha = \beta \end{cases}, \quad (4)$$

$$\Phi_\alpha^T C \Phi_\beta = \begin{cases} 0, & \alpha \neq \beta \\ 2\xi_\beta \omega_\beta^2, & \alpha = \beta \end{cases}. \quad (5)$$

Неклассический метод модальной суперпозиции (основан на разложении системы уравнений движения (1) по формам колебаний)

$$\ddot{q}_\beta + C_{\beta\alpha} \dot{q}_\alpha + \omega_\beta^2 q_\beta = (f_t)_\beta. \quad (6)$$

Матрица затухания $C_{\beta\alpha}$ полностью заполненная. Данный метод рекомендуется применять как более точный по сравнению с классическим методом модальной суперпозиции, так как он позволяет достоверно учитывать «грунтовый» демпфер, моделирующий отток энергии в грунт при колебаниях здания.

В уравнениях (2)–(6) индексы α и β меняются от 1 до M , где M – число учитываемых форм колебаний.

Метод линейно-спектральной теории (основан на разложении системы уравнений движения (1) по формам колебаний)

- воздействие задается в виде спектра отклика;
- по данному спектру вычисляются сейсмические нагрузки для каждого тона колебаний;
- вычисляется суммарный сейсмический отклик, суммируя модальные отклики по специальным формулам;
- величины нагрузок зависят от тонов колебаний, но затем нагрузки рассматриваются как статические, поэтому метод является квазистатическим;
- преимущество метода состоит в прямом учете исходного целевого спектра в качестве исходного воздействия.

Методы прямого интегрирования (основаны на прямом пошаговом интегрировании уравнений движения (1) по неявной или явной схеме)

- Неявные схемы интегрирования преобразуют систему (1) в систему алгебраических уравнений, и на каждом шаге требуется выполнять обращение матрицы этой системы.

– Метод является безусловно устойчивым для любого шага интегрирования.
– Неявная схема интегрирования, реализованная в ПО ABAQUS, позволяет производить расчеты как с постоянным, так и с переменным шагом интегрирования по времени. В расчетах с переменным шагом интегрирования применяется оператор Гильберта, Хьюза, Тейлора, где начальный шаг интегрирования может вычисляться автоматически. При этом точность расчета зависит от заданного специальным образом остаточного члена, полученного на полушаге интегрирования. Учет переменного шага интегрирования по времени рекомендуется применять в расчетах при падении самолета и воздействии ВУВ, так как это существенно повышает эффективность расчетов, а сейсмические расчеты рекомендуется выполнять с постоянным шагом интегрирования.

– Явные схемы интегрирования. В явных схемах интегрирования перемещения, скорости и ускорения системы на каждом шаге интегрирования явно выражаются через их значения на предыдущем шаге. В явных схемах интегрирования обеспечивается их условная сходимость. Они сходятся только при шаге интегрирования, меньше некоторого критического значения (очень маленькая величина), поэтому данные схемы интегрирования могут быть неэффективны.

Достоинство методов прямого интегрирования заключается в возможности решения нелинейных задач.

В линейном анализе наиболее достоверные результаты обеспечивает неклассический метод модальной суперпозиции.

Сейсмические воздействия

При проектировании АЭС учитываются два уровня сейсмического воздействия:

- ПЗ (SL1) – наиболее сильное землетрясение, которое может произойти за срок эксплуатации АЭС;
- МРЗ (SL2) – максимально возможное землетрясение на данной площадке;
- ЗЗ – запроектное землетрясение интенсивности, превышающей уровни, установленные для целей проекта, в соответствии с [2] ЗЗ определяется для анализа запаса по сейсмостойкости.

Длительность землетрясений может достигать более 30 с – землетрясения в дальней зоне, менее 10 с – землетрясения в ближней зоне. Землетрясение в ближней зоне имеет более высокую интенсивность в вертикальном направлении, а землетрясение в дальней зоне – в горизонтальном направлении.

Резонанс

При сейсмических воздействиях возможны резонансные эффекты в зданиях АЭС. Необходимым условием возникновения резонанса является совпадение частоты собственных колебаний здания с частотой вынужденных колебаний акселерограммы. Кроме того, для раскачки колебаний необходимо порядка 20 циклов нагружения по данному тону. Вероятность возникновения резонанса наибольшая при землетрясениях в дальней зоне.

Методы определения поэтажных спектров ответа

Наиболее применяемым методом определения поэтажных спектров ответа является расчет с помощью интеграла Дюамеля. Однако более эффективным является применение явной схемы интегрирования.

Альтернативно поэтажные спектры ответа можно получить с помощью метода линейно-спектральной теории. Для этого в рассматриваемой конструкции необходимо задать неконсервативный осциллятор в месте расположения оборудования, а далее вычисляется максимальное ответное ускорение для различных значений частоты осциллятора и при воздействии на конструкцию, заданном в виде исходного спектра.

