

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I»

На правах рукописи

НЕСТЕРОВА ОЛЬГА ПАВЛОВНА

**ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ (ДГК) СИЛЬНО
ДЕМПФИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.23.17 – Строительная механика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Уздин А.М.

Санкт-Петербург - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА | 13 |
| 1.1. Краткие сведения по истории развития теории сейсмостойкости | 13 |
| 1.2. Методы специальной сейсмозащиты зданий и сооружений..... | 19 |
| 1.3. Обзор опыта применения ДГК в сейсмостойком строительстве | 27 |
| 1.4. Цель и метод исследований..... | 37 |
| 2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ В СООРУЖЕНИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДГК | 39 |
| 2.1. Подбор параметров ДГК с учетом демпфирования в сооружении | 39 |
| 2.2. Влияние демпфирования в сооружении на величину критической массы | 45 |
| 2.3. Особенности расчета сооружений с ДГК по линейно-спектральной методике | 49 |
| 2.4. Выводы по главе 2 | 60 |
| 3. РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ С ДГК ПО АКСЕЛЕРОГРАММАМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ..... | 63 |
| 3.1. Требования к расчетным акселерограммам при подборе параметров и оценке эффективности ДГК. Основные характеристики сейсмического воздействия | 66 |
| 3.2. Методика и программа генерации сейсмического воздействия..... | 76 |
| 3.3. Расчет сооружения с ДГК по акселерограммам землетрясений | 79 |
| 3.4. Выводы по главе 3 | 87 |
| 4. УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ ПОДБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ДГК И ОЦЕНКЕ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ | 91 |

| | |
|---|-----|
| 4.1. Модели нелинейной работы сооружения под воздействием разрушительных землетрясений..... | 91 |
| 4.2. Описание и анализ упругопластической работы сооружения с ДГК | 92 |
| 4.3. Анализ нелинейной работы системы с деградирующей жесткостью при наличии ДГК..... | 102 |
| 4.4. Выводы по главе 4..... | 113 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 116 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 120 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 139 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Более 20% России расположено в сейсмически опасных районах. Землетрясения приводят к большим человеческим жертвам и экономическим потерям. Так во время Ашхабадского землетрясения погибло 169 тысячи человек, а во время Спитакского - 34 тысячи. Землетрясения занимают первое место по числу человеческих жертв, и второе, после наводнений, по экономическому ущербу. В связи со сказанным, антисейсмическому усилению зданий и сооружений во всем мире уделяется большое внимание. Следует отметить, что сейсмические нагрузки существенно отличаются от других строительных нагрузок. Они не являются абсолютно внешними, а генерируются самим сооружением в результате сейсмических колебаний. Поэтому в практике сейсмостойкого строительства используется два подхода к повышению сейсмостойкости: традиционный и специальный. В первом случае увеличивают размеры элементов сооружения и их армирование для восприятия сейсмических нагрузок. А во втором случае целенаправленно изменяют динамическую схему сооружения для снижения самих динамических нагрузок. К специальным методам сейсмозащиты относят сейсмоизоляцию и сейсмогашение. Сейсмоизоляция в настоящее время получила достаточно широкое распространение. Она позволяет в 1,5-2,5 раза снизить сейсмические нагрузки. Однако её не всегда можно реализовать. Во-первых, это связано с большими перемещениями в уровне сейсмоизоляции, что затрудняет изготовление изолирующих опор. Во-вторых, достаточно сложно использовать сейсмоизоляцию для защиты существующих зданий. Второму способу сейсмозащиты – сейсмогашению посвящено меньше исследований и опыт его применения ограничен. Между тем, имеющиеся теоретические разработки показывают, что динамические гасители колебаний (ДГК) могут существенно снижать сейсмические нагрузки, а для сейсмоизолированных систем может снизить опасные смещения сейсмоизоляции. Однако теория ДГК разработана для систем с малым демпфированием, что затрудняет применение ДГК для снижения колебаний демпфированных систем, в частности, зданий и сооружений на слабых

грунтах, сооружений с неоднородным демпфированием в конструкциях, сооружениях с сейсмоизоляцией и т.п. В связи с изложенным, развитие теории и методов расчета сооружений с ДГК с учетом рассеяния энергии в сооружении представляется весьма актуальной задачей.

ДГК представляет собой массу, соединенную упругой связью с защищаемой системой. При определенном подборе жесткости и затухания в пружине ДГК можно добиться сильного снижения колебаний системы или полной ее остановки при приложении динамической нагрузки. Указанный эффект был обнаружен в конце XIX века. Он описан в работе полковника С. О. Макарова, который рекомендовал использовать его для защиты судов при волнении. Однако в мире открытие ДГК приписывают известному немецкому механику Х. Фраму, который подробно описал эффект ДГК, получил патент и реализовал данный принцип для снижения вибраций судов при спуске их со стапеля. Последующие 100 лет вопросами эффективности и настройки ДГК занимались многие специалисты Б. Г. Корнев, С. П. Тимошенко, Л. М. Резников, О. А. Савинов, В. С. Поляков. Эти исследования показали, что гасители малой массы требуют точной настройки и характеризуются большими амплитудами смещений при колебаниях. Это сильно усложняет конструкцию пружины ДГК и затрудняет их применение в строительной практике, где точная настройка может быть весьма затруднительной. В связи с этим многие специалисты предлагали переход к многомассовым гасителям или гасителям большой массы. Такие гасители предложены в работах А. А. Никитина, А. И. Цейтлина, А. М. Уздина, В. В. Сахаровой, С. А. Шульмана и др. Применение ДГК для снижения сейсмических нагрузок было предложено в работах Б. Г. Корнева, В. С. Полякова и Л. М. Резникова. Ими получены настройки ДГК при рассмотрении сейсмического воздействия как стационарного случайного процесса. ДГК большой массы в сейсмостойком строительстве рассмотрены в работах А. А. Никитина и А. И. Цейтлина. В частности, А. И. Цейтлин предложил в 1974 г. использование верхнего гибкого этажа в качестве ДГК здания. А. А. Никитин рассматривал задачу использования пролетного строения в качестве гасителя мостовых опор. А.

