

*На правах рукописи*

**НИКОНОВА Наталия Вячеславовна**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ СЕЙСМОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ И СЕЙСМИЧЕСКОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И  
СООРУЖЕНИЙ**

Специальность: **05.23.17 – Строительная механика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Уздин Александр Михайлович**

Официальные оппоненты: **Кауфман Борис Давидович**  
доктор технических наук,  
АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»,  
отдел «Статика и сейсмостойкость бетонных и железобетонных сооружений», главный научный сотрудник, г. Санкт-Петербург

**Фрезе Максим Владимирович**  
кандидат технических наук,  
ОАО «Трансмост», сектор разработки программных средств,  
главный специалист, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»**, г. Махачкала

Защита диссертации состоится «12» декабря 2017 года в 14<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: [rector@spbgasu.ru](mailto:rector@spbgasu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/nikonova-nataliya-vyacheslavovna>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

Лидия Никитовна Кондратьева

## **I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Сейсмоизоляция является в настоящее время основным способом сейсмозащиты сооружений в районах с сейсмичностью более 8 баллов. Однако, несмотря на эффективность сейсмоизоляции, ее применение в массовом строительстве сильно ограничено. Это связано с тем, что сейсмоизолирующие опоры и демпфирующие устройства характеризуются нелинейной диаграммой деформирования, что не позволяет использовать для расчета линейно-спектральную методику (ЛСМ). Попытки проведения расчетов по акселерограммам землетрясений сталкиваются с тем, что результаты изысканий, включающие генерацию расчетных воздействий, весьма дороги и становятся доступны проектировщику в конце проектирования. Такая ситуация исключает возможность в срок заказать сейсмоизоляцию с приемлемыми параметрами. В связи со сказанным, задача совершенствования методики расчета систем сейсмоизоляции в условиях ограниченности информации о сейсмическом воздействии представляется весьма актуальной.

**Степень разработанности проблемы.** Разработкой и исследованием систем сейсмоизоляции занималось большое количество отечественных и зарубежных специалистов. В России и бывшем СССР этим вопросам посвящены исследования А.Б. Абакарова, Я.М. Айзенберга, И.У. Альберта, А.Т. Аубакирова, В.С. Беляева, Г.В. Давыдовой, Г.А. Джинчвелашвилли, Б.Д. Кауфмана, М.А. Клячко, А.М. Курзанова, О.В. Мкртычева, Ю.Л. Рутмана, О.А. Савинова, В.В. Сахаровой, В.И. Смирнова, А.М. Уздина, Ю.Д. Черепинского, В.Г. Яременко и др. Вопросы учета и оптимизации демпфирования в системах сейсмоизоляции исследованы Т.А. Белаш, А.А. Долгой, О.А. Савиновым, А.М. Уздиным и др. За рубежом вопросами сейсмоизоляции занимались Л.Р. Гринбэнк, С. Инфанти, Дж. Келли, В.Г. Робинсон, Г.Г. Мак-Верри, А. Мартелли, Б. Паво, Р.И. Скиннер, М. Форни, К.Н. Фуллер и др. Благодаря их исследованиям в настоящее время сейсмоизоляция признана одним из наиболее эффективных методов сейсмозащиты. В мировой практике возведено более трех тысяч зданий и сооружений с сейсмоизоляцией, однако до настоящего времени отсутствуют инженерные методы расчета, позволяющие подобрать параметры сейсмоизоляции в условиях ограниченной информации о сейсмическом воздействии. В частности, оказывается невозможным применить нормативную ЛСМ для подбора параметров сейсмоизолирующих устройств и отсутствуют универсальные модели сейсмических воздействий для широкого применения сейсмоизоляции в массовом строительстве. Эта ситуация обусловила задачи диссертационной работы.

**Цель исследования.** Цель исследования заключается в развитии математических моделей сейсмоизолирующих устройств и модели сейсмического воздействия, позволяющих подбирать параметры сейсмоизоляции и оценивать ее эффективность при отсутствии необходимой информации о сейсмическом воздействии на площадке строительства.

**Задачи исследования:**

– Разработать линеаризованные модели сейсмозащитных устройств для предварительного анализа их работы с использованием ЛСМ.

– Разработать простые нелинейные модели сейсмозащитных устройств, обеспечивающие быстрые динамические расчеты сейсмоизолированных сооружений по акселерограммам землетрясений.

– Проанализировать характеристики реальных сейсмических воздействий и на этой основе разработать модель сейсмического воздействия, которая генерируется для проектируемого сооружения.

– Разработать методику и программные средства для задания параметров предложенной модели и генерации воздействия.

**Объект исследования** – сейсмоизолирующие опоры с гидравлическими демпферами.

**Предмет исследования** – методы расчета зданий и сооружений с сейсмоизолирующими опорами и гидравлическими демпферами в условиях ограниченной информации о сейсмическом воздействии.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Выполнена линеаризация уравнений движения сейсмических колебаний сейсмоизолированных систем с демпфирующими устройствами, допускающая применение ЛСМ для предварительного анализа работы сейсмоизоляции;

2. Разработана математическая модель демпфирующего устройства сейсмоизолирующих опор в виде двух параллельно установленных демпферов: вязкого и сухого трения;

3. Установлено значение необходимого демпфирования в системе сейсмоизоляции, исключающее возможность параметрического резонанса при одновременном действии вертикальной и горизонтальной компонент сейсмического воздействия;

4. Построен асимптотический портрет уравнения сейсмических колебаний сейсмоизолированных систем, позволяющий установить области применения упрощенных (укороченных) уравнений движения;

5. Построена новая математическая модель сейсмического воздействия для рассчитываемого сооружения с учетом сейсмологических характеристик площадки строительства (магнитуды, глубины очага, эпицентрального расстояния);

6. Разработана методика определения опасных частот и амплитуд расчетного воздействия для сейсмоизолированного сооружения.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая и практическая значимость заключается в разработке моделей сейсмоизолирующих устройств и модели сейсмического воздействия, позволяющих подбирать параметры и оценивать эффективность сейсмоизоляции в условиях ограниченной информации о сейсмологических особенностях площадки строительства. В частности, разработки диссертации позволяют подбирать параметры сейсмоизоляции на ранних стадиях проектирования, а также проектировать типовые конструкции фундаментов.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы динамического расчета сооружений, численное моделирование колебаний на ЭВМ и имеющиеся записи акселерограмм землетрясений. Полученные результаты были сопоставлены с результатами исследований других специалистов, работающих в рассматриваемой области.

**Положения, выносимые на защиту.**

– линеаризация уравнений движения сейсмоизолированной системы с маятниковыми опорами и демпфирующими устройствами, допускающая применение ЛСМ для расчета сейсмоизолированных сооружений;

– методика и расчетные формулы для моделирования нелинейных демпферов двумя демпферами: сухого и вязкого трения;

– величина затухания в системе сейсмоизоляции, исключающая возможность возникновения параметрического резонанса при одновременном действии вертикальной и горизонтальной компонент сейсмического воздействия;

– асимптотический портрет уравнения сейсмических колебаний одномассной сейсмоизолированной системы с нелинейным демпфированием, определяющий возможности использования упрощенных (укороченных) уравнений движения;

– модель сейсмического воздействия для расчета проектируемого сооружения в виде суммы импульса скорости и набора затухающих синусоид, позволяющая учесть сейсмологические особенности площадки строительства (магнитуду, глубину очага и эпицентральное расстояние);

– методика подбора расчетной амплитуды и опасной частоты воздействия, в том числе для расчета нелинейных систем.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, а именно: п. 2 «Линейная и нелинейная механика конструкций и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета», п. 7 «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и т.д.)».

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследований обусловлена применением апробированных методов динамики сооружений и теории колебаний, а также соответствием результатов исследований опыту прошлых землетрясений и данным других исследователей по отдельным вопросам, рассмотренным в диссертации.

Материалы диссертации использованы для подбора параметров сейсмоизолирующих устройств на железнодорожных мостах г. Сочи.

Основные научные результаты докладывались на VI Поляховских чтениях в феврале 2012 г., на международной конференции в Вене Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013) в августе 2013 г., на VII Савиновских чтениях в июле 2014 г., на XXVI Международной конференции Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых

сред и конструкций в сентябре 2015г., а также на научно-технических конференциях и семинарах, проводимых ПГУПС, по вопросам сейсмостойкого строительства.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 17 печатных работах общим объемом 10,15 п. л., лично автору принадлежат 4,4 п. л., из них 6 статей в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 128 источников, из них 33 – на иностранном языке. Текст диссертации изложен на 154 страницах печатного текста. Работа включает 58 рисунков, 20 таблиц, 132 формулы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дана оценка научной и практической значимости полученных результатов.