Применение вибродиагностики для решения динамических задач

Вибродиагностика может применяться как для новых энергоблоков, так и для эксплуатируемых, где необходимо учитывать факторы старения. По результатам вибродиагностики экспериментально определяются следующие динамические характеристики зданий и их фрагментов: частоты и формы собственных колебаний, модули деформации, логарифмические декременты колебаний.

Далее полученные динамические характеристики используются для верификации расчетных моделей и для последующего выполнения расчетов НДС, прочности строительных конструкций, а также для расчетов нагрузок на оборудование. При этом могут использоваться любые из перечисленных выше методов динамического анализа.

Определение прочности и устойчивости зданий

Определение прочности конструктивных элементов и устойчивости зданий производится для расчетного сочетания усилий нормальной эксплуатации, проектной аварии и сейсмического воздействия. Для оценки прочности конструктивных элементов производится сравнение рассчитанных напряжений и деформаций с предельно допустимыми значениями.

Задача устойчивости (недопустимость опрокидывания здания при динамических воздействиях) состоит в оценке опрокидывающего и восстанавливающего моментов с учетом взаимодействия сооружения и грунта.

Программы для ЭВМ, применяемые в динамическом анализе

При выполнении динамических расчетов зданий АЭС рекомендуется применять следующие программы для ЭВМ: ABAQUS (США), ANSYS (США), NASTRAN (США), SASSI (США), SCAD (Украина). Данные программы позволяют достоверно выполнить моделирование зданий АЭС с учетом взаимодействия «сооружения + грунтовое основание», кроме того, эти программы прошли аттестацию в Ростехнадзоре РФ.

Заключение

Автор не возражает прочитать лекции «Введение в динамику» на основе представленного материала для стран-новичков, которые находятся в начале пути строительства ОИАЭ.

Расчет схематизированной трехуровневой этажерки при сейсмическом воздействии

Рассматривается установленная на реальном грунте трехуровневая конструкция, состоящая из абсолютно жесткой фундаментной плиты толщиной 0,5 м, на которую опираются шесть колонн. Колонны служат опорами перекрытий на отметках 5, 10 и 15 м, имеющих толщину 0,3 м. Модель с указанием размеров сечений колонн и ригелей, а также точек вывода спектров отклика показана на рис. 1. Центр координат находится в точке пересечения диагоналей фундаментной плиты.

Характеристики бетона: плотность – 2500 кг/м³, модуль Юнга – $3,1 \times 10^{10}$ Па, масса модели – 262,3 т, затухание в материале – 4 %.

Характеристики грунта: плотность – 2000 кг/м³, скорость поперечных волн – 350 м/с, коэффициент Пуассона – 0,47, гистерезисное затухание – 2 %.

Грунт моделировался шестью пружинами и шестью демпферами с эквивалентными жесткостями и затуханиями из ASCE 4-16 [3], присоединенными в геометрическом центре фундаментной плиты. В табл. 1 представлены соответствующие характеристики грунта для штампа с размерами $L = 8$ м, $B = 4$ м.

Как видно из табл. 1, происходит существенный отток энергии в грунт при колебаниях системы, особенно высокое затухание реализуется при колебаниях в вертикальном направлении (54 %).