А. Никитиным и А. М. Уздиным впервые введено понятие критической массы гасителя. При массе гасителя больше критической эффект гашения отсутствует. А. А. Никитин полагал, что относительная критическая (отношение массы гасителя к массе сооружения) масса равна 2, а метод инвариантных точек неприменим для подбора параметров ДГК большой массы. Имеется успешное применение ДГК в строительной практике, например, монументальная скульптура Родина-Мать, поставленная во второй половине XX века в Киеве в виде женщины с мечом, посвященная победе во второй мировой войне, имела ДГК меча, который до установки гасителя сильно раскачивался при порывах ветра. ДГК, спроектированного под руководством Б. Г. Коренева, снабжена телебашня в городе Алма-Ата. Однако внедрение ДГК в практику строительства началось активно в последние 30 лет, прежде всего, при строительстве высотных зданий. Значительная часть зданий, построенных в Гуанчжоу, Гонконге, снабжены ДГК, которые предназначались для снижения ветровых нагрузок. При этом часть этих зданий расположена в высоко сейсмических районах. И гаситель должен снижать как ветровые, так и сейсмические нагрузки. Наибольшее развитие применения ДГК получило в Армении под руководством профессора М. Мелкумяна. В Гюмри построено больше 10 зданий с гибким верхним этажом, выступающим в роли ДГК. Так же им использовано ДГК для сейсмозащиты эксплуатируемых зданий старой постройки. Экспериментальные исследования показали, что использование ДГК снижает динамические нагрузки на защищаемые объекты в 1,5 - 1,8 раза. Хотя во многих случаях такое снижение оказывается вполне достаточным, оно существенно ниже, чем полученное в теоретических исследованиях. Такое различие связано с тем, что разработчики ДГК использовали настройки, полученные без учета демпфирования форм колебаний в защищаемом сооружении.

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать основную цель диссертационной работы - разработать методы расчета и подбора параметров сейсмостойких демпфированных систем с ДГК.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Установить особенности работы и настройки параметров ДГК для демпфированных систем при гармоническом воздействии.
2. Выявить влияние демпфирования в системе на параметры ДГК: настройку, демпфирование в пружине гасителя и критическую массу.
3. Разработать методы расчета демпфированных систем на сейсмические нагрузки при использовании линейно-спектральной методики (ЛСМ).
4. Проанализировать особенности расчета ДГК по ЛСМ и по акселерограммам землетрясений.
5. Оценить эффективность работы ДГК для гашения колебаний демпфированных систем при развитии повреждений в сооружении.

Объект исследования – динамические гасители колебаний сильно демпфированных систем.

Предмет исследования – методы расчета сильно демпфированных систем с ДГК.

Новизна результатов исследований:

1. Установлено влияние демпфирования в сооружении на настройку и демпфирование ДГК.
2. Показано существенное влияние демпфирования в системе на критическую массу ДГК; при этом впервые установлен количественный показатель, определяющий понятие критической массы.
3. Разработан вариант ЛСМ, позволяющий проводить расчеты систем с произвольным неоднородным демпфированием.
4. Обоснована эффективность ДГК для гашения сейсмических колебаний демпфированных систем.
5. Разработана методика задания расчетных акселерограмм для оценки эффективности и подбора параметров сооружений с ДГК.
6. Получены оценки эффективности ДГК для систем с повреждениями, в частности, показано уменьшение работы сил пластического деформирования для

упругопластических систем и уменьшение трещинообразования для систем с деградирующей жесткостью.

Для решения поставленных задач в диссертационном исследовании использовались методы математического моделирования сейсмических колебаний, строительной механики, динамики сооружений. Результаты исследований сопоставлялись с опубликованными результатами расчетов других авторов.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что впервые дано определение критической массы ДГК и установлена зависимость критической массы от демпфирования в сооружении. Разработан новый вариант линейно-спектральной теории для расчета сильно демпфированных систем с непропорциональным демпфированием.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в:

1. Обосновании эффективности использования ДГК для снижения колебаний сильно демпфированных систем, включая системы сейсмоизоляции.
2. Разработке варианта ЛСМ, позволяющего проводить инженерные расчеты для сильно демпфированных систем.
3. Разработке предложений по настройке ДГК для снижения повреждаемости при воздействии разрушительных землетрясений.

Достоверность результатов исследований подтверждается сопоставлением полученных результатов с опытом прошлых землетрясений и данными исследований, проведенными в этой области по отдельным вопросам. Для систем без затухания результаты расчета, предложенные автором, полностью совпадают с известными данными.

На защиту выносятся следующие положения, полученные в диссертации:

1. Наличие демпфирования в сооружении существенно влияет на методы исследования и параметры ДГК. При исследовании работы гасителя демпфированной системы не применим метод инвариантных точек, используемый в теории ДГК. Настройка гасителя с ростом затухания в защищаемой системе падает, а демпфирование в пружине гасителя растет.

2. В работе конкретизировано понятие критической массы гасителя и показана ее существенная зависимость от демпфирования в системе. С увеличением затухания в системе от 0% до 15% от критического значения, относительная критическая масса падает от 2 до 1. Ранее считалось, что относительная критическая масса равна двум.

3. Предложен вариант ЛСМ для сильно демпфированных систем с неоднородным демпфированием, использующий комплексные собственные числа и собственные векторы. Для пропорционального демпфирования предложенный вариант совпадает с существующим вариантом ЛСМ, использующим разложение уравнения движения по недемпфированным формам. А при малом демпфировании результаты предлагаемого расчета совпадают с полученными по нормативной ЛСМ.

4. Для оценки эффективности гасителя с использованием акселерограмм землетрясения необходимо применять различные расчетные записи землетрясения для системы с ДГК и без него. В расчетах ДГК на проектное землетрясение (ПЗ) необходимо обеспечивать кинематические характеристики расчетных воздействий: пиковые ускорения (PGA), коэффициент гармоничности и т.д. В расчетах ДГК на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ), вызывающее повреждение в сооружении, необходимо обеспечивать энергетические характеристики расчетных воздействий: интенсивность по Ариасу (I_A), абсолютную кумулятивную скорость (CAV), плотность сейсмической энергии (SED) и т.п.

5. Для подбора акселерограмм для расчета на МРЗ предложена новая энергетическая характеристика, использующая спектр работ сил пластического деформирования.

6. Настройка ДГК, полученная при гармоническом воздействии обеспечивает высокую эффективность ДГК в расчетах по акселерограммам землетрясений, при этом существенное снижение нагрузок имеет место при опасных резонансных сейсмических воздействиях. Для воздействий, преобладающий период которых не совпадает с собственной частотой колебаний

сооружения и нагрузки которых относительно не велики, ДГК может ухудшить работу системы.

7. ДГК, настройка которых получена при гармоническом воздействии, оказываются эффективными для уменьшения повреждения системы при разрушительных землетрясениях. При этом для систем с деградирующей жесткостью уменьшается трещинообразование, снижается показатель повреждаемости и рост периода колебаний в следствии трещинообразования. А для упругопластических систем снижается время нахождения системы за пределами упругости и работа сил пластического деформирования.