В первой главе изложен анализ состояния исследуемого вопроса. В ней отмечены результаты исследований отечественных и зарубежных специалистов.

Во второй главе диссертации выполнено построение расчетных математических моделей ряда сейсмозащитных устройств, допускающих простые оценки эффективности сейсмоизоляции.

В третьей главе проанализированы свойства реальных сейсмических воздействий и методы их моделирования, предложена новая математическая модель сейсмического воздействия, опасная для рассматриваемого сооружения и учитывающая основные сейсмологические данные (магнитуду, глубину очага и эпицентральное расстояние). Для построения расчетной акселерограммы в соответствии с предложенной методикой разработана программа на языке C++ в среде Windows XP.

В четвертой главе диссертации рассмотрено применение разработанной модели воздействия для расчета различных систем и, прежде всего, систем сейсмоизоляции. При этом предложены методика и алгоритм поиска наиболее опасной частоты воздействия для нелинейных систем сейсмоизоляции.

В заключении изложены основные выводы по результатам исследования и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

## **II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**1. Выполнена линеаризация уравнений движения сейсмоизолированной системы с маятниковыми опорами и гидравлическим демпфером.**

Современные системы сейсмоизоляции снабжаются различного вида демпферами, как правило, гидравлическими и гистерезисными. Сила трения в таких демпферах описывается уравнением

$$Q = -b|\dot{q}|^\alpha \operatorname{sign}(\dot{q}), \quad (1)$$

где  $Q$  – сила сопротивления в демпфере;  $b$  и  $\alpha$  – характеристики демпфера,  $\dot{q}$  – скорость смещения в демпфере.

Уравнение колебаний с рассматриваемыми демпферами имеет вид

$$\ddot{q} + b|\dot{q}|^\alpha \text{sign}(\dot{q}) + k^2 q = 0, \quad (2)$$

где  $\ddot{q}$  – ускорение;  $k$  – частота колебаний;  $q$  – смещение.

При  $\alpha \neq 1$  уравнение (2) является нелинейным. Для использования ЛСМ, закрепленной в действующих нормативных документах, возникает необходимость его линеаризации, т.е. замена уравнения (2) эквивалентным линейным

$$\ddot{q} + 2n_{\text{экв}}\dot{q} + k_{\text{экв}}^2 q = 0. \quad (3)$$

Здесь  $n_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент демпфирования,  $k_{\text{экв}}$  – эквивалентная частота колебаний.

При использовании метода гармонической линеаризации при воздействии с частотой  $\omega$  расчетные формулы имеют вид

$$k_{\text{экв}}^2 = \frac{C}{A}; \quad 2n_{\text{экв}} = \frac{S}{A}; \quad (4)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;

$$C = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} [Ak^2 \cos\theta + (A\omega)^\alpha b(-\sin\theta)^\alpha] \cos\theta d\theta; \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} [Ak^2 \cos\theta + (A\omega)^\alpha b(-\sin\theta)^\alpha] \sin\theta d\theta. \quad (6)$$

Более сложный интеграл (6) представляется следующим образом

$$S = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} [Ak^2 \cos\theta + (A\omega)^\alpha b(-\sin\theta)^\alpha] \sin\theta d\theta = \frac{4b(A\omega)^\alpha}{\pi} \cdot 2^\alpha \cdot B\left(\frac{\alpha+2}{2}, \frac{\alpha+2}{2}\right),$$

где  $B(x,y)$  – бета-функция от аргументов  $x$  и  $y$ .

Тогда

$$2n_{\text{экв}} = \frac{4b(A\omega)^\alpha}{\pi A \omega} \cdot 2^\alpha \cdot B\left(\frac{\alpha+2}{2}, \frac{\alpha+2}{2}\right) = \frac{1}{\pi} 2^{\alpha+2} A^{\alpha-1} \omega^{\alpha-1} b B\left(\frac{\alpha+2}{2}, \frac{\alpha+2}{2}\right)$$

Предложенная линеаризация сил сопротивления позволяет использовать ЛСМ, если ввести поправку к сейсмическим силам  $K_\psi$

$$K_\psi = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{эм}}}{\gamma}}; \quad \gamma = \frac{2n_{\text{экв}}}{k_{\text{экв}}},$$

где  $\gamma_{\text{эм}} = 0,15$ .

## 2. Разработана математическая модель гидравлического демпфера в виде параллельно расположенных демпферов сухого и вязкого трения.

Для более точного описания работы демпферов, используемых в системах сейсмоизоляции, в диссертации предложено представление реальных демпферов, сила сопротивления которых описывается зависимостью (1), двумя демпферами: вязкого и сухого трения.

Математически эту задачу можно поставить следующим образом:

$$b|\dot{q}|^\alpha \operatorname{sign}(\dot{q}) \quad \beta\dot{q} + F\operatorname{sign}(\dot{q})$$

аппроксимировать выражение выражением

$$b|\dot{q}|^\alpha \operatorname{sign}(\dot{q}) = \beta\dot{q} + F\operatorname{sign}(\dot{q}). \quad (7)$$

Здесь  $\beta$  – показатель вязкого демпфирования;  $F$  – сила трения в демпфере сухого трения (ДСТ).

Решение сформулированной задачи осуществляется минимизацией квадрата разницы правой и левой частей соотношения (7) на гармонических

$$q = q_0 \sin \omega t \quad T = \frac{2\pi}{\omega} :$$

колебаниях за период колебаний

$$\Phi = \int_0^T (b|\dot{q}|^\alpha - \beta|\dot{q}| - F) dt \rightarrow \min, \quad (8)$$

что приводит к системе двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \beta} = -2 \int_0^T |\dot{q}| (b|\dot{q}|^\alpha - \beta|\dot{q}| - F) dt = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial F} = -2 \int_0^T (b|\dot{q}|^\alpha - \beta|\dot{q}| - F) dt = 0. \quad (9)$$

После решения системы уравнений (9) были получены следующие выражения для параметров  $\beta$  и  $F$ :

$$\beta = b \frac{I_{\alpha+1} T - I_\alpha I_1}{I_2 T - I_1^2}$$

$$F = b \frac{I_\alpha I_2 - I_{\alpha+1} I_1}{I_2 T - I_1^2} \quad (10)$$

$$I_{\alpha+1} = \int_0^T |\dot{q}|^{\alpha+1} dt, \quad I_\alpha = \int_0^T |\dot{q}|^\alpha dt, \quad I_1 = \int_0^T |\dot{q}| dt, \quad I_2 = \int_0^T |\dot{q}|^2 dt.$$

где

На рисунке 1 приведены петли гистерезиса реального демпфера и предлагаемой расчетной модели. Графики получены с помощью САПР MathCad. Эмпирическая петля гистерезиса соответствует выражению (1),

аппроксимирующая – выражению (7) с параметрами трения  $\beta$  и  $F$ , найденными по формуле (10).

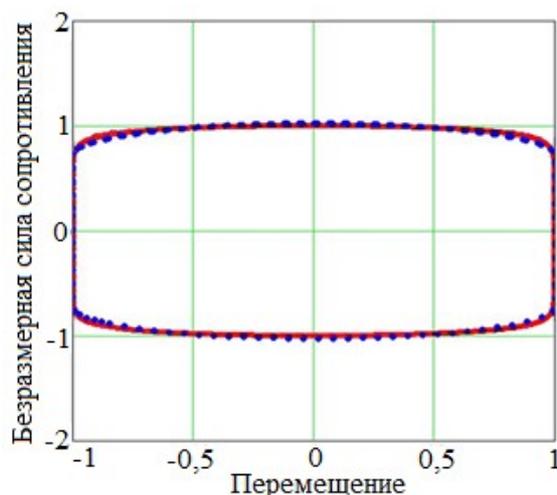


Рисунок 1 – Эмпирическая (сплошная) и аппроксимирующие петли гистерезиса

Как видно из рисунка, петли гистерезиса (1) и предлагаемой модели с параметрами (10) практически совпадают.