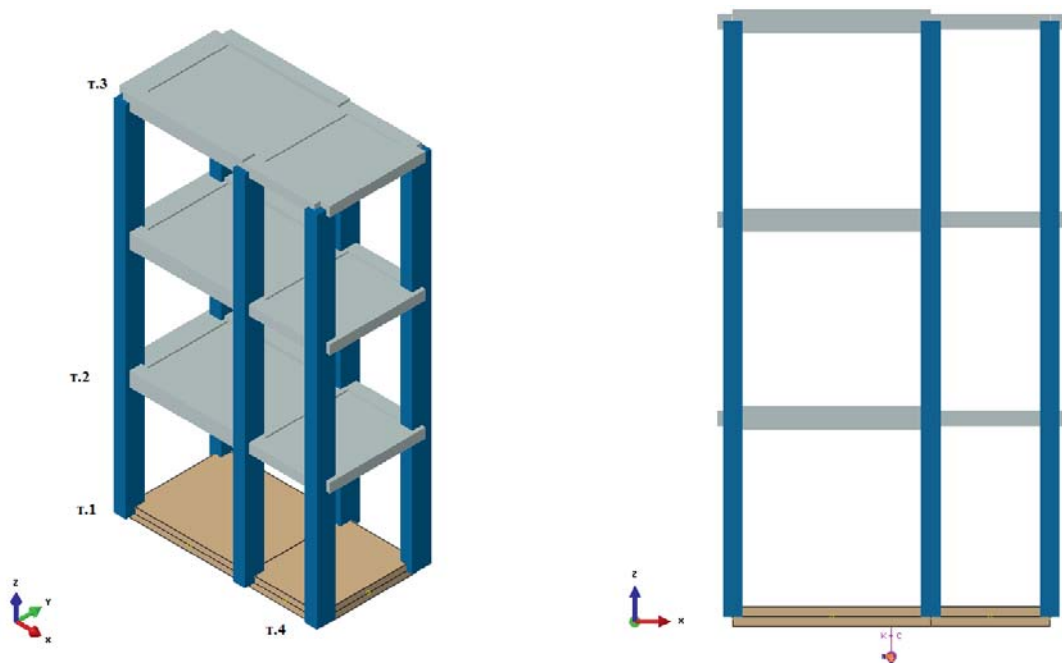


Рис. 1. Общий вид модели
Fig. 1. Model overview

Таблица 1

Эквивалентные жесткости и затухания для штампа

Table 1

Stamp equivalent stiffnesses and attenuations

Эквивалентная жесткость	Эквивалентное затухание	Относительное затухание
$K_x = 3,9 \cdot 10^6$ кН/м	$C_x = 2,0 \cdot 10^4$ кН·с/м	30 %
$K_y = 4,5 \cdot 10^6$ кН/м	$C_y = 2,4 \cdot 10^4$ кН·с/м	33 %
$K_z = 5,8 \cdot 10^6$ кН/м	$C_z = 4,5 \cdot 10^4$ кН·с/м	54 %
$K_{\text{фх}} = 5,2 \cdot 10^6$ кН·м	$C_{\text{фх}} = 3,2 \cdot 10^5$ кН·с·м	43 %
$K_{\text{фy}} = 1,4 \cdot 10^7$ кН·м	$C_{\text{фy}} = 5,3 \cdot 10^5$ кН·с·м	42 %
$K_{\text{фz}} = 5,2 \cdot 10^7$ кН·м	$C_{\text{фz}} = 5,3 \cdot 10^4$ кН·с·м	6,7 %

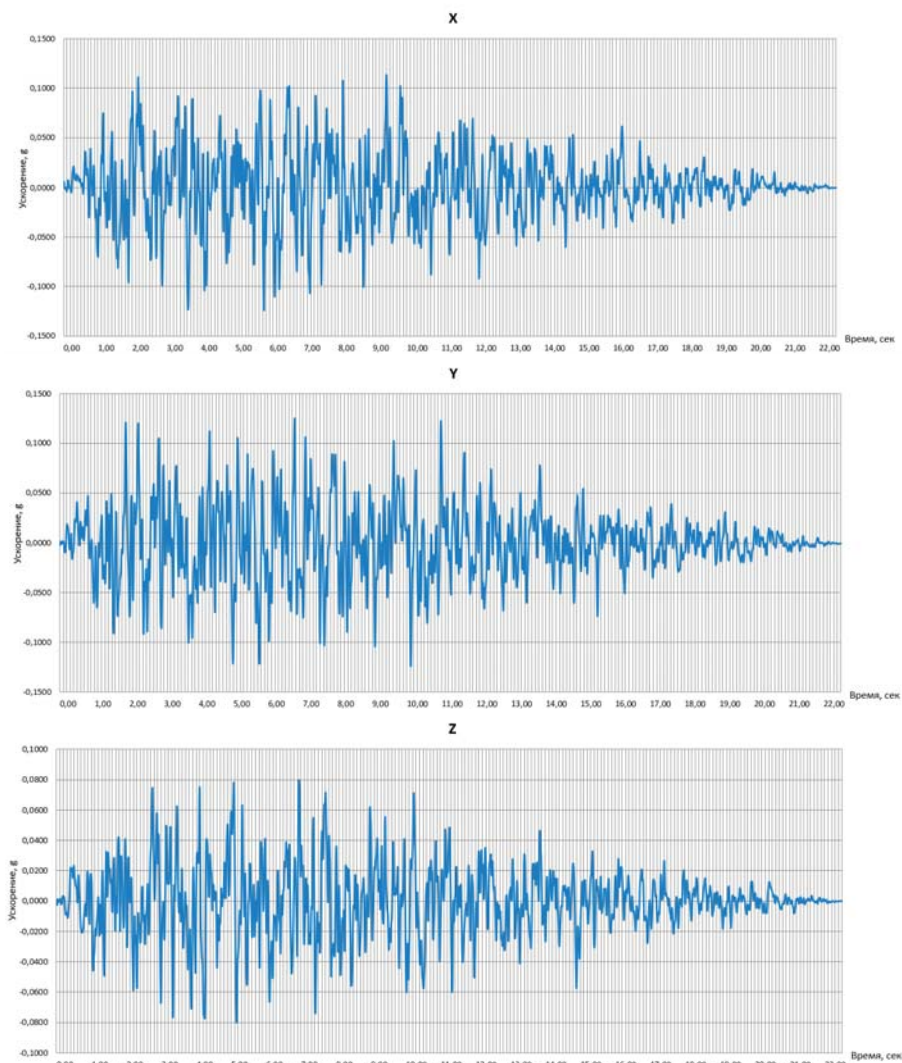


Рис. 2. Исходная трехкомпонентная акселерограмма
Fig. 2. Original three-component accelerogram