Апробация результатов

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на следующих конференциях и семинарах:

— XXVI Международной конференции. Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Санкт–Петербург 28–30 сентября 2015г;

— LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016;

— Научно-практической конференции по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Москва, 1-2 декабря 2016;

— LXXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2017;

— X международная конференция по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, Санкт-Петербург, 2017 г

— XXVII International Conference «Mathematical and Computer Simulation in Mechanics of Solids and Structures» MCM-2017. Fundamentals of static and dynamic fracture. Санкт-Петербург, 25-27 сентября 2017

— Международной научной конференции по механике. Восьмые Поляховские чтения: Санкт-Петербург, 30 января – 2 февраля 2018 г.

Результаты научного исследования были использованы в качестве учебно-методического материала на кафедре «Механика» в ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» и удостоены диплома «Победитель конкурса на соискание премии Правительства Санкт-Петербурга в области научно-педагогической деятельности в 2018 году» (диплом № 18018). Результаты научного исследования были удостоены диплома «Победитель конкурса грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2018 г.» (№18703).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, в том числе 7 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК и 6 статьях в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 140 страниц печатного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 173 источников, в том числе 50 на иностранном языке. В работе представлено 68 рисунков, 4 таблиц и 60 формул.

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

В первой главе представлен краткий обзор развития теории сейсмостойкости и методов сейсмозащиты зданий и сооружений. Проанализирована эффективность применения сейсмоизоляции и сейсмогашения. Приведен обзор методов расчета и обзор примеров применения ДГК в сейсмостойком строительстве.

Во второй главе приведен анализ влияния демпфирования в системе на параметры ДГК при гармонических колебаниях. Получены зависимости настройки демпфирования ДГК от демпфирования в защищаемой системе. Конкретизировано понятие критической массы и установлена ее связь с демпфированием в защищаемом сооружении. Разработан вариант ЛСМ для

расчета демпфированных систем с ДГК. И проведена оценка эффективности ДГК с использованием ЛСМ.

В третьей главе рассмотрены особенности расчета ДГК по акселерограммам землетрясений. При этом проанализированы кинематические, спектральные и энергетические характеристики. Даны рекомендации по подбору расчетных акселерограмм при оценке эффективности и подбору параметров ДГК демпфированных систем. Показано, что настройка ДГК, полученная при гармоническом воздействии, обеспечивает его эффективность и при воздействии акселерограмм.

В четвертой главе рассмотрена эффективность применения ДГК для снижения повреждения при воздействии разрушающих землетрясений. При этом рассмотрено две модели накопления повреждений: упругопластическая модель, в которой степень повреждения определяется работой сил пластического деформирования, и модель с деградирующей жесткостью, в которой повреждаемость определяется максимальным за историю нагружения перемещением, определяющим трещинообразование в системе. Показано, что ДГК с настройкой, полученной при гармоническом воздействии, позволяет существенно снизить время нахождения за пределами упругости (работу сил пластического деформирования) для упругопластических систем и трещинообразование и рост преобладающего периода колебаний для систем с деградирующей жесткостью

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследований.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА

1.1. Краткие сведения по истории развития теории сейсмостойкости

Возникновение теории сейсмостойкости связывают с исследованиями японского профессора Омори [159], который предложил, так называемую, статическую теорию сейсмостойкости и впервые оценил ускорения дневной поверхности при землетрясении. Согласно теории Омори сооружение нагружалось силами инерции:

$$S=mgA, \quad (1.1)$$

где S - сейсмическая сила,

g - ускорение свободного падения,

A - ускорение дневной поверхности в долях g .

Величину A Омори оценил, дифференцируя имеющиеся у него сейсмограммы, а также анализируя сдвиги памятников при сильных землетрясениях. По данным Омори величина A для 9-ти бального землетрясения составила $0,1g$, т.е. пиковое ускорение $Ag=1 \text{ м/с}^2$. С использованием статической теории сейсмостойкости были запроектированы и построены сотни сооружений в Японии, США и Италии. При этом оказалось, что сооружения, запроектированные по статической теории сейсмостойкости удовлетворительно перенесли ряд землетрясений, в то время как сооружения, запроектированные без учета действия сейсмических нагрузок, были разрушены [35].

В 1923 году японский ученый Сюзэиро [98] впервые замерил пиковые ускорения грунта (PGA) во время землетрясения Канто, которое составило около 4 м/с^2 . Кроме того он обосновал введение в формулу Омори коэффициента динамичности, который мог достигать величины 3 и более. В результате нагрузки по теории Сюзэиро более чем в 10 раз превосходили нагрузки, вычисленные по статической теории Омори. В результате возник основной парадокс теории сейсмостойкости: расчет зданий на пониженные сейсмические нагрузки с $PGA=1 \text{ м/с}^2$ приводили к разумным инженерным решениям, обеспечивающим в целом сейсмостойкость застройки, использование же фактических значений PGA

должно было привести к необходимости проектирования сверхтяжелых строительных конструкций, похожих на бомбоубежища.

Дальнейшее развитие теории сейсмостойкости было связано с созданием современной инструментальной базы для записи сейсмических воздействий. К началу 50х гг. прошлого века береговая служба США имела уже десятки акселерограмм сильных землетрясений. На их основе удалось построить так называемые спектры сейсмических воздействий, которые представляют собой зависимость отклика системы (ускорений, скоростей, смещений) от периода её колебаний. Характерный вид спектра показан на рисунке 1.1.

