

УДК 624.042.7

Н. В. Никонова**ОСОБЕННОСТИ ЗАДАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ И РАСЧЕТА
НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ**

Дата поступления: 09.06.2016

Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Разработать алгоритм нахождения опасной частоты сейсмического воздействия для сейсмоизолированного сооружения. **Методы:** В работе применены метод динамического расчета сооружений, численное моделирование колебаний на ЭВМ; для достижения поставленной цели использованы записи акселерограмм прошлых землетрясений. **Результаты:** Предложена новая методика поиска опасной частоты сейсмического воздействия для сейсмоизолированной системы. Для задания опасной частоты сейсмического воздействия разработан итерационный алгоритм, основанный на использовании зависимости пиковых ускорений воздействия от его преобладающей частоты и зависимости опасной частоты воздействия от относительного коэффициента трения, который равен отношению фактического коэффициента трения в системе к амплитуде воздействия в долях от ускорения свободного падения. По результатам расчетов одной из таких систем можно сделать вывод, что сгенерированная акселерограмма расчетного воздействия с преобладающей частотой, найденной по предлагаемой методике, опасна для сооружения, и расчет по ней дает результаты в запас прочности сооружения. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволяют генерировать сейсмические воздействия, по которым подбирают параметры сейсмоизоляции и оценивают ее эффективность на ранних стадиях проектирования, а также проектировать типовые конструкции фундаментов.

Нелинейные системы сейсмоизоляции, расчетная акселерограмма, опасная частота воздействия.

Nataliya V. Nikonova, teaching fellow, lovelyntaxa@inbox.ru (Petersburg State Transport University)
SPECIFIC FEATURES OF SETTING IMPACT AND CALCULATION OF NON-LINEAR SEISMIC ISOLATION SYSTEMS

Objective: To develop an algorithm for finding dangerous frequency of seismic impact for seismic-isolated structures. **Methods:** In the work, methods of dynamic structure design and computer-based numerical simulation of vibrations were applied. Accelerograms recording past earthquakes were used to pursue the objective. **Results:** A new method for finding dangerous frequency of seismic impact for seismic-isolated structures was proposed. To set a dangerous frequency of seismic impact, an iteration algorithm was developed, based on the application of dependency of peak accelerations of impact from its dominant frequency and the dependency between dangerous frequency of impact and relative friction coefficient, which equals relation of actual friction coefficient in the system to impact range in fractions of free-falling acceleration. From calculation results of one such system it can be concluded that a generated accelerogram of calculated impact with dominant frequency measured by the suggested method is dangerous for a structure, and calculations based on it provides results for structure's strength reserve. **Practical importance:** Study results allow for generating seismic impact through which seismic isolation parameters can be set, and its efficiency can be evaluated at early design stages, as well as help develop standard foundation designs.

Non-linear seismic isolation systems, calculation accelerogram, dangerous impact frequency.

Действующий нормативный подход к расчету сооружений на сейсмические нагрузки основан на применении линейно-спектральной методики, использование которой невозможно для нелинейных систем сейсмоизоляции, имеющих нелинейную диаграмму деформирования. В таких случаях рекомендуется вести расчет на акселерограммы землетрясений. Здесь сложности возникают с заданием воздействия, так как спектральный состав и амплитуда расчетной акселерограммы заранее неизвестны. СП «Строительство в сейсмических районах» рекомендует вести расчет на акселерограмму, полученную при изысканиях сейсмологами. Однако такая акселерограмма, как правило, появляется только в конце проектирования, в то время как для заказа параметров систем сейсмозащиты требуется оценить их параметры на первых этапах проектирования. Таким образом, возникает потребность в воздействии, расчет на которое являлся бы заведомо консервативным.

Поиск опасной частоты сейсмического воздействия для нелинейных систем сейсмоизоляции – трудная задача, поскольку у таких систем отсутствует резонансная частота, так как их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) многозначны и могут иметь причудливую форму (рис. 1) [1, 2, 10, 12, 13]. При этом рекомендуется строить АЧХ системы и выбирать на ней наиболее опасную точку. Однако в упомянутых работах не сказано, что вид самой АЧХ зависит от амплитуды задаваемого воздействия, что детально описано в [5]. Этот факт еще более усложняет задачу поиска опасной частоты для нелинейных си-

стем сейсмоизоляции, поскольку требуется построение набора АЧХ при различных амплитудах воздействия, причем фактическая амплитуда воздействия заранее неизвестна.