Использование предлагаемого представления позволяет моделировать сейсмоизолированные сооружения с различными демпферами более простой системой с демпферами сухого и вязкого трения, которые представляют собой кусочно-линейные системы релейного типа. Для их анализа существуют эффективные программные средства.

**3. На основе исследования совместных вертикальных и горизонтальных колебаний сейсмоизолированной системы и установлена величина демпфирования, не допускающая возможности возникновения параметрического резонанса.**

Важной особенностью сейсмических колебаний является наличие одновременно горизонтальной и вертикальной компонент сейсмического воздействия. Необходимость учета вертикальной компоненты при анализе сейсмоизолированных систем указывалась в работах Ю.Л. Рутмана, И.У. Альберта, А.А. Долгой, А.М. Уздина и ряда других специалистов. Как известно, совместные колебания сейсмоизолированной системы с маятниковыми опорами описывается уравнением

$$\ddot{\varphi} + \frac{g + \ddot{z}(t)}{d} \varphi = \frac{\Phi(t)}{d}, \quad (11)$$

где  $\varphi$  – угол поворота опоры,  $d$  – некоторая характеристика опоры, имеющая размерность длины (для подвесных фундаментов это длина подвески, для опор типа «шар в лунке» – радиус катания, для опор Курзанова – диагональ опорного элемента),  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Phi(t)$  – горизонтальное ускорение основания;

$\ddot{z}(t)$  – акселерограмма вертикальных колебаний основания сооружения. При этом

$$\Phi(t) = A_{гор} g \sin \omega t, \quad \ddot{z}(t) = A_{верт} g \cos \psi t, \quad (12)$$

где  $A_{верт}$ ,  $A_{гор}$  – соответственно вертикальное и горизонтальное ускорения основания в долях силы тяжести;  $\omega$ ,  $\psi$  – частоты соответственно горизонтального и вертикального возмущений системы.

Уравнение (11) приводится к виду уравнения Матье-Хилла:

$$\ddot{\phi} + (L + 2q \cos \chi \tau) \phi = \sin \Omega \tau, \quad (13)$$

$$k = \sqrt{\frac{g}{d}}$$

где  $\tau = kt$  – безразмерное время,  $k$  – частота собственных колебаний

$$\ddot{\phi} = k^2 \ddot{\phi}, \quad \chi = \frac{\psi}{k}, \quad \Omega = \frac{\omega}{k}.$$

системы;

Параметры уравнения Матье-Хилла  $L$  и  $2q$  для движения рассматриваемых маятниковых опор равны  $L = 1$ ;  $2q = A_{верт}$ .

Далее в систему было введено вязкое трение и рассмотрено однородное уравнение Матье

$$\ddot{\phi} + \gamma \dot{\phi} + (1 + A_{верт} \cos \chi \tau) \phi = 0, \quad (14)$$

где  $\gamma$  – коэффициент неупругого сопротивления.

Выполнено построение диаграммы Айнса-Стретта на плоскости изменения параметров  $L$  и  $2q$  ( $L = 1$ ;  $2q = A_{верт}$ ). На рисунке 2 показаны приближенные границы первой области неустойчивости при  $\gamma = 0$  и  $\gamma = 0,2$ , а также точки, соответствующие значениям  $A_{верт} = 0,4$  и  $A_{верт} = 0,2$ .

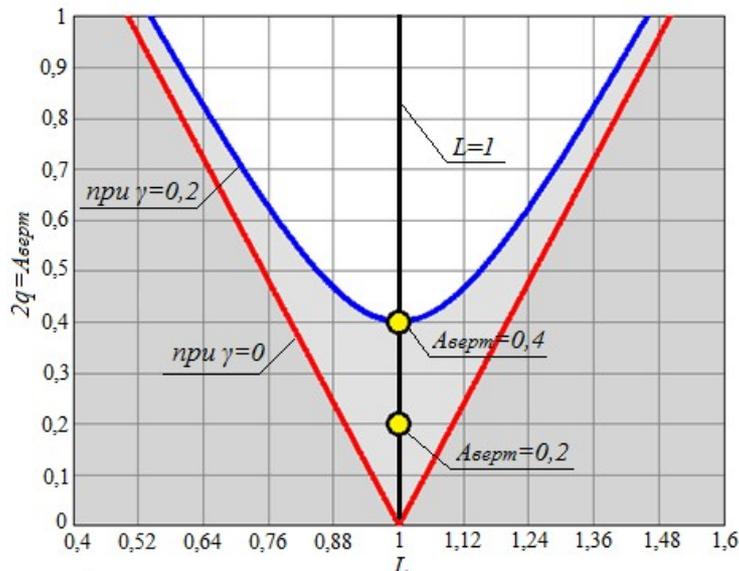


Рисунок 2 – Границы первой области неустойчивости

В результате выполненного анализа показано, что в системах рассматриваемого типа параметрический резонанс не может возникнуть при выполнении условия

$$\gamma > \mu = \frac{A_{\text{верт}}}{2}. \quad (15)$$

#### 4. Построен асимптотический портрет уравнения сейсмических колебаний одномассной сейсмоизолированной системы с гидравлическими демпферами.

Рассмотрено применение метода построения укороченных уравнений движения Б.Н. Квасникова к анализу уравнения демпфированной системы с гидравлическими демпферами, применяемыми для гашения колебаний. Как уже было отмечено сила сопротивления  $Q$  в них записывается в виде (1).

Исходное уравнение колебаний системы при этом имеет вид (2). После деления обеих его частей на величину  $Ag$ , где  $g$  – ускорение свободного

$$A = -\frac{1}{g} \ddot{y}_0^{\max}$$

падения,

и введения безразмерного времени  $\tau$  получено уравнение

$$\ddot{\xi} + (2\pi)^2 \xi + (2\pi)^\alpha \chi |\dot{\xi}|^\alpha \text{sign}(\dot{\xi}) = -w, \quad (16)$$

$$\xi = \frac{\eta}{T^2}$$

$$\dot{\xi} = \frac{\dot{\eta}}{T^2}, \quad \ddot{\xi} = \frac{\ddot{\eta}}{T^2};$$

где – безразмерное смещение, соответственно

$T$  –

$$T = \frac{2\pi}{k} \quad k^2 = \frac{c}{m}$$

период колебаний,

;

$$w = \frac{\ddot{q}_0}{AgT^2}; \quad \frac{b}{m}(Ag)^{\alpha-1} = \chi k^\alpha.$$

,  $k$  – частота колебаний,  $m$ ,  $c$  – масса и

жесткость системы соответственно;

Для проведения асимптотического анализа в диссертации нелинейное сопротивление разбито на вязкое и сухое трение с параметром вязкого трения  $\beta$  и сухого трения  $F$ . Для этого должно выполняться условие (7). В этом условии

$$\begin{cases} \beta = 2\pi\gamma = \alpha b = \alpha(2\pi)^\alpha \chi \\ F = b(1-\alpha) = (2\pi)^\alpha \chi(1-\alpha) \end{cases} \quad (17)$$

или

$$\begin{cases} \gamma = \alpha(2\pi)^{\alpha-1} \chi \\ F = (2\pi)^\alpha (1-\alpha) \chi \end{cases} \quad (18)$$

Тогда уравнение (16) принимает вид:

$$\ddot{\xi} + \alpha(2\pi)^2 \chi \dot{\xi} - (2\pi)^2 (1-\alpha) \chi |\dot{\xi}|^\alpha \text{sign}(\dot{\xi}) + (2\pi)^2 \xi = -w. \quad (19)$$

В работе проведен асимптотический анализ уравнения (19) и установлены три области параметров уравнения движения, в которых можно пренебречь

определенными членами (рисунок 3). Далее полученные области были разделены на подобласти, также показанные на рисунке 3. В каждой из областей (и подобластей) для предварительного анализа работы системы можно использовать соответствующие упрощенные уравнения ее движения, различающиеся значимостью отброшенных членов.

Неравенства, ограничивающие области и подобласти параметров уравнения движения системы, и укороченные уравнения для каждой из них приведены в таблице 1.