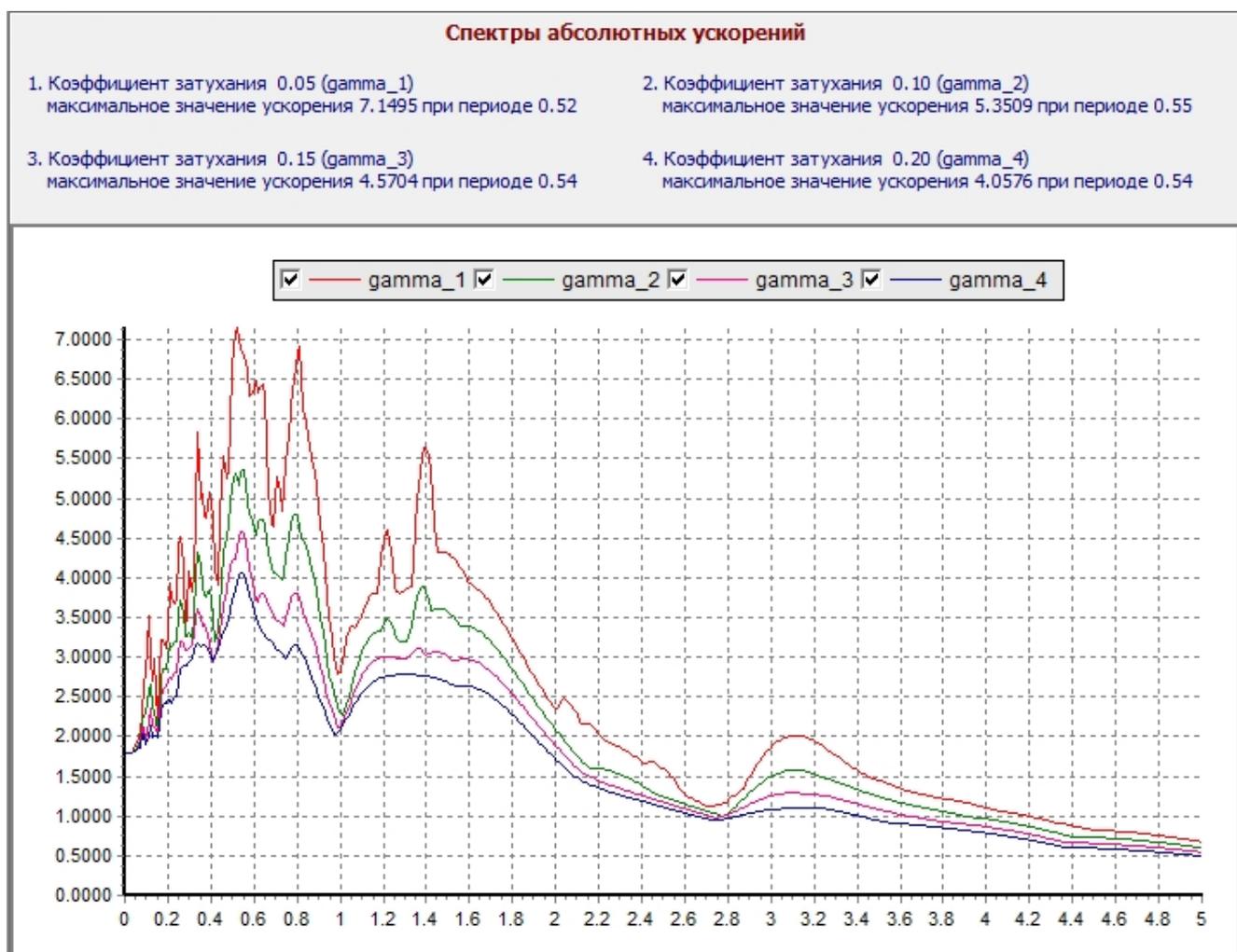


Рисунок 1.1. Спектр абсолютных ускорений землетрясения, произошедшего в поселке Чичи (Тайвань) в 1999 г.

Формула статической теории в результате преобразовывается к виду:

$$S=mgA\beta \quad (1.2.)$$

где β по терминологии российских норм - коэффициент динамичности, представляющий собой огибающую спектров ускорений возможных воздействий [35, 49, 50 и др.].

Линейно-спектральная теория (ЛСТ) сейсмостойкости, основанная на использовании спектров землетрясений и формуле 1.2, с середины 50х гг. внедряется во многих странах мира [43, 66, 72]. В СССР ЛСТ впервые использована в нормативном документе СН-8-57 [94], разработанных под руководством И.Л. Корчинского [49]. В указанных нормах вместо величины A использован коэффициент K_c – коэффициент сейсмичности. Также как и в теории Омори величина коэффициента была принята 0,1 для 9 баллов. И.Л. Корчинский высказал следующее мнение по этому вопросу: « K_c – наименее обоснованный параметр в расчетной формуле, принятой в СН-8-57. Неясно, что представляет собой расчетное ускорение $K_c g$. Является ли это ускорение наибольшим в землетрясении с определенной обеспеченностью, или характеризует какое-то среднее ускорение, необходимое для инженерных расчетов». При разработке нормативного документа И.Л. Корчинский использовал модель воздействия в виде затухающей синусоиды и принимал коэффициент неупругого сопротивления в сооружении $\gamma = 0.1$, в результате он получил β равное примерно 6 [49]. Эту величину сочли чрезмерно большой для проектирования. В связи с этим И.Л. Корчинский проанализировал повреждения нескольких кирпичных зданий, пострадавших в результате Ашхабадского землетрясения. На основе этого анализа И.Л. Корчинский снизил коэффициент β до 3, принимая при этом $K_c=0,1$. Таким образом, систему коэффициентов в нормах сейсмостойкого строительства можно считать в значительной мере эмпирической, основанной на опыте прошлых землетрясений.

С начала 70х гг. прошлого века во всем мире сделаны попытки ввести в нормы фактические значения PGA. Однако при этом вводится дополнительно

коэффициент K_1 , который называется коэффициентом редукции. При этом расчетная формула для сейсмических сил принимает вид:

$$S=mgA\beta K_1 \quad (1.3)$$

В литературе появилось несколько трактовок введения этого коэффициента. Первая трактовка, наиболее четко изложенная в работах И.И. Гольденבלата и С.В. Полякова [27], исходит из того, что сильные землетрясения имеют малую повторяемость раз в тысячу, раз в пять тысяч лет, в то время как другие нагрузки имеют повторяемость раз в 100 раз 300 лет. Поэтому в расчетах необходимо учитывать не редкое сильное землетрясение, а некоторое более слабое землетрясение, соответствующее повторяемости других расчетных нагрузок. Тогда коэффициент K_1 – коэффициент перехода от сильного к слабому расчетному землетрясению. При этом как отмечается [27], предполагается, что усиление конструкции, обеспечивающее ее безаварийную работу при слабых воздействиях, исключит обрушение конструкции при разрушительном землетрясении, хотя разного рода повреждения сооружения при сильном воздействии будут иметь место.

Вторая трактовка [67] исходит из того, что необходимо производить расчет на сильное редкое воздействие, при этом допустимые нагрузки на сооружение могут быть увеличены. Вместо увеличения допустимых нагрузок вводится обратный коэффициент к сейсмическим нагрузкам. В настоящее время эта трактовка развита, прежде всего, в работах зарубежных специалистов [132, 164], и детально проанализирована в ряде работ, в том числе в работе, опубликованной при участии автора [16].

Третья трактовка введена И.Л. Корчинским, она исходит из того, что расчет производится на сильное землетрясение, однако в сооружении допускаются повреждения, и разрушение сооружения связано не с пиковыми ускорениями, а с работой сил пластического деформирования. С точки зрения работы, определяющим, по мнению И.Л. Корчинского, являются не пиковые значения ускорения, а среднее значения пиков в процессе колебаний. Оценка отношения

среднего пикового ускорения к максимальному имеется в работе И.Л. Корчинского и Т.Ж. Жунусова [48], и составляет величину 0,25.