Методика решения задачи

Для корректного решения поставленной задачи предлагается обезразмерить исходное уравнение колебаний для одномассной системы:

$$m\ddot{q} + Q + cq = -m\ddot{y}_0, \quad (1)$$

где m – масса системы; q – смещение; Q – сила нелинейного сопротивления демпфера; c – жесткость; \ddot{y}_0 – акселерограмма задаваемого воздействия.

Предварительно силу нелинейного сопротивления демпфера Q представим в виде суммы сил вязкого и сухого трения [6]:

$$Q = b|\dot{q}|^\alpha \operatorname{sign}(\dot{q}) \cong (\beta|\dot{q}| + F)\operatorname{sign}(\dot{q}),$$

где b и α – характеристики демпфера; β – коэффициент вязкого трения; F – сила сухого трения. Величины указанных параметров связаны между собой выражениями [6]:

$$\beta = \alpha b;$$

$$F = b(1 - \alpha).$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$m\ddot{q} + (\beta|\dot{q}| + F)\operatorname{sign}(\dot{q}) + cq = -m\ddot{y}_0$$

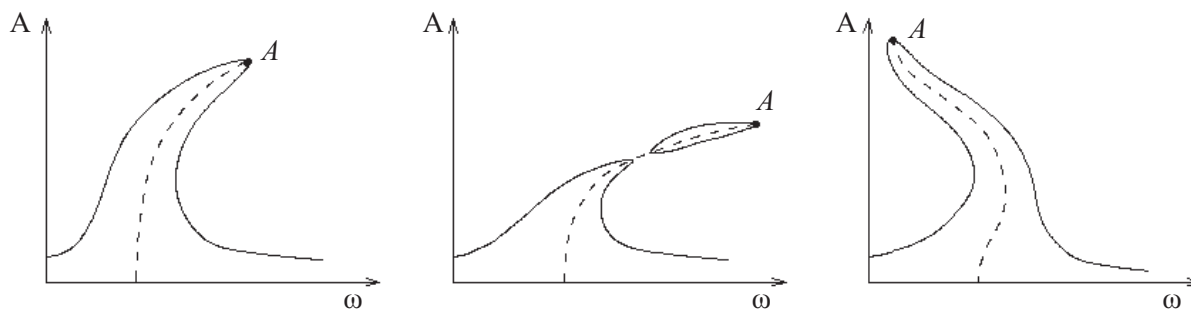


Рис. 1. Возможные виды амплитудно-частотных характеристик нелинейных систем

или – после раскрытия скобок и деления на массу m –

$$\ddot{q} + \frac{\beta}{m}\dot{q} + \frac{F}{m}\text{sign}(\dot{q}) + \frac{c}{m}q = -\ddot{y}_0. \quad (2)$$

С учетом того, что $\frac{\beta}{m} = \gamma k$; $\frac{F}{m} = fg$ и $\frac{c}{m} = k^2$, уравнение (2) можно привести к виду

$$\ddot{q} + \gamma k\dot{q} + fg\text{sign}(\dot{q}) + k^2q = -\ddot{y}_0, \quad (3)$$

где γ – коэффициент упругого сопротивления; k – частота колебаний системы; f – коэффициент сухого трения.

Далее уравнение (3) записывается в безразмерных ускорениях по методике, приведенной в [8, 9]. Для этого переходят к безразмерным смещениям $\xi = \frac{q}{AgT^2}$ и безразмерному времени $\frac{d}{dt} = \frac{d}{d\tau} \cdot \frac{1}{T}$ (в приведенных зависимостях T – период колебаний; A – ускорение расчетного воздействия в долях ускорения свободного падения g). При этом уравнение колебаний одномассной системы приобретает вид

$$\ddot{\xi} + 2\pi\gamma\dot{\xi} + 4\pi^2\xi - f_{\text{отн}} \cdot \text{sign}(\dot{\xi}) = -T^2\ddot{y}_0,$$

где $f_{\text{отн}} = \frac{f}{A}$ – относительный коэффициент сухого трения; $\ddot{y}_0 = \frac{\ddot{y}_0}{Ag}$ – безразмерное ускорение задаваемого воздействия.