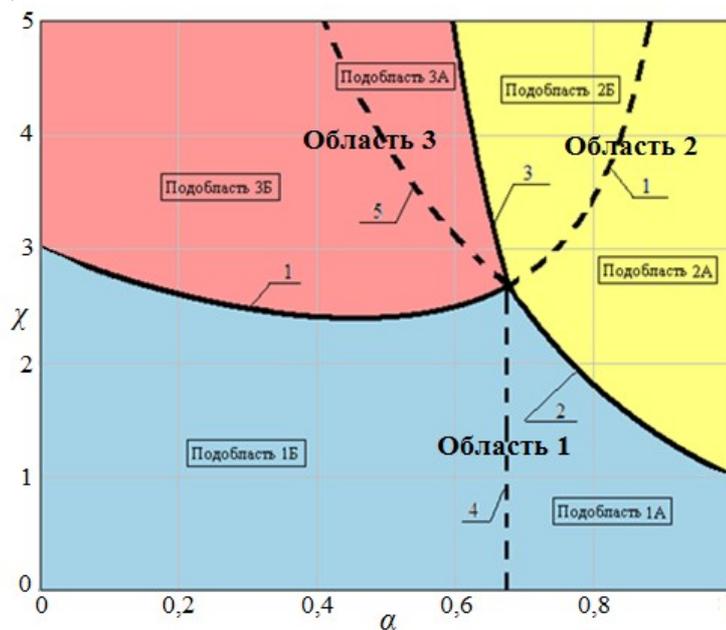


Рисунок 3 – Асимптотический портрет уравнения колебаний осциллятора с вязким и сухим трением

$$\chi = \frac{3}{(2\pi)^\alpha (1-\alpha)} \quad \chi = \frac{1}{\alpha (2\pi)^{\alpha-1}} \quad \chi = \frac{1-\alpha}{3\alpha^2 (2\pi)^{\alpha-2}}$$

1 – кривая ; 2 – кривая ; 3 – кривая ; 4 –

$$\alpha = \frac{2\pi}{2\pi + 3} \quad \chi = \sqrt[3]{\frac{3}{\alpha^2 (2\pi)^{3\alpha-2} (1-\alpha)}}$$

прямая ; 5 – кривая

### 5. Разработана модель сейсмического воздействия, позволяющая учесть свойства сооружения и имеющуюся сейсмогеологическую информацию.

Важнейшим вопросом оценки сейсмостойкости сооружения является задание сейсмического воздействия. Автором предложена модель сейсмического воздействия, которая, с одной стороны, представляется опасной для сооружения, а с другой стороны позволяет учесть некоторые важные сейсмологические данные о магнитуде и очаге возможного землетрясения. В основе предложенной методики лежат исследования итальянского профессора Е. Факколи и дальнейшее их развитие в работах А.М. Уздина и Л.Н. Дмитровской.

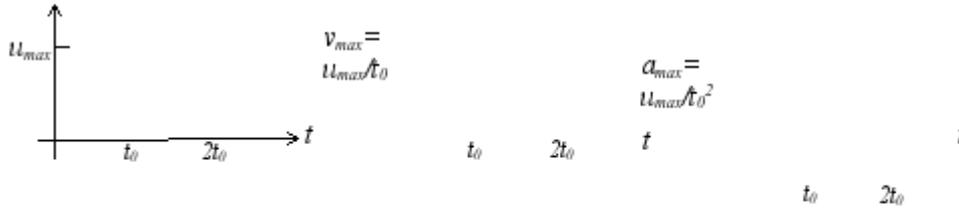
Е. Факколи показал, что в идеальной среде при образовании трещины от источника бежит волна в виде импульса скорости. Импульс скорости  $v(t)$ , его ускорение  $a(t)$  и смещение  $u(t)$  описываются выражениями:

$$a(t) = \begin{cases} u_{\max}/t_0^2 \\ -u_{\max}/t_0^2 \\ 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$v(t) = \begin{cases} u_{\max} t/t_0^2 \\ \frac{u_{\max}}{t_0} \left( 2 - \frac{t}{t_0} \right) \\ 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$u(t) = \begin{cases} \frac{u_{\max}}{2} \left( \frac{t}{t_0} \right)^2 \\ \frac{u_{\max}}{2} \left[ -\left( \frac{t}{t_0} \right)^2 + 4 \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right) - 2 \right] \\ u_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

Графическая интерпретация выражений (20-22) представлена на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Графики смещений, скоростей и ускорений для ступенчатого процесса**

Импульс скорости  $v(t)$  представляется треугольной зависимостью во времени продолжительностью  $2t_0$ . При отсутствии информации об очагах следует принимать величину  $2t_0$  равной периоду основного тона колебаний сейсмоизолированной системы. Е. Факколи связал величину остаточного смещения  $u_{\max}$  и продолжительность импульса  $2t_0$  с гипоцентральной расстоянием  $R$  и магнитудой воздействия  $M_w$ :

$$t_0 = 10^{(-3.471 + 0.5M_w)} \quad (23)$$

$$u_{\max} = 10^{(-6.3 + M_w - \log(R))} \quad (24)$$

Таблица 1

**Неравенства, ограничивающие области и подобласти параметров уравнения движения системы,  
и укороченные уравнения для каждой из них**

Область	Неравенства, выполняющиеся в области	Укороченные уравнения	Подобласть	Неравенства, выполняющиеся в подобласти	Укороченные уравнения
1	$\begin{cases} \chi < \frac{1}{\alpha(2\pi)^{\alpha-1}} \\ \chi < \frac{3}{(2\pi)^\alpha(1-\alpha)} \end{cases}$	$\ddot{\xi} + 4\pi^2 \xi = -w$	1А	$\alpha > \frac{2\pi}{3+2\pi}$	$\ddot{\xi} + (2\pi)^2 \xi + \alpha(2\pi)^2 \chi \dot{\xi} = -w$
			1Б	$\alpha < \frac{2\pi}{3+2\pi}$	$\ddot{\xi} + (2\pi)^2 \xi - (2\pi)^2(1-\alpha) \chi \text{sign}(\dot{\xi}) = -w$
2	$\begin{cases} \chi > \frac{1}{\alpha(2\pi)^{\alpha-1}} \\ \chi > \frac{1-\alpha}{3\alpha^2(2\pi)^{\alpha-2}} \end{cases}$	$\ddot{\xi} + \alpha(2\pi)^2 \chi \dot{\xi} = -w$	2А	$\chi < \frac{3}{(2\pi)^\nu(1-\nu)}$	$\ddot{\xi} + \alpha(2\pi)^2 \chi \dot{\xi} + (2\pi)^2 \xi = -w$
			2Б	$\chi > \frac{3}{(2\pi)^\nu(1-\nu)}$	$\ddot{\xi} + \alpha(2\pi)^2 \chi \dot{\xi} - (2\pi)^2(1-\alpha) \chi \text{sign}(\dot{\xi}) = -w$
3	$\begin{cases} \chi < \frac{1-\alpha}{3\alpha^2(2\pi)^{\alpha-2}} \\ \chi > \frac{3}{(2\pi)^\alpha(1-\alpha)} \end{cases}$	$\ddot{\xi} - (2\pi)^2(1-\alpha) \chi \text{sign}(\dot{\xi}) = -w$	3А	$\chi > \sqrt[3]{\frac{3}{\alpha^2(2\pi)^{3\alpha-2}(1-\alpha)}}$	$\ddot{\xi} - (2\pi)^2(1-\alpha) \chi \text{sign}(\dot{\xi}) + \alpha(2\pi)^2 \chi \dot{\xi} = -w$
			3Б	$\chi < \sqrt[3]{\frac{3}{\alpha^2(2\pi)^{3\alpha-2}(1-\alpha)}}$	$\ddot{\xi} - (2\pi)^2(1-\alpha) \chi \text{sign}(\dot{\xi}) + (2\pi)^2 \xi = -w$

В соответствии с [10] и формулами (23), (24) остаточные смещения после прохождения импульса скорости возрастают с ростом магнитуды  $M_w$  и убывают с ростом гипоцентрального расстояния  $R$ . Продолжительность импульса также возрастает с ростом магнитуды. Вместе с тем, пиковое ускорение  $a_{max}$  не зависит от амплитуды и определяется следующей зависимостью

$$a_{max} = \frac{u_{max}}{t_0^2} = \frac{4.35}{R}, \quad (25)$$

где величина гипоцентрального расстояния задается в километрах, а ускорения получаются в  $m/c^2$ .

В работах А.М. Уздина и Л.Н. Дмитровской показано, что импульс скорости можно выделить из записей реальных воздействий.

Таким образом, в предлагаемой методике генерации воздействия расчетная акселерограмма представляется в виде суперпозиции бегущей волны и случайного процесса.