Разрешить основное противоречие теории сейсмостойкости удалось лишь в последние 15 лет, через 100 лет после предложения Омори. Это оказалось возможным в связи с переходом к многоуровневому проектированию, или проектированию конструкций с заданными параметрами предельных состояний [6, 41, 134, 160]. За рубежом этот подход получил название проектирование поведения (performance based designing или PBD). В соответствии с этим подходом должна выполняться серия расчетов конструкции при разных предельных состояниях и разных уровнях нагрузки, как минимум должно рассматриваться два предельных состояния и два уровня нагрузки. При слабых частых землетрясениях (проектное землетрясение или ПЗ) сооружение должно работать в штатном режиме, нарушение эксплуатационных свойств конструкции в этом случае рассматривается как предельное состояние и называется serviceability limit state (SLS). При сильных разрушительных землетрясениях (максимальное расчетное землетрясение или МРЗ) необходимо исключить малоцикловую усталость или прогрессивное обрушение основных несущих конструкций [27, 57]. Соответствующее МРЗ предельное состояние называется ultimate limit state (ULS). Многоуровневое проектирование является базовым в Еврокоде 8 [135, 136]. Один из основоположников Еврокода М.Н. Фардис рассматривал три предельных состояния и три уровня воздействия [139]. Кроме ПЗ и МРЗ он предлагал рассматривать умеренное землетрясение (moderate) с умеренным количеством повреждений. Современные нормы Италии [152] используют 4 предельных состояния: Operation limit state, Damage limit state, Ultimate limit state и Collapse limit state с соответствующими повторяемостями примерно раз в 21, 35, 300 и 700 лет.

К сожалению, переход к многоуровневому проектированию осуществляется медленно, даже в Европе, Китае и Японии, где он рекомендован нормами в качестве основного. Чтобы осуществить такой переход необходимо строго регламентировать каждый уровень воздействия (уровень расчетных ускорений) и

соответствующее этому уровню воздействия предельное состояние. Провести соответствия между уровнями фактических ускорений, уровнями расчетных воздействий и параметрами существующих норм довольно сложно. Используемая в качестве основной в строительных нормах характеристика воздействия – PGA, - попало в номы разных стран из инструментальной части шкалы балльности MSK-64 и составляет 1, 2 и 4 м/с² для 7, 8 и 9 баллов соответственно. Такие же ускорения фигурируют и в отечественном стандарте института физики земли (ИФЗ) [28]. Эти данные не соответствуют опыту прошлых землетрясений [19, 61, 107] и в настоящее время пересматриваются. В работе Ф.Ф. Аптикаева [12] предлагается ввести шкалу с дробным баллом, где землетрясению силой 9 баллов соответствует ускорение 7 м/с². Данные Ф.Ф. Аптикаева вошли в последний ГОСТ [29], но не могут быть использованы в нормах проектирования, в которых коэффициент динамичности увязан со старым значением ускорений. Аналогичная ситуация складывается и в зарубежных нормах. В европейской шкале балльности [144] вообще отсутствует инструментальная часть. В США предлагают отказаться от характеристики землетрясений с использованием PGA, а рекомендуют переходить на энергетические характеристики воздействий, в частности, на использование абсолютной кумулятивной скорости CAV.

В связи со сказанным во многих странах, в частности и в России, переход к многоуровневому проектированию задерживается. Основным остается нормативный расчет по ЛСТ с коэффициентами, полученными, по существу, эмпирически. Такой расчет удовлетворительно зарекомендовал себя для объектов массового строительства [86, 105], однако в силу построения системы расчетных коэффициентов нормативный вариант ЛСТ может приводить к серьезным ошибкам при проектировании других сооружений: высотных зданий, больших мостов, систем специальной сейсмозащиты и т.п. Расчет и проектирование специальной сейсмозащиты (сейсмоизоляции и сейсмогашения) стал особенно актуален в последние 20 лет. Применение таких систем обусловлено тем, что сейсмические нагрузки не являются чисто внешними, а создаются самой системой во время колебаний. Т.е. при проектировании зданий и сооружений со

специальной сейсмозащитой можно изменять величину сейсмической нагрузки путем изменения динамических свойств исследуемой системы. Для проектирования таких систем в существующих нормах отсутствуют рекомендации по расчету сейсмических нагрузок в связи с отсутствием опытных данных. Поэтому для проектирования сооружений со специальной сейсмозащитой требуется уточнение нормативной методики расчета. Специальные способы сейсмозащиты, эффективность их применения и опыт их реализации рассмотрены ниже.

1.2. Методы специальной сейсмозащиты зданий и сооружений

Как уже сказано выше, специальные методы сейсмозащиты позволяют изменять величину сейсмической нагрузки, в связи с чем приобретают широкое распространение, особенно, при строительстве на площадках с бальностью 8 и выше. Вопросам по изучению методов специальной сейсмозащиты посвящена многочисленная литература [1-5, 15, 36, 82-84, 106, 149 и др.]. На рисунке 1.2. показана классификация систем специальной сейсмозащиты. Системы специальной сейсмозащиты можно подразделить на две категории – сейсмогашение и сейсмоизоляция.

Системы сейсмогашения, как понятно из названия, предусматривают присутствие в системе специальных устройств демпфирования, которые используются в одном случае независимо [34], в другом при устройстве ДГК параллельно с упругой связью, соединяющей массу гасителя с защищаемым сооружением [121, 153, 155 и др.].

Сейсмоизоляция является наиболее распространенным специальным средством сейсмозащиты зданий. В настоящее время во всем мире построено более 5000 сейсмоизолированных зданий. Лидирующими в области сейсмоизоляции являются Китай [153], Япония [122], Италия [127, 156], Новая Зеландия [125, 167] а также Армения [157]. В России построено более 600 сейсмоизолированных зданий [107]. С использованием сейсмоизоляции

возводятся не только гражданские здания, но и мосты [109], резервуары [126] и АЭС [9, 127, 162].