Таблица 2

Сравнительный анализ максимальных ускорений

Table 2

Comparative analysis of maximum accelerations

Номер точки	ABAQUS 2018	NX NASTRAN VERSION 11.0.2 2017	Погрешность, %
1	$a_x = -0,1261$ $\dot{a}_x = +0,1131$ $\ddot{a}_y = -0,1244$ $\dot{a}_y = +0,1257$ $a_z = -0,09235$ $\dot{a}_z = +0,08966$	$a_x = -0,12712$ $\dot{a}_x = +0,11338$ $\ddot{a}_y = -0,12441$ $\dot{a}_y = +0,12553$ $a_z = -0,091523$ $\dot{a}_z = +0,090225$	-0,8 -0,2 0,0 0,1 0,9 -0,6
2	$a_x = -0,1885$ $\dot{a}_x = +0,2011$ $\ddot{a}_y = -0,1985$ $\dot{a}_y = +0,1872$ $a_z = -0,09835$ $\dot{a}_z = +0,09440$	$a_x = -0,18743$ $\dot{a}_x = +0,1996$ $\ddot{a}_y = -0,20015$ $\dot{a}_y = +0,18898$ $a_z = -0,098267$ $\dot{a}_z = +0,09505$	0,6 0,8 -0,8 -0,9 0,1 -0,7
3	$a_x = -0,3556$ $\dot{a}_x = +0,3148$ $\ddot{a}_y = -0,2847$ $\dot{a}_y = +0,2310$ $\ddot{a}_z = -0,1097$ $\dot{a}_z = +0,1020$	$a_x = -0,35419$ $\dot{a}_x = +0,31208$ $\ddot{a}_y = -0,28802$ $\dot{a}_y = +0,23128$ $\ddot{a}_z = -0,10955$ $\dot{a}_z = +0,10297$	0,4 0,9 -1,2 -0,1 0,1 -0,9
4	$a_x = -0,1261$ $\dot{a}_x = +0,1131$ $\ddot{a}_y = -0,1254$ $\dot{a}_y = +0,1262$ $\ddot{a}_z = -0,1027$ $\dot{a}_z = +0,1089$	$a_x = -0,12712$ $\dot{a}_x = +0,11338$ $\ddot{a}_y = -0,1254$ $\dot{a}_y = +0,126$ $\ddot{a}_z = -0,10173$ $\dot{a}_z = +0,10833$	-0,8 -0,2 0,0 0,2 1,0 0,5

Исходное сейсмическое воздействие, представляющее собой трехкомпонентную акселерограмму, показано на рис. 2.

Результаты расчетов максимальных ускорений в точках 1, 2, 3, 4 (рис. 1), выполненных по программам ABAQUS, NASTRAN, представлены в табл. 2.

Максимальная погрешность расчетов, выполненных неклассическим методом модальной суперпозиции, составила 1,2 %.

Список литературы

1. НП-041-22. Требования по безопасности к строительным конструкциям зданий и сооружений атомных станций [интернет]. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ»; 2023. Режим доступа: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_041_22/
2. IAEA Safety Standards Series. Seismic Design for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-67 [internet]. Vienna: IAEA; 2021. Available at: <https://www.iaea.org/publications/14664/seismic-design-for-nuclear-installations>
3. ASCE 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers; 2017.
4. Коротков В.А., Югай Т.З. Сейсмический расчет зданий АЭС с учетом податливости фундаментной плиты. Вестник НИЦ «Строительство». 2021;31(4):89–97. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

References

1. NP-041-22. Safety Requirements to Civil Structures of NPP Buildings and Structures [internet]. Moscow: SECNRS; 2023. Available at: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_041_22/
2. IAEA Safety Standards Series. Seismic Design for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-67 [internet]. Vienna: IAEA; 2021. Available at: <https://www.iaea.org/publications/14664/seismic-design-for-nuclear-installations>
3. ASCE 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers; 2017.
4. Korotkov V.A., Yugai T.Z. Seismic design of NPP structures taking into account foundation slab compliance. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;31(4):89-97. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

Информация об авторе / Information about the author

Владимир Анатольевич Коротков, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

e-mail: korotkov@secnrs.ru

Vladimir A. Korotkov, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Department of Building Structure Reliability, Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

e-mail: korotkov@secnrs.ru