Преимуществом предлагаемой формы записи уравнений колебаний является то, что она уже не зависит от амплитуды. В соответствии с безразмерным уравнением можно построить АЧХ землетрясений в виде зависимости безразмерных ускорений или смещений от безразмерной частоты при различных значениях относительного коэффициента трения. По построенным АЧХ можно получить зависимость опасной частоты от относительного коэффициента трения.

Далее принимается в расчет тот факт, что амплитуда воздействия зависит от преобладающей частоты воздействия [4, 11, 14, 15] (рис. 2).

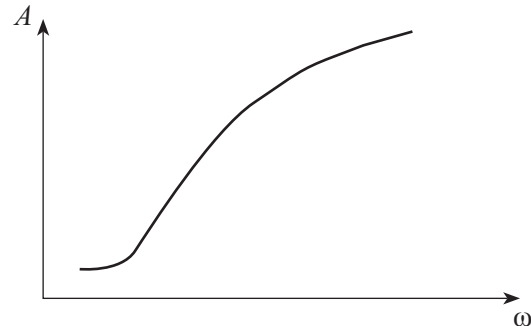


Рис. 2. Амплитуда воздействия зависит от преобладающей частоты воздействия

Задача состоит в том, чтобы подобрать такое воздействие, преобладающая частота которого является резонансной для сооружения.

Далее предлагаемый расчет носит итерационный характер. Порядок расчета:

- 1) для начального приближения принимается в качестве опасной частоты частота линейной системы;
 - 2) по графику $\omega(f_{\text{отн}})$ определяется относительный коэффициент трения;
 - 3) по найденному в п. 2 относительному коэффициенту трения вычисляется амплитуда воздействия;
 - 4) по вычисленной в п. 3 амплитуде воздействия по графику $A(\omega)$ снова определяется частота воздействия.
- Пункты 2–4 необходимо повторять до тех пор, пока найденная в п. 4 опасная частота воздействия не совпадет с опасной частотой воздействия, вычисленной на предыдущем шаге;
- 5) по найденной опасной частоте генерируется воздействие;
 - 6) система рассчитывается на сгенерированное воздействие.

Расчетная схема

В качестве примера был рассмотрен проект моста для олимпийских объектов в г. Сочи [7].

Расчетная схема для построения АЧХ принятой системы сейсмоизоляции приведена на рис. 3. Схема включает 10 элементов. Массы опор приведены к их верху исходя из сохранения их жесткости и периода колебаний.

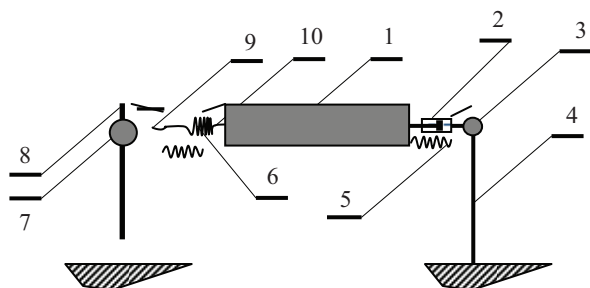


Рис. 3. Расчетная схема для качественного анализа эффективности принятой системы защиты: 1 – пролетное строение; 2 – вязкий демпфер; 3 – точка, в которой сосредоточена масса правой опоры; 4 – стержень, жесткость которого моделирует жесткость правой опоры; 5, 6 – элементы, имеющие вспомогательные жесткости; 7 – стержень, жесткость которого моделирует жесткость левой опоры; 8 – точка, в которой сосредоточена масса левой опоры; 9 – ФПС; 10 – упругий элемент

В расчетную схему дополнительно введены два упругих элемента, объединяющие систему в момент проскальзывания фрикционно-подвижного соединения (ФПС). Жесткость элементов принята малой, они введены для того, чтобы в процессе вычислений матрица жесткости не становилась особенной.