На основе указанных выше исследований велосиграмма расчетного воздействия записывается в виде:

$$\dot{y}_0 = v(t - \varphi) \cdot \eta(t - \varphi) + \sum_{i=1}^3 \alpha_i e^{-\alpha_i t} (1 - e^{-\beta_i t}) \sin \omega_i t, \quad (26)$$

где  $\varphi$  – сдвиг фаз от начала землетрясения до момента прихода импульса скорости к сооружению;

$$\eta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases}$$

– функция Хевисайда.

Частоты  $\omega_i$  задаются резонансными для сооружения, что делает предлагаемую модель опасной, а расчеты с ее использованием консервативными.

После задания частот в модели остаются 12 неопределенных параметров.

Три параметра – это характеристики импульса скорости  $\varphi$ ,  $a_{max}$  и  $t_0$ . Учитывая зависимости (25), (26), вместо варьирования параметров  $a_{max}$  и  $t_0$  целесообразно варьировать параметры  $M_w$  и  $R$ , диапазон изменения которых приводится в материалах изысканий. Остальные 9 параметров – это значения  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  во второй части представления (26).

Параметры модели подбираются так, чтобы минимизировать разницу в

$$\frac{\ddot{y}_{max} y_{max}}{\dot{y}_{max}^2}$$

пиковых ускорениях, показателе и интенсивности по Ариасу для предлагаемой модели и для реальных сейсмических воздействий.

Программно указанный процесс реализуется путем вычисления невязок на сетке значений параметров. При задании 10 возможных значений для каждого параметра получается  $10^{12}$  вариантов. Из всех вариантов выбирается вариант с наименьшей погрешностью.

В соответствии с изложенным автором была разработана программа на языке C++, реализующая описанную методику. Входными данными к программе являются диапазоны изменения искомых параметров и число точек перебора на этом интервале.

В диссертации была выполнена проверка консервативности предложенного процесса путем численного эксперимента. Для этого были выполнены расчеты 7 зданий на пакет из 75 акселерограмм землетрясений прошлых лет. При этом в пакете были акселерограммы, содержащие компоненты, опасные для рассматриваемых сооружений. Выполненные расчеты подтвердили, что использование пакета акселерограмм прошлых землетрясений дают неконсервативную, а иногда и ошибочную оценку сейсмостойкости сооружения. Так, при расчете эффективности сейсмоизоляции и использовании высокочастотных воздействий сейсмические нагрузки могут снижаться в 20 и более раз, хотя на практике снижение нагрузки более чем в 4 раза представляется сомнительным.

Предложенная модель воздействия подбирается опасной для сооружения и дает консервативные оценки снижения нагрузок в 2-3 раза. Использование предлагаемой модели позволяет обеспечить подбор параметров сейсмоизоляции на начальной стадии проектирования и вести типовое проектирование сейсмоизолированных сооружений.

Пример сгенерированной по описанной методике акселерограммы приведен на рисунке 5.

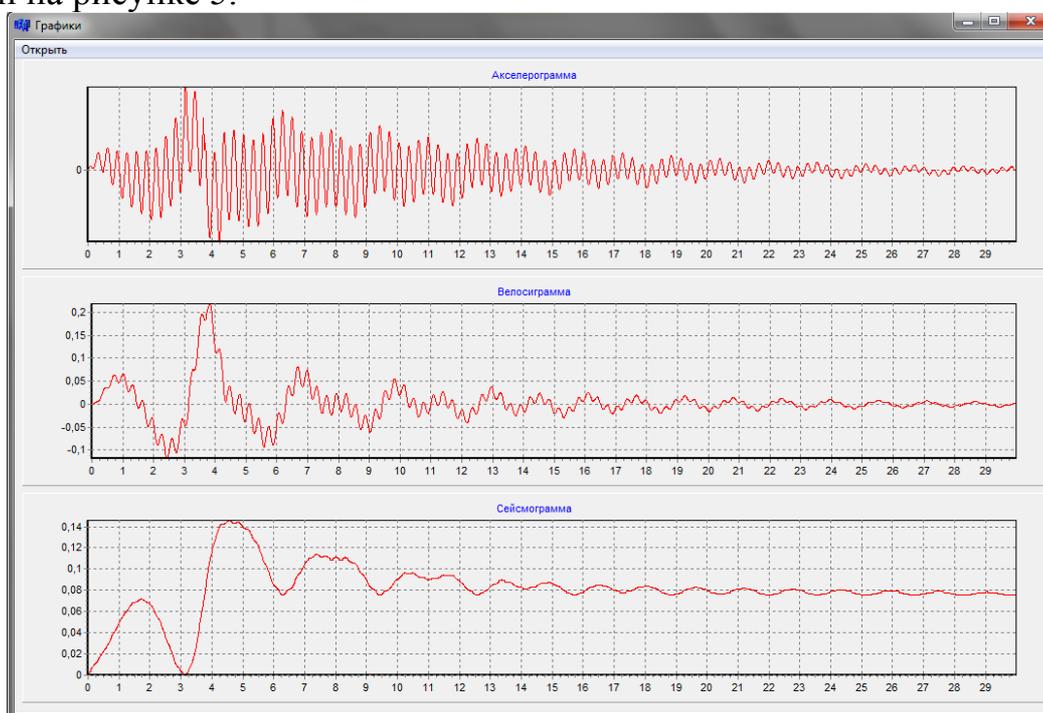


Рисунок 5 – Пример модельной акселерограммы, сгенерированной по разработанной в диссертации методике и программе.

## **6. Разработана методика подбора расчетной амплитуды и опасной частоты, в том числе для расчета нелинейных систем.**

Для использования предлагаемой модели воздействия необходимо знать опасные для сооружения частоты. Для линейных систем – это резонансные частоты сооружений. Определение опасных частот для нелинейных систем вызывает определенные трудности, связанные с тем, что их значения зависят от амплитуды воздействия.

Это обстоятельство затрудняет поиск опасной частоты воздействия, поскольку требуется построение набора амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при различных амплитудах воздействия, причем фактическая амплитуда воздействия заранее неизвестна.

Для корректного решения поставленной задачи предлагается записать исходное уравнение колебаний для одномассной системы в безразмерных ускорениях:

$$m\ddot{q} + Q + cq = -m\ddot{y}_0. \quad (27)$$

Если заменить силу нелинейного сопротивления демпфера  $Q$  суммой сил вязкого и сухого трения (в соответствии с п. 2), то уравнение (27) примет вид:

$$m\ddot{q} + (\beta|\dot{q}| + F)\text{sign}(\dot{q}) + cq = -m\ddot{y}_0 \quad (28)$$

или, после раскрытия скобок и деления на массу  $m$ ,

$$\ddot{q} + \frac{\beta}{m}\dot{q} + \frac{F}{m}\text{sign}(\dot{q}) + \frac{c}{m}q = -\ddot{y}_0. \quad (29)$$

$$\frac{\beta}{m} = \gamma k, \quad \frac{F}{m} = fg, \quad \frac{c}{m} = k^2,$$

С учетом того, что и уравнение (29) можно привести к виду:

$$\ddot{q} + \gamma k\dot{q} + fg\text{sign}(\dot{q}) + k^2q = -\ddot{y}_0. \quad (30)$$

Далее уравнение (30) было записано в безразмерных ускорениях:

$$\ddot{\xi} + 2\pi\gamma\dot{\xi} + 4\pi^2\xi - f_{\text{омн}}\text{sign}(\dot{\xi}) = -T^2\ddot{y}_0, \quad (31)$$

$$\xi = \frac{q}{AgT^2}$$

где  $\xi$  – безразмерные смещения,  $A$  – амплитуда ускорения в долях

ускорения свободного падения;  $f_{\text{омн}} = \frac{f}{A}$  – относительный коэффициент сухого

$$\ddot{y}_0 = \frac{\ddot{y}_0}{Ag}$$

трения,  $\ddot{y}_0$  – безразмерное ускорение задаваемого воздействия.

Значения коэффициентов  $f$  и  $\gamma$  вычисляются по следующим формулам:

$$\gamma = \frac{\alpha \cdot b}{m \cdot k}, \quad (32)$$

$$f = \frac{b(1-\alpha)}{m \cdot g}. \quad (33)$$

Преимуществом предлагаемой формы записи уравнений колебаний является переход от двух неизвестных (амплитуды и частоты воздействия) к одной (безразмерной частоте). 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 (общий вид семейства АЧХ представлен на рисунке 6). По построенным АЧХ можно получить зависимость опасной частоты от относительного коэффициента трения (рисунок 7).