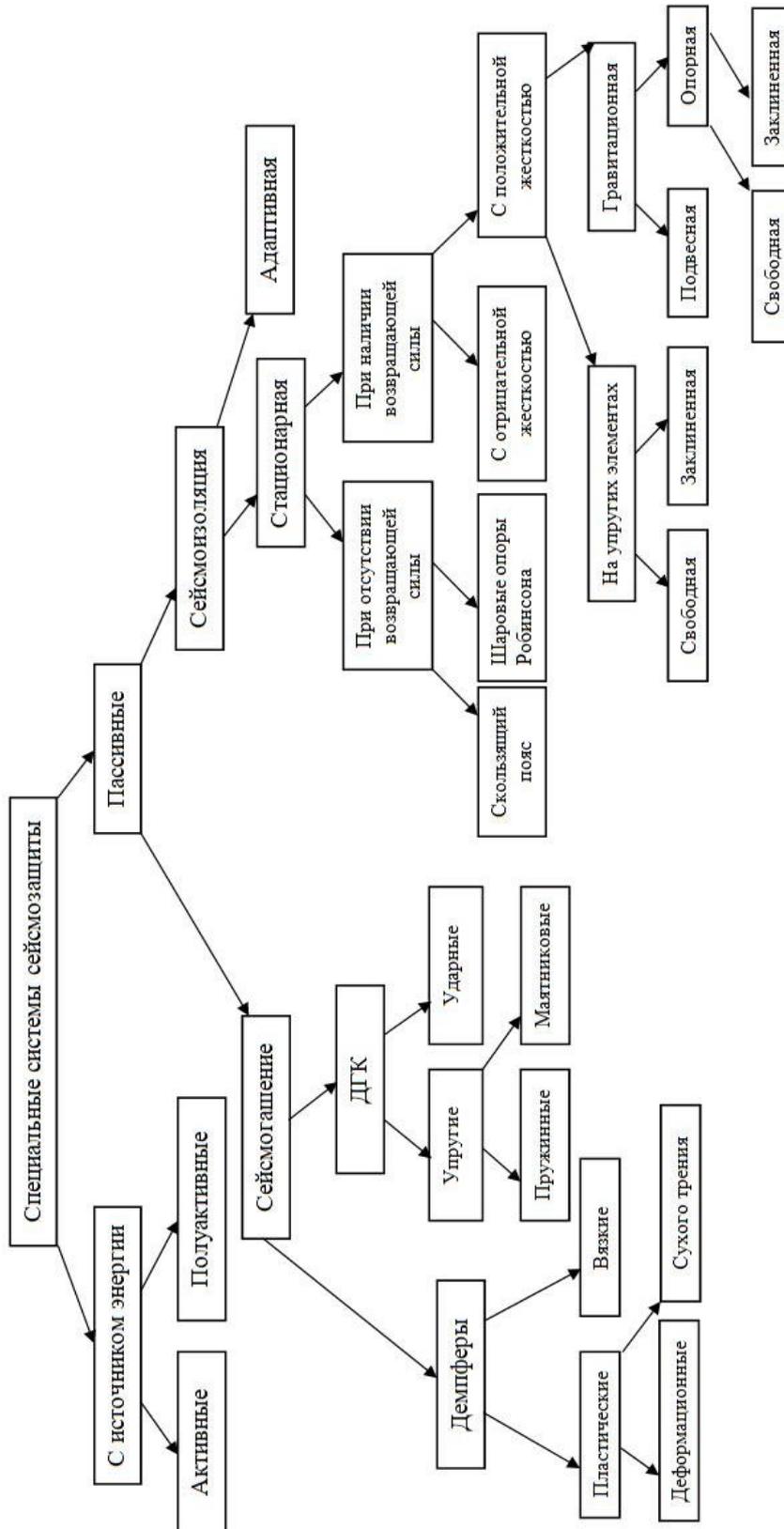


Рисунок 1.2. Классификация специальных систем сейсмозащиты

Вопросам использования сейсмоизоляции для защиты зданий и сооружений посвящено более десятка монографий. Детальная классификация систем сейсмоизоляции дана в работах Р. Скиннера, В Робинсона и Г. МакВерри [167], О.А. Савинова [82], Т.А. Белаш, С.В. Елизарова и А.М. Уздина [107], Дж. Келли [149], Я.М. Айзенберга и др. [7] и других авторов [58, 118].

Системами сейсмоизоляции принято считать системы, которые уменьшают энергию, сообщаемую сооружению при действии землетрясения. Уменьшение передачи энергии осуществляется путем установки компонентов повышенной податливости между сооружением и фундаментом, приводящих к отстройке спектра защищаемого сооружения от спектра землетрясения.

Системы сейсмоизоляции обеспечивают существенное снижение сейсмических нагрузок на защищаемое сооружение, но при этом происходят значительные смещения защищаемого сооружения относительно фундамента. Такие смещения могут приводить к сбросу сооружения с опор и его обрушению. Чтобы ограничить эти смещения необходимо вводить демпфирующие элементы. Вопросы введения высокого демпфирования параллельно с элементами сейсмоизоляции рассмотрены в работах профессора О.А.Савинова [82] и его учеников [83, 84, 106] и остаются обсуждаемыми до настоящего времени [169]. Необходимость введения демпфирующих элементов параллельно с элементами сейсмоизоляции объясняется двумя причинами, которые раскрыты в приведенных работах и подробно рассмотрены в монографии [111].

Первая причина обусловлена ограниченностью информации о землетрясении. Реальные сейсмические воздействия по природе явления поличастотные, т.е. в состав воздействия входят высоко- и низкочастотные компоненты. Для примера, характеризующего такие воздействия, можно привести землетрясение в Бухаресте 1977г. В Бухаресте произошло землетрясение с преобладающим периодом 1,7 с, в то время как здания в этом городе построены слабо демпфированными с гибким первым этажом, с периодом колебаний $1,5 \div 2$ с. В результате, землетрясение оказалось резонансным для запроектированных зданий из-за чего постройки полностью разрушились [107, 111].

Вторая причина обусловлена особенностью колебаний систем с сейсмоизоляцией. При больших смещениях таких систем возникает существенная нелинейность колебаний [45, 107]. В случае нелинейной работы сооружения амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) становится многозначной (рисунок 1.3.а).

Из рисунка 1.3.а видно, при $\omega = \omega_u$ возможны три различных режима колебаний системы, из которых режимы, соответствующие точкам 1 и 3 являются устойчивыми [45]. Если использовать линейную теорию колебаний, то по АЧХ частоте $\omega = \omega_u$ будет соответствовать единственная точка 1, по которой и будет запроектирована сейсмоизоляция. А при землетрясении может реализоваться точка 3, т.е. амплитуда в разы превысит запроектированную. Чтобы исключить многозначность АЧХ необходимо существенно увеличить демпфирование (Рисунок 1.3.б).

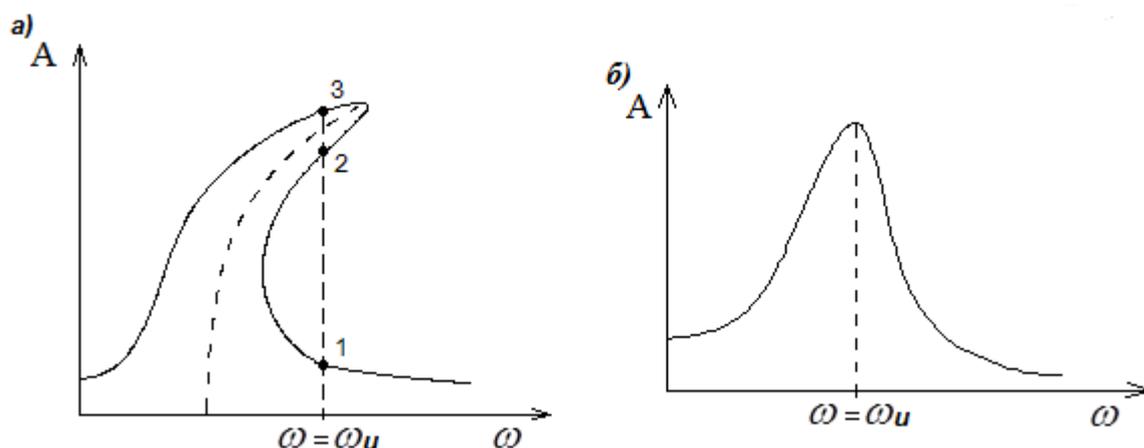


Рисунок 1.3 – Амплитудно- частотные характеристики колебаний:

а) – при колебаниях нелинейной системы; б) – при колебаниях линейной системы

В настоящий момент можно сказать, что необходимость введения элементов демпфирования для увеличения затухания в системах сейсмоизоляции общепризнанна. В мировой практике наиболее широкое распространение для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений получили системы сейсмоизоляции с применением резинометаллических опорных частей (РОЧ),

плоских скользящих опор, пружинных изоляторов и скользящих маятниковых опор.

К примерам применения РОЧ при строительстве зданий можно отнести такие ответственные сооружения, как АЭС в Карно (Франция) и Койберг (Южной Африке) [9, 162]. В РФ были использованы РОЧ для сейсмоизоляции здания банка в г. Иркутске [8]. Для РОЧ коэффициент неупругого сопротивления составляет $0,12 \div 0,15$ [82, 149], поэтому обычно в данных опорах дополнительно увеличивают затухание, добавляя свинцовые сердечники [107, 149, 167]. Пример РОЧ со свинцовым сердечником приведен на рисунке 1.4.

Сейсмоизолирующие фундаменты с использованием кинематических опор гравитационного типа (КО) широко используются и описаны в монографиях [106, 109, 111]. В качестве примера такой системы сейсмоизоляции рассмотрена маятниковая скользящая опора (рисунок 1.5). Принцип её действия приведен на рисунке 1.6.

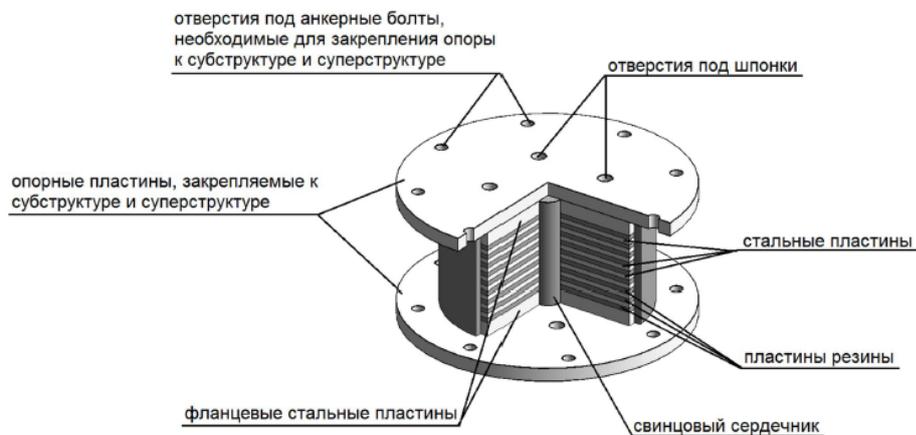


Рисунок 1.4. РОЧ со свинцовым сердечником.

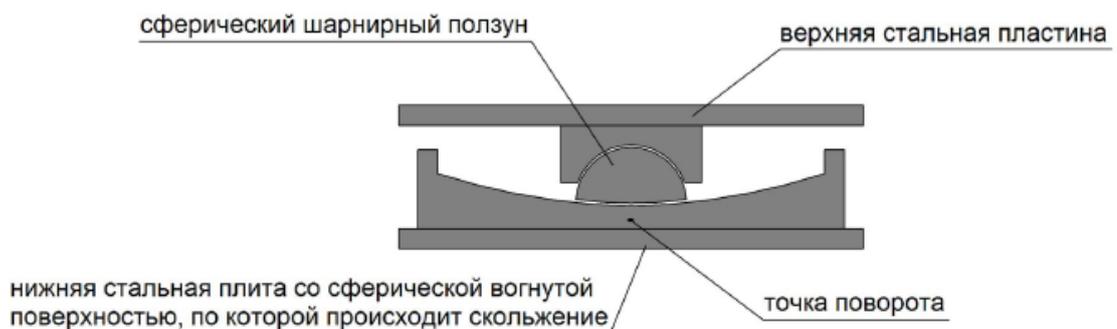


Рисунок 1.5. Схема маятниковой скользящей опоры

Данная опорная часть включает две горизонтальные металлические пластины, одна из которых имеет сферическую поверхность и жесткий промежуточный элемент, именуемый сферическим шарнирным ползуном.

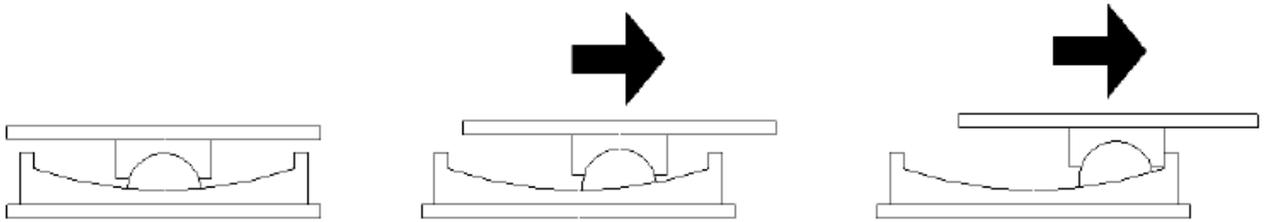


Рисунок 1.6. Принцип работы маятниковой скользящей опоры

В большинстве случаев затухания самих элементов сейсмоизоляции недостаточно для ограничения смещений защищаемой системы, поэтому параллельно с сейсмоизолирующими элементами устанавливают разного рода демпферы. Например, энергия в гистерезисных демпферах, сообщаемая системе, преобразуется в тепло за счет сил пластического деформирования в конструкции демпфера. Устройство гистерезисного демпфера по данным [107] приведен на рисунке 1.7, а устройство гидравлического демпфера фирмы Маурер – на рисунке 1.8.