Рассматриваемая система имеет три степени свободы. Ее уравнение движения имеет вид

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}_v\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}_h\tilde{\mathbf{Y}} + \mathbf{C}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0 + \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2, \quad (4)$$

где \mathbf{M} – матрица инерции; \mathbf{B}_v – матрица вязкого демпфирования; \mathbf{B}_h – матрица гистерезисного демпфирования; \mathbf{C} – матрица жесткости; \mathbf{Q}_1 – вектор сил трения в открытых демпферах сухого трения (ДСТ); \mathbf{Q}_2 – вектор сил, вызванных остаточными смещениями в закрытых ДСТ.

Для записи уравнения (4) в безразмерных ускорениях обе его части были разделены на

пиковое ускорение A_g . Тогда в качестве смещения выступает размерная величина, измеряемая в с^2 . Однако, как и в уравнениях с одной степенью свободы, в рассматриваемой системе уравнений фигурирует нормированная акселерограмма и относительный коэффициент трения.

Пример расчета

По результатам расчета построены АЧХ пролетного строения и левой опоры моста (см. рис. 3) при разных амплитудах ускорений воздействия. Разные амплитуды воздействия получены изменением величины A – ускорения в долях от ускорения свободного падения. АЧХ построены для следующих значений: $A = 1$; $A = 2$; $A = 4$. Для построения АЧХ приняты значения относительного коэффициента трения:

$$f_{\text{отн},1} = \frac{f}{A_1} = \frac{F_{\text{тр}}}{m \cdot g \cdot A_1} = \frac{1800}{1136 \cdot 9,81 \cdot 0,1} = 1,615;$$

$$f_{\text{отн},2} = \frac{f}{A_2} = \frac{F_{\text{тр}}}{m \cdot g \cdot A_2} = \frac{1800}{1136 \cdot 9,81 \cdot 0,2} = 0,807;$$

$$f_{\text{отн},3} = \frac{f}{A_3} = \frac{F_{\text{тр}}}{m \cdot g \cdot A_3} = \frac{1800}{1136 \cdot 9,81 \cdot 0,4} = 0,404.$$

Расчеты выполнены в программе Drakon для расчета систем с ДСТ. Программу разработали А. А. Долгая и И. О. Кузнецова под руководством А. М. Уздина [3, 16].

Полученные графики приведены на рис. 4.

В соответствии с полученными АЧХ построен график зависимости опасной частоты воздействия ω от относительного коэффициента трения $f_{\text{отн}}$ (рис. 5).

Далее был реализован описанный алгоритм итерационного расчета. В первом приближении опасная частота воздействия принята по рис. 4а (по АЧХ, построенной при $A = 1$), по ней рассчитан период опасного воздействия. Затем найдена предполагаемая амплитуда воздействия для площадки с заданной сейсмичностью, по этой амплитуде вычислен относительный коэффициент трения. По вы-