Далее принимается в расчет тот факт, что амплитуда воздействия зависит от преобладающей частоты воздействия. Характер этой зависимости приведен на рисунке 8.

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

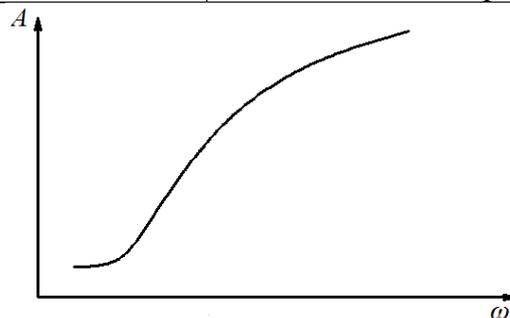
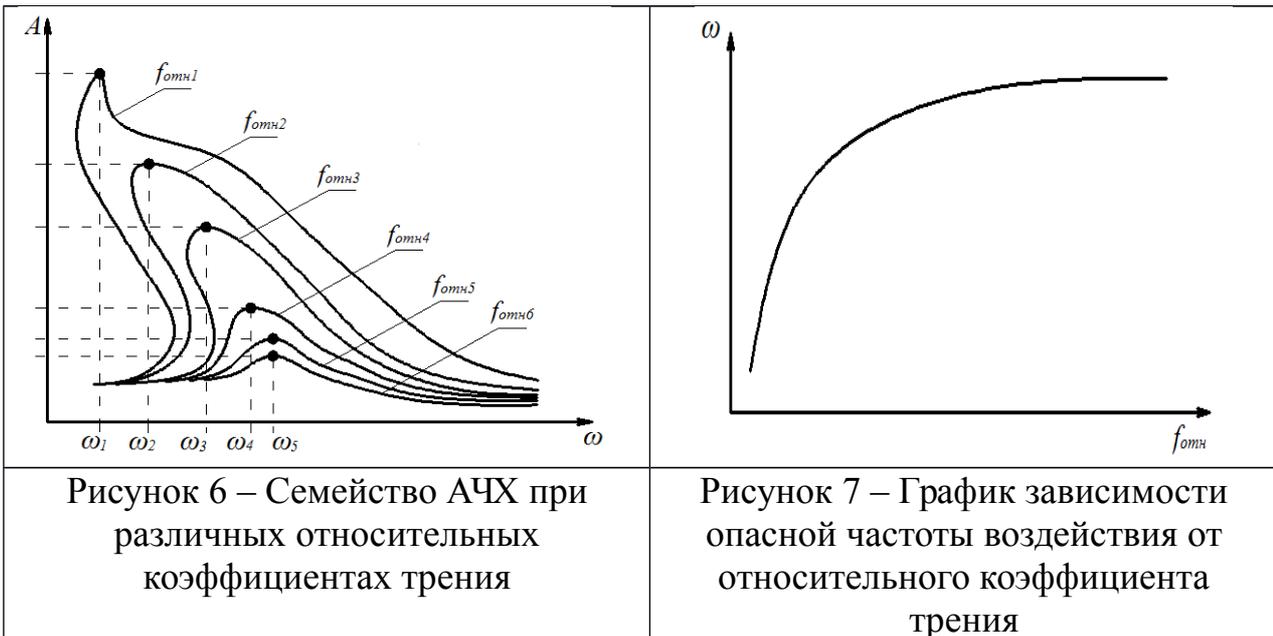


Рисунок 8 – Характерная зависимость амплитуды воздействия от его преобладающей частоты

Далее предлагаемый расчет носит итерационный характер. Порядок расчета следующий.

1. Для начального приближения принимается в качестве опасной частоты частота линейной системы.
  2. По графику  $\omega(f_{отн})$  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 зависимости амплитуды воздействия от его преобладающей частоты снова определяется частота воздействия.
- П. 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.

Схема итерационного расчета показана на рис. 9.

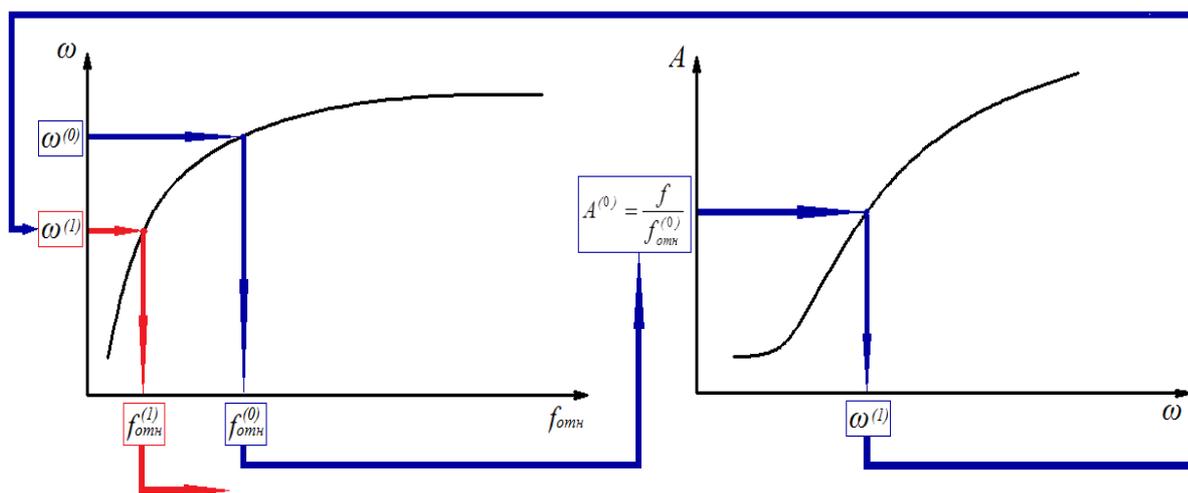


Рис. 9 – Схема итерационного расчета.

5. По найденной опасной частоте генерируется воздействие.
6. Выполняется расчет системы на сгенерированное воздействие.

Описанный алгоритм расчета был реализован для моста, построенного в г. Сочи. Расчетная схема моста приведена на рис. 10.

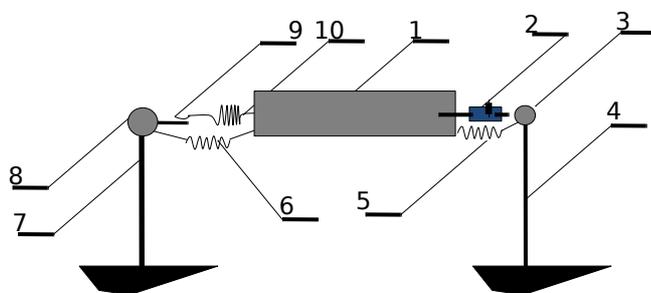


Рис. 10 – Расчетная схема для качественного анализа эффективности принятой системы защиты

1 – масса пролетного строения  $M_{span}$ ; 2 - вязкий демпфер с коэффициентом вязкого демпфирования  $b$ ; 3 – масса правой опоры  $M_{right}$ ; 4 – жесткость правой опоры  $C_{pier}^{(right)}$ ; 5 – вспомогательная жесткость  $C_{right}=200$  кН/м; 6 – вспомогательная жесткость  $C_{left}=145$  кН/м; 7 – жесткость левой опоры  $C_{pier}^{(left)}$ ; 8 – масса левой опоры  $M_{left}$ ; 9 – фрикционно-подвижное соединение (ФПС); 10 – упругий элемент

Рассматриваемая система имеет три степени свободы. Уравнение ее движения при горизонтальном возмущении имеет вид:

$$M\ddot{Y} + B_v\dot{Y} + B_h\ddot{Y} + CY = -M\ddot{Y}_0 + Q_1 + Q_2, \quad (34)$$

где  $M$  – матрица инерции;  $B_v$  – матрица вязкого демпфирования;  $B_h$  – матрица гистерезисного демпфирования;  $C$  – матрица жесткости;  $Q_1$  – вектор сил трения в открытых ДСТ;  $Q_2$  – вектор сил, вызванных остаточными смещениями в закрытых ДСТ.