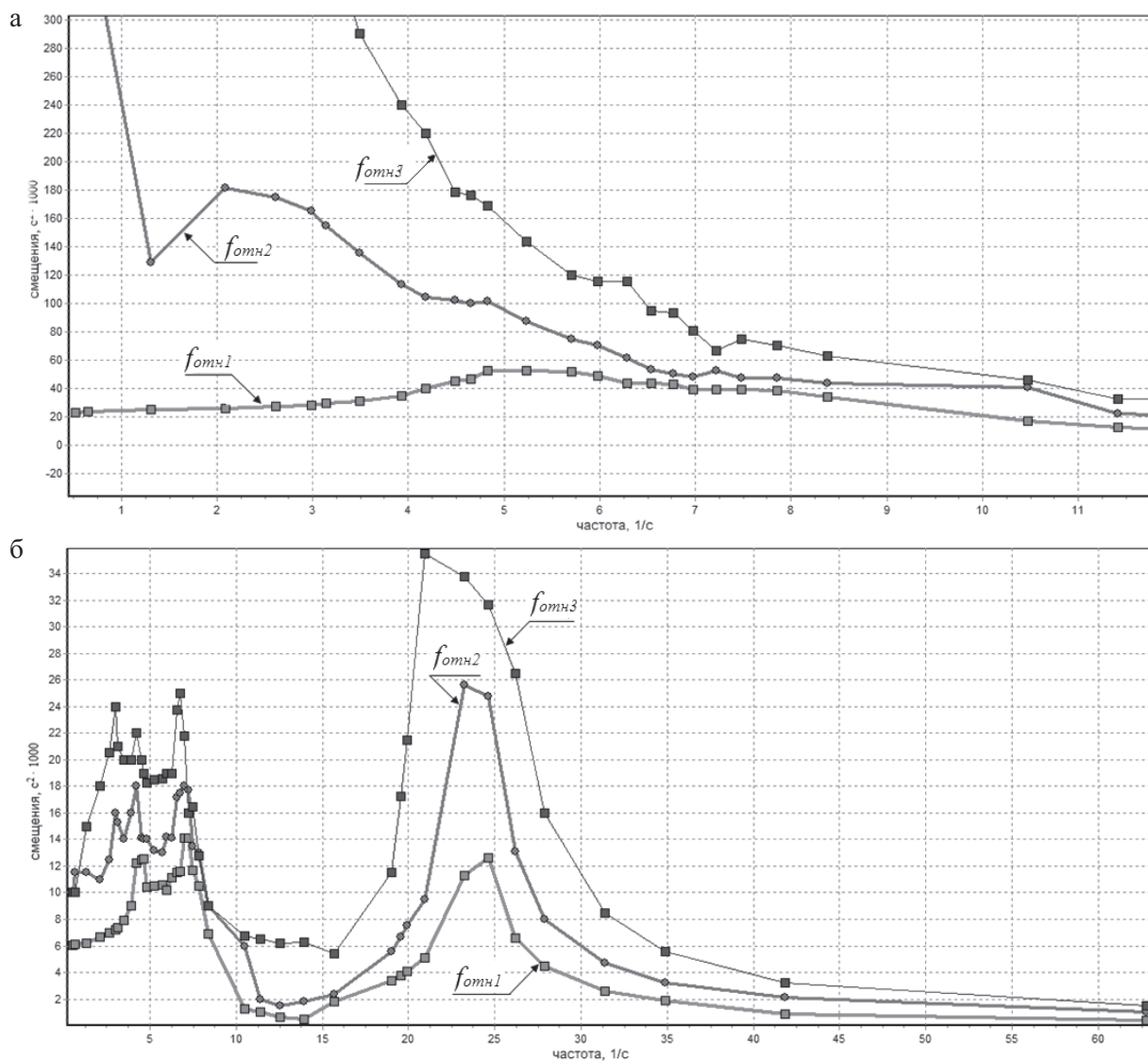


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики колебаний пролетного строения (а) и левой опоры (б)

численному относительному коэффициенту трения при помощи графика (рис. 5) определена опасная частота воздействия. Она не совпала с той частотой, которая была принята за опасную в начале расчета. Чтобы частота, принятая в начале расчета за опасную, совпала с найденной опасной частотой, выполнены еще две итерации.

Далее сгенерировано воздействие с преобладающей найденной опасной частотой.

После этого рассчитаны смещения пролетного строения относительно опор под разными воздействиями: от синтетического воздействия, сгенерированного по указанной мето-

дике (`span5acc`), от записанных акселерограмм разрушительных землетрясений прошлых лет (HOLLISTER2-9, HOLLISTER1-9, Tabas74, Tabas2). Полученные смещения приведены в табл. 1.

Аналогичный расчет выполнен для левой опоры моста. Подбор опасных частот сведен в табл. 2, 3.

Выводы

На рис. 4 показано, что максимальные значения смещений пролетного строения, а также