Уравнение (34) было записано в безразмерных ускорениях, т.е. обе его части были поделены на пиковое ускорение  $Ag$ .

По результатам расчета были построены АЧХ пролетного строения и левой опоры моста при различных значениях относительного коэффициента трения (рисунки 11, 12). Эти значения были получены изменением величины  $A$  – ускорения в долях от ускорения свободного падения. АЧХ построены для следующих значений:  $A=0,1$ ;  $A=0,2$ ;  $A=0,4$ .

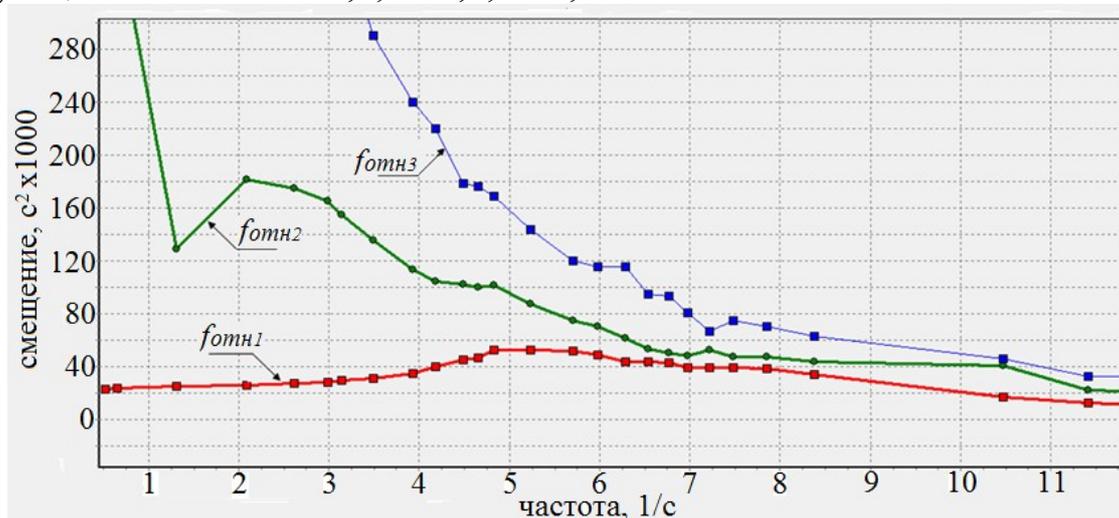


Рисунок 11 – АЧХ пролетного строения

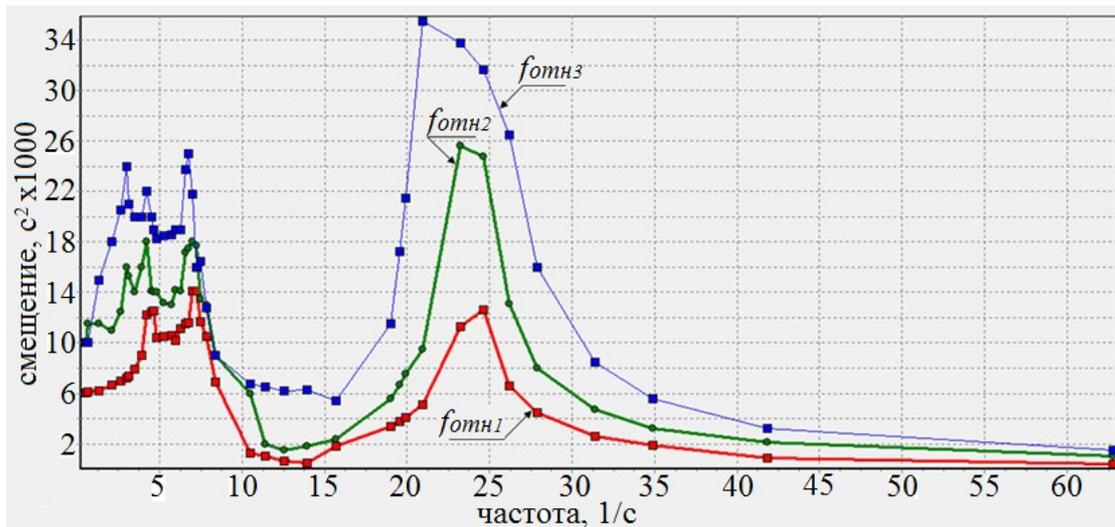


Рисунок 12 – АЧХ левой опоры

В соответствии с полученными АЧХ были построены графики зависимости опасной частоты воздействия  $\omega$  от относительного коэффициента трения  $f_{отн}$  (рисунок 13).

Далее был реализован описанный итерационный алгоритм расчета с использованием графика зависимости амплитуды воздействия от преобладающей частоты, приведенном на рисунке 14, и найдены опасные частоты для опоры и пролетного строения.

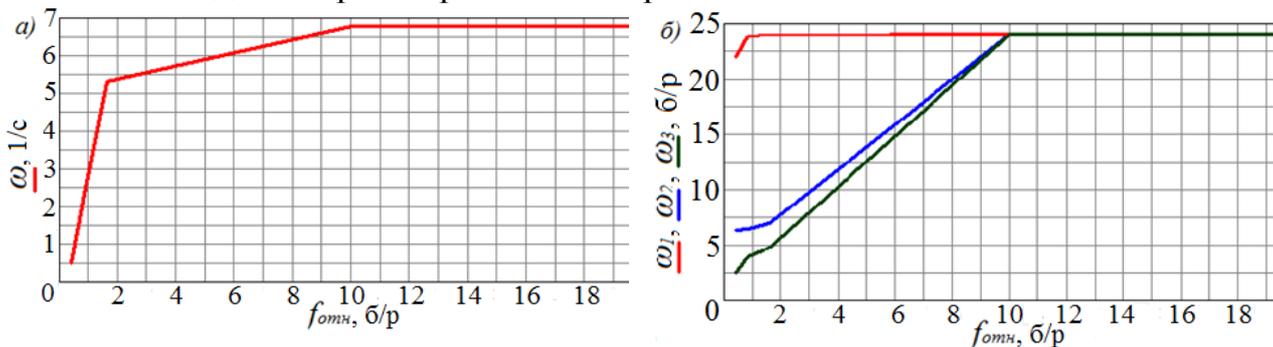


Рисунок 13 – График зависимости опасной частоты воздействия от относительного коэффициента трения: а) – для пролетного строения, б) – для левой опоры;  $\omega_1$  – опасная частота «правого пика» АЧХ;  $\omega_2$  – опасная частота правой вершины «левого пика» АЧХ;  $\omega_3$  – опасная частота левой вершины «левого пика» АЧХ.

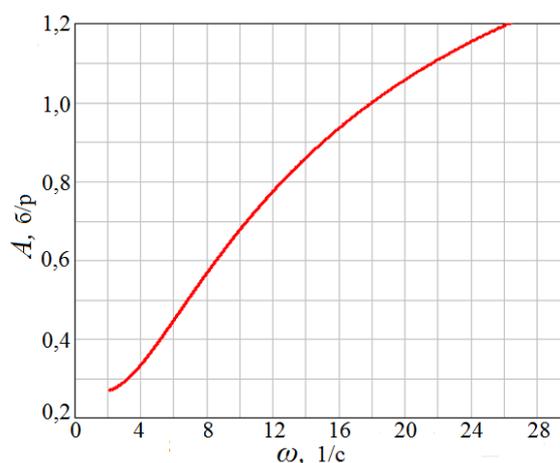


Рисунок 14 – Зависимость амплитуды воздействия от его преобладающей частоты (сейсмичность 9 баллов, вероятность превышения расчетной амплитуды 0,0021)

По методике, предложенной в настоящей диссертации, были сгенерированы воздействия с преобладающей опасной частотой. После этого были выполнены расчеты смещения пролетного строения относительно опор и смещения опоры на разные воздействия: на синтетическое воздействие, сгенерированное по указанной методике (span5acc), и на записанные акселерограммы разрушительных землетрясений прошлых лет (HOLLISTER2-9, HOLLISTER1-9, Tabas74, Tabas2). Полученные смещения приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2

Смещения пролетного строения относительно опор при различных воздействиях

Наименование воздействия	Смещение пролетного строения относительно опор, м
span5acc	0,391
Tabas2	0,315
Tabas74	0,254
HOLLISTER1-9	0,18
HOLLISTER2-9	0,065

Таблица 3

Смещения и ускорения левой опоры при различных воздействиях

Наименование воздействия	Смещение м	Ускорение, м/с <sup>2</sup>
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	0,04	15,5

правой вершины «левого пика»		
Акселерограмма, сгенерированная по опасной частоте для левой вершины «левого пика»	0,033	12,4

Таким образом, показано, что максимальные смещения пролетного строения, а также 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 опасной для рассматриваемого сооружения.