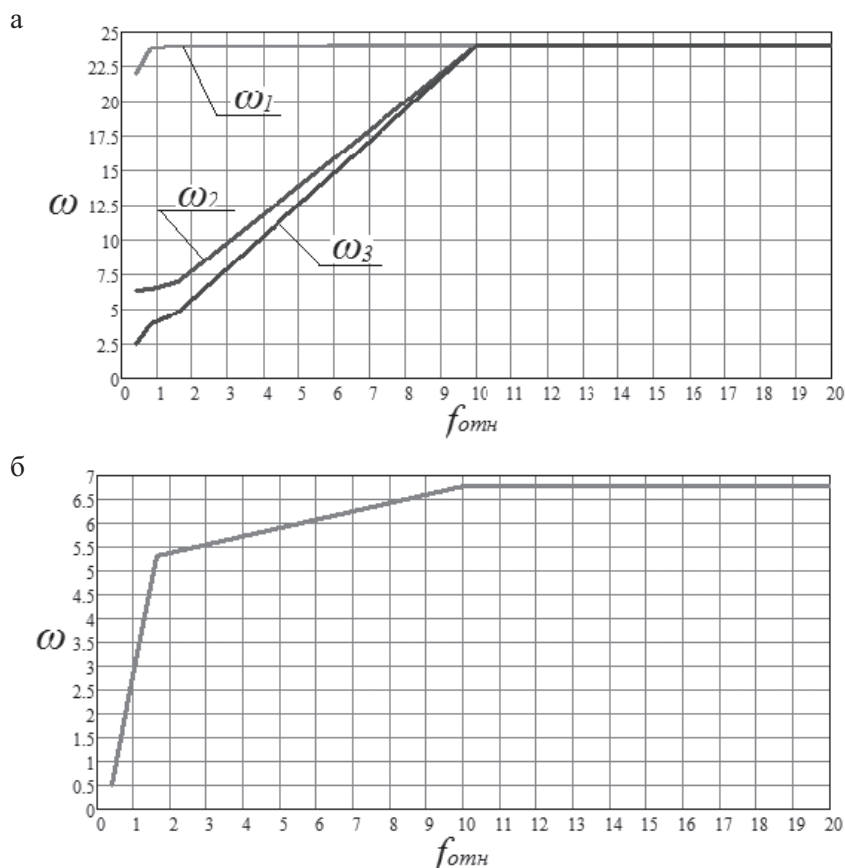


Рис. 5. График зависимости опасной частоты воздействия от относительного коэффициента трения: а) для определения опасной частоты пролетного строения; б) для определения опасных частот левой опоры; ω_1 – опасная частота «правого пика» АЧХ; ω_2 – опасная частота правой вершины «левого пика» АЧХ; ω_3 – опасная частота левой вершины «левого пика» АЧХ

ТАБЛИЦА 1. Смещения пролетного строения относительно опор при различных сейсмических воздействиях

Воздействие	Смещение пролетного строения относительно опор, м
span5acc	0,391
Tabas2	0,315
Tabas74	0,254
HOLLISTER1–9	0,18
HOLLISTER2–9	0,065

смещения и ускорения левой опоры не соответствуют частоте их колебаний в закрытом состоянии. С уменьшением значения $f_{отн}$ опасная (резонансная) для рассматриваемого сооружения частота уменьшается. Воздействие,

сгенерированное для сооружения по частоте, найденной по приведенному алгоритму, является более опасным для рассматриваемого сооружения, чем ряд сильнейших землетрясений прошлых лет.

ТАБЛИЦА 2. Итерационный подбор опасной частоты воздействия для левой опоры моста

№ итерации	Опасная частота воздействия (п. 1)	Опасный период воздействия	Предполагаемая амплитуда воздействия для площадки с сейсмичностью 8, 9, 10	Относительный коэффициент трения	Опасная частота воздействия (п. 3)
«Правый пик»					
1	24	0,262	1,131	0,143	21
2	21	0,3	1,06	0,152	21
Правая вершина «левого пика»					
1	7	0,897	0,538	0,3	6,5
2	6,5	0,966	0,511	0,31	6,5
Левая вершина «левого пика»					
1	4,8	1,308	0,419	0,385	2,5
2	2,5	2,512	0,328	0,492	3
3	3	2,093	0,341	0,474	2,9
4	2,9	2,165	0,338	0,478	2,9

ТАБЛИЦА 3. Смещения пролетного строения относительно опор при различных сейсмических воздействиях

Воздействие	Смещение, м	Ускорение, м/с ²
Tabas2	0,028	15,1
Tabas74	0,03	16,3
HOLLISTER2–9	0,012	4,65
HOLLISTER1–9	0,016	9
Акселерограмма 1, сгенерированная по опасной частоте «правого пика»	0,04	21,8
Акселерограмма 2, сгенерированная по опасной частоте «правого пика»	0,095	45,8
Акселерограмма, сгенерированная по опасной частоте для правой вершины «левого пика»	0,04	15,5
Акселерограмма, сгенерированная по опасной частоте для левой вершины «левого пика»	0,033	12,4

Библиографический список

1. Авидон Г. Э. Анализ работы сейсмоизолирующих фундаментов на опорных элементах с отрицательной жесткостью / Г. Э. Авидон,

Г. В. Давыдова, Ф. А. Доронин и др. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2009. – № 3. – С. 15–21.

2. Вибрации в технике ; под ред. И. И. Блехмана. Т. 2. – М. : Машиностроение, 1979. – 351 с.

3. Гордеев Ю. В. Моделирование устройств специальной сейсмозащиты кусочно-линейными системами / Ю. В. Гордеев, И. О. Кузнецова // Сейсмостойкое строительство. – 1996. – Вып. 4. – С. 37–41.
4. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом / А. А. Долгая // Сейсмостойкое строительство. – 1994. – Вып. 5–6. – С. 56–63.
5. Долгая А. А. Теория диссипативных систем / А. А. Долгая, А. В. Индейкин, А. М. Уздин. – СПб. : ПГУПС, 1999. – 99 с.
6. Дурсенева Н. В. Оценка сейсмостойкости специальных демпфированных систем / Н. В. Дурсенева, А. М. Уздин, М. Ю. Федорова // VI Поляховские чтения : междунар. конф. по механике, посвященная 95-летию со дня рождения С. В. Валландера : избр. труды, СПб., 31.01.2012–03.02.2012. – СПб., 2012. – 2 с.
7. Жгутова Т. В. Сейсмоизоляция железнодорожных мостов в Сочи / Т. В. Жгутова, И. О. Кузнецова, А. М. Уздин, С. А. Шульман // Труды заседания рабочей группы междунар. об-ва по системам сейсмозащиты (ASSISI), 2011. – Сочи, 2011. – С. 119–132.
8. Квасников Б. Н. Аппроксимация уравнений движения некоторых типов кинематических опор / Б. Н. Квасников, С. Н. Коузах // Сейсмостойкое строительство. – 1994. – Вып. 1. – С. 20–25.
9. Квасников Б. Н. Использование асимптотического метода построения «укороченных» уравнений сейсмических колебаний сооружений на кинематических фундаментах / Б. Н. Квасников, С. Н. Коузах // Сейсмостойкое строительство. – 1996. – Вып. 4. – С. 50–55.
10. Коловский М. З. Нелинейная теория виброзащитных систем / М. З. Коловский. – М. : Наука, 1966. – 317 с.
11. Рекомендации по заданию сейсмических воздействий для расчета зданий разной степени ответственности. – СПб. : Петропавловск-Камчатский : КамЦентр, 1996. – 12 с.
12. Уздин А. М. Расчет элементов и оптимизация параметров сейсмоизолирующих фундаментов / А. М. Уздин, А. А. Долгая. – М. : ВНИИТПИ, 1997. – 76 с.
13. Уздин А. М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учеб. посо-

бие / А. М. Уздин, С. В. Елизаров, Т. А. Белаш. – М. : УМЦ ЖДТ, 2012. – 500 с.

14. Dmitrovskaya L. N. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales / L. N. Dmitrovskaya, A. M. Uzdin // First European Conf. on Earthquake Eng. and Seismology, Geneva, Switzerland, 3–8 Sept. 2006. Geneva, 2006, Paper no. 32.
15. Dolgaya A. A. Earthquake accelerations for construction calculating with different responsibility degrees / A. A. Dolgaya, A. V. Indeykin, A. M. Uzdin // Structural Dynamics – EURO DYN'96; 1996 Balkema, Rotterdam. – Rotterdam, 1996. – P. 143–147.
16. Kuznetsova I. O. Seismic protection of railway bridges in Sochi / I. O. Kuznetsova, A. M. Uzdin, T. V. Zhgutova, S. A. Shulman // Proc. of Workshop “Bridges seismic isolation and large-scale modeling” St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. – St. Petersburg, 2010. – P. 28–38.