### III ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. Анализ состояния исследуемого вопроса показал, что в практике проектирования сложилась ситуация, затрудняющая применение сейсмоизоляции для защиты зданий и сооружений, а именно
  - нормативная ЛСМ не позволяет учесть нелинейные особенности сейсмоизоляции;
  - расчетные акселерограммы генерируются при изысканиях для площадки строительства и становятся доступными тогда, когда проектная работа должна быть завершена.
2. Получены формулы для определения эквивалентных жесткости и демпфирования сейсмоизолирующих устройств при предварительной оценке сейсмостойкости сейсмоизолированных сооружений с маятниковыми опорами и гидравлическим демпфером, что позволяет проводить расчеты таких сооружений по ЛСМ.
3. Разработана математическая модель для замены в расчетной схеме сооружения реального демпфера двумя демпферами: сухого и вязкого трения, что дает возможность реализовать динамический расчет сооружения с помощью известных программных средств.
4. Построен асимптотический портрет уравнения колебаний системы с демпферами сухого и вязкого трения, на котором выделены области параметров демпферов, в которых возможны упрощения исходного уравнения движения.
5. Установлены необходимые параметры демпфирования в системе с маятниковыми опорами и гидравлическим демпфером, исключаяющие возможность параметрического резонанса при одновременном воздействии на систему горизонтальной и вертикальной компонент сейсмического воздействия.
6. Разработана новая модель сейсмического воздействия, генерируемая для рассматриваемого сооружения и учитывающая особенности возможных очагов землетрясений (магнитуду, эпицентральное расстояние, глубину очага).
7. Разработана программа на языке C++ в среде Windows XP для реализации предлагаемой модели сейсмического воздействия.

8. Разработан итерационный алгоритм поиска опасных частот для нелинейных систем сейсмоизоляции, необходимых для генерации расчетного воздействия.

#### **Рекомендации к практическому применению:**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при проектировании сейсмоизолированных сооружений, выборе параметров сейсмозащитных устройств и оценке их эффективности.

Предлагаемая модель сейсмического воздействия может быть использована при типовом проектировании, так как предусматривает эксплуатацию сейсмоизолированного сооружения в любых сейсмогеологических условиях.

**Дальнейшая разработка темы** предусматривает развитие нормативной базы сейсмостойкого строительства с учетом выполненных исследований и распространение предложенных методов расчета на системы сейсмозащиты, не рассмотренные в настоящей диссертации.

### **IV ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

#### **Статьи, опубликованные в рекомендованных ВАК изданиях**

1. Авидон, Г.Э. Особенности применения маятниковых сейсмоизолирующих опор с гидравлическими демпферами для сейсмоизоляции зданий и сооружений в России [Текст] / Г.Э. Авидон, **Н.В. Дурсенева**, А.Д. Имамова, Е.С. Сергеева, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – №2. – С. 42-47 (0,75 п.л.).
2. Индейкин, А.В. Учет влияния вертикальной компоненты сейсмического воздействия на работу сейсмоизолированного сооружения с кинематическими фундаментами [Текст] / А.В. Индейкин, **Н.В. Дурсенева**, А.М. Уздин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 3 (16). – С. 107-111 (0,6 п.л.).
3. Белаш, Т.А. Использование асимптотического метода Б.Н. Квасникова для анализа уравнения колебаний с нелинейным сопротивлением [Текст] / Т.А. Белаш, А.А. Ермошин, **Н.В. Никонова**, А.М. Уздин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – №1 (38). – С. 56-63 (1,0 п.л.).
4. **Никонова, Н.В.** Особенности задания воздействия и расчета нелинейных систем сейсмоизоляции [Текст] / Н.В. Никонова // Известия Петербургского университета путей сообщения – 2016 – №3 – С.430-438 (0,5 п.л.).
5. **Никонова, Н.В.** Некоторые особенности проектирования сейсмоизоляции в условиях ограниченной информации о сейсмическом воздействии [Текст] / Н.В. Никонова // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – №6 – с. 40-42 (0,25 п.л.).
6. Vorobyova, K.V. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability [Текст] / K.V. Vorobyova, O.P. Nesterova, **N.V. Nikonova**, A.M. Uzdin, M.Yu. Fedorova // Materials Physics and Mechanics. – 2016. Vol. 26 (№1). – P. 57-60 (0,375 п.л.).

#### **Статьи, опубликованные в прочих изданиях**

7. **Дурсенева, Н.В.** Оценка сейсмостойкости специальных демпфированных систем [Текст] / Н.В. Дурсенева, А.М. Уздин, М.Ю. Федорова // VI Поляховские чтения. Международная конференция по механике, посвященная 95-летию со дня рождения С.В. Валландера. Избранные труды. – СПб. – С. 52-53 (0,25 п.л.).
8. Давыдова, Г.В. Моделирование демпфирующих устройств для численной оценки сейсмического риска [Текст] / Г.В. Давыдова, **Н.В. Дурсенева**, М.Ю. Федорова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2012. – №3. – С. 28-30 (0,375 п.л.).
9. **Дурсенева, Н.В.** Оценка уровня сейсмической нагрузки для расчета систем специальной сейсмозащиты инженерных сооружений с позиций теории надежности и сейсмического риска [Текст] / Н.В. Дурсенева // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2012. – №5. – С. 38-41 (0,5 п.л.).
10. **Дурсенева, Н.В.**, Применение сейсмоизоляции на ВСМ [Текст] / Н.В. Дурсенева, Т.В. Жгутова, А.А. Самойлова, М.Ю. Федорова // Дороги. Инновации в строительстве. – 2012. – №20. – С. 71-73 (0,375 п.л.).
11. **Дурсенева, Н.В.** Оценка влияния демпфирования на величину сейсмического риска сейсмоизолированных сооружений [Текст] / Н.В. Дурсенева, К.В. Воробьева, Б.В. Костенко, О.П. Нестерова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2013. – №4. – С. 43-47 (0,625 п.л.).
12. Benin, A.V. Peculiarities of calculating bridges with multilevel seismic protection against seismic loads [Текст] / A.V. Benin, G.A. Bogdanova, **N.V. Durseneva**, A.M. Uzdin // Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013). Vienna, Austria. – Paper No. 90 (0,4 п.л.).
13. Fedorova, M.Yu. The peculiarities of calculating seismic isolation systems with spherical bearings and hydraulic dampers [Текст] / M.Yu. Fedorova, A.V. Indeikin, I.O. Kuznetsova, **N.V. Durseneva**, A.M. Uzdin // Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013). Vienna, Austria. – Paper No. 102 (0,4 п.л.).
14. **Никонова, Н.В.** Модель сейсмического воздействия для расчета сооружений с учетом особенностей возможного очага землетрясений [Текст] / Н.В. Никонова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2014. – №4. – С. 23-27 (0,75 п.л.).
15. Ильясов, А.Б. Методы моделирования расчетных сейсмических воздействий и пути их совершенствования [Текст] / А.Б. Ильясов, А.М. Уздин, **Н.В. Никонова** // TÜRKMENISTANDA SEÝSMIKA PURNUKLY GURLUŞYGY KÄMILLEŞDIRMEK GURLUŞYK PUDAGYNYN ÜSTÜNLIKLI SYÝASATYNYŇ GIREWIDIR. Aşgabat, Ýlym. – 2014. – С. 129-147 (1,25 п.л.).
16. Fedorova, M.Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia [Текст] / M.Yu. Fedorova, A.V. Indeikin, I.O. Kuznetsova, **N.V. Durseneva**, A.M. Uzdin // Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2015. – Vol. 9. – P. 401-409 (1,0 п.л.).
17. Богданова, М.А. Числовые характеристики сейсмических воздействий [Текст] / М.А. Богданова, О.П. Нестерова, **Н.В. Никонова**, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин,

М. Рахманова, Т.М. Азаев, Х.Р. Зайнулабидова // Наука и мир. – 2017. – №3 (43), том 1. – С. 49-55 (0,75 п.л.).