References

1. Avidon G. E., Davydova G. V., Doronin F. A., Karlina Ye. A. & Uzdin A. M. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2009, no. 3, pp. 15–21.
2. *Vibratsii v tekhnike [Vibrations in Engineering]*; ed. I. I. Blekhman. Vol. 2. Moscow, Mashinostroyeniye, 1979. 351 p.
3. Gordeyev Yu. V. & Kuznetsova I. O. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseismic Construction*, 1996, Is. 4, pp. 37–41.
4. Dolgaya A. A. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseismic Construction*, 1994, Is. 5–6, pp. 56–63.
5. Dolgaya A. A., Indeykin A. V. & Uzdin A. M. *Teoriya dissipativnykh sistem [Dissipative Systems Theory]*. St. Petersburg, PGUPS, 1999. 99 p.
6. Durseneva N. V., Uzdin A. M. & Fedorova M. Yu. *Otsenka seysmostokosti spetsialnykh dempfirovannykh sistem [Evaluation of Seismic Resistance of Special Damping Systems]. VI Polyakhovskiyechteniya: mezhdunarodnaya konferentsiya po mekhanike, posvyashchennaya 95-letiyu so dnya rozhdeniya S. V. Vallandera [6th Polyakhov Readings: Int. Conf. in Mechanics Dedicated to the 95th Anniversary of Birth of S. V. Vallander]*, Selected Proceedings, St. Petersburg, Jan. 31 – Feb. 3, 2012. St. Petersburg, 2012. 2 p.

7. Zhgutova T. V., Kuznetsova I. O., Uzdin A. M. & Shulman S. A. Seismoizolyatsiya zheleznodorozhnykh mostov v Sochi [Seismic Isolation of Railway Bridges in Sochi]. *Trudy zasedaniya rabochey gruppy mezhdunarodnogo obshchestva po sistemam seymozashchity (ASSiSi) [Proc. of a Session of a Working Group of the Seismic Resistance Systems (ASSiSi)]*, 2011. Pp. 119-132.
8. Kvasnikov B. N. & Kouzakh S. N. *Seysmoykoye stroitelstvo – Antiseismic Construction*, 1994, Is. 1, pp. 20-25.
9. Kvasnikov B. N. & Kouzakh S. N. *Seysmoykoye stroitelstvo – Antiseismic Construction*, 1996, Is. 4, pp. 50-55.
10. Kolovskiy M. Z. *Nelineynaya teoriya vibrozashchitnykh sistem [Non-Linear Theory of Vibration-Resistant Systems]*. Moscow, Nauka, 1966. 317 p.
11. Rekomendatsii po zadaniyu seymicheskikh vozdeystviy dlya rascheta zdaniy raznoy stepeni otvetstvennosti [Recommendations for Setting Seismic Impacts for Calculation of Buildings of Various Degree of Liability]. St. Petersburg, Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamTsentr, 1996. 12 p.
12. Uzdin A. M. & Dolgaya A. A. Raschet elementov i optimizatsiya parametrov seismoizoliruyushchikh fundamentov [Calculation of Elements and Optimisation of Parameters of Seismic-Isolated Foundations]. Moscow, VNIINTPI, 1997. 76 p.
13. Uzdin A. M., Yelizarov S. V. & Belash T. A. *Seysmoykiye konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy: uchebnoye posobiye [Seismic-Resistant Constructions of Transport Buildings and Structures: Course Guide]*. Moscow, UMTs ZhDT, 2012. 500 p.
14. Dmitrovskaya L. N. & Uzdin A. M. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales. *First European Conf. on Earthquake Eng. and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3–8 Sept. 2006. Geneva, 2006, Paper no. 32.
15. Dolgaya A. A., Indeykin A. V. & Uzdin A. M. Earthquake accelerations for construction calculating with different responsibility degrees. *Structural Dynamics – EURO DYN'96*, 1996 Balkema, Rotterdam. Rotterdam, 1996. Pp. 143-147.
16. Kuznetsova I. O., Uzdin A. M., Zhgutova T. V. & Shulman S. A. Seismic protection of railway bridges in Sochi. *Proc. of Workshop "Bridges seismic isolation and large-scale modeling"*, St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. – St. Petersburg, 2010. Pp. 28-38.

НИКОНОВА Наталия Вячеславовна – ассистент кафедры, lovelynataxa@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).