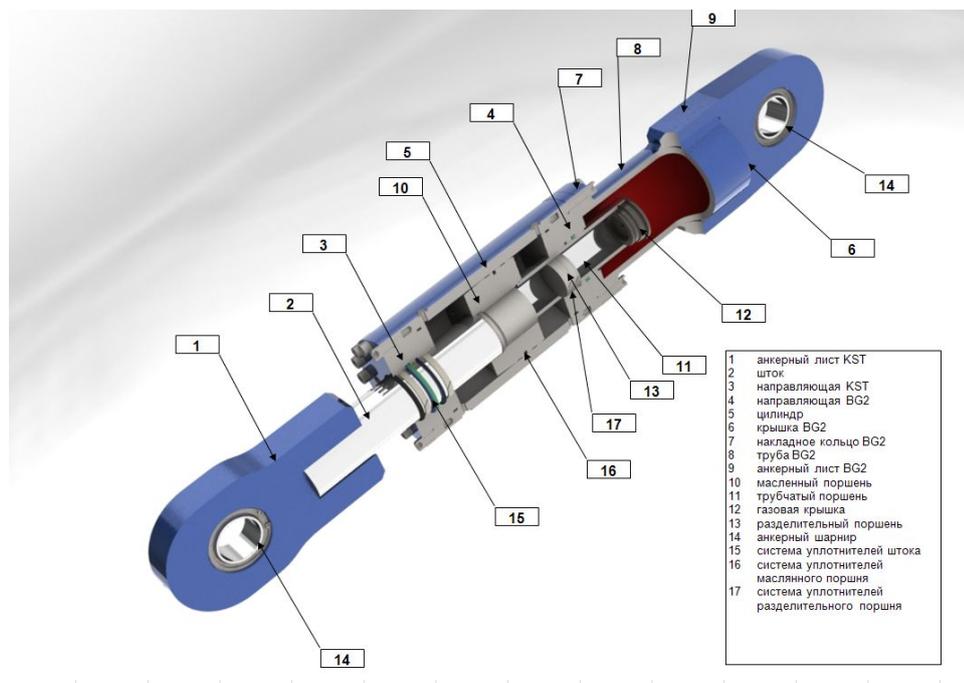


Рисунок 1.7. Устройство гидравлического демпфирующего устройства фирмы Maurer Söhne Повтор

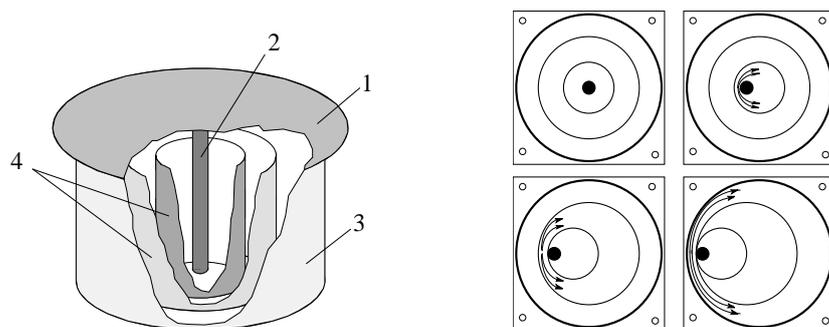


Рисунок 1.8. Вязкий демпфер системы Костарева-Ветошкина:

а - общий вид; б - стадии работы.

Часть представленных демпферов описывается в специальной литературе силами вязкого сопротивления $Q = -b\dot{u}$. Часто для описания затухания применяется модель сухого трения, вместо которого затем рассматривают эквивалентное вязкое [107]. Необходимо отметить, что параметры вязкого сопротивления всегда характеризуются большим демпфированием, превышающим 15% от критического (коэффициент неупругого сопротивления $> 0,3$). Между тем для весомой части демпфирующих элементов модель вязкого трения становится неприемлемой, из-за чего необходимо использовать модель более общего характера [82]:

$$F = -C|V|^\alpha \text{sign} V \quad (1.4)$$

где F – реактивное усилие в гидравлических устройствах;

C – постоянный коэффициент;

V – скорость перемещения штока;

α - параметр демпфирования, определяющий конструкцию демпфирующего устройства; при $\alpha = 1$ должно быть обеспечено чисто вязкое демпфирование, а при $\alpha = 0$ – сухое трение; в среднем $\alpha \geq 0,015$.

К сожалению, действующие нормативные документы не регламентируют расчета даже линейных систем с затуханием. В большей части нормативной базы затухание предписывается учитывать с помощью коэффициента K_ψ , путем умножения на этот коэффициент сейсмических нагрузок. Значение коэффициента K_ψ в нормативных документах не связывают с фактическим затуханием в

конструкциях зданий и сооружений, а определяется исходя из опыта прошлых землетрясений для зданий и сооружений в целом. Например, для высоких гибких зданий и сооружений значение коэффициента K_{Ψ} принимается равным 1.5, а для зданий и сооружений из грунтовых материалов - $K_{\Psi}=0,7$ [70]. В 1965г. Ш.Г. Напитваридзе была предложена формула $K_{\Psi} = \sqrt{\frac{1}{\gamma}}$ для учета затухания в системе с одной степенью свободы [54], но приведенная формула с нормами не была увязана. В работе [82] была предложена формула $K_{\Psi} = \sqrt{\frac{\gamma_{эм}}{\gamma}}$ для связи приведенной формулы с нормативной документацией. В приведенной формуле $\gamma_{эм}$ – эталонное значение коэффициента неупругого сопротивления для зданий и сооружений массового строительства.

По приведенной формуле можно учесть затухание по формам колебаний при расчете по линейно-спектральной методике (ЛСМ). Однако для зданий и сооружений с устройством сейсмоизоляции такой расчет на данный момент практически не применим. Для учета же более сложного демпфирования необходимо пользоваться прямым динамическим расчетом по акселерограммам землетрясений. В литературе особенности динамического расчета для систем с сейсмоизоляцией не приведены. Для каждого конкретного здания или сооружения разрабатываются специальные технические условия (СТУ). Сформировавшаяся ситуация усложняет широкое распространение систем сейсмоизоляции.

Применение ДГК широко распространено в машиностроении. Использование ДГК позволяет в ряде случаев ощутимо снизить уровень колебаний разных объектов. Отличительной особенностью использования ДГК в машиностроении является известная частота, производимая самим объектом вибрационных. Применение ДГК для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений требует учета специфики воздействия землетрясения и самих систем. В результате различных исследований разработаны системы ДГК, предназначенных для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений разного типа.

Принцип работы ДГК заключается в перераспределении энергии, сообщаемой защищаемому объекту в результате действия землетрясения, за счет присоединения к массе защищаемого сооружения с помощью упругих связей дополнительной массы или нескольких дополнительных масс, которые при оптимальной настройке (парциальной частоте и демпфировании связи) эффективно снижают колебания основного защищаемой системы. Принципы ДГК подробно изучены в разделах теории колебаний, однако использование ДГК при сейсмостойком строительстве требует внесения корректировок, учитывающих специфику воздействия землетрясений и особенности защищаемых систем, во многие положения классической теории динамических гасителей.

Результаты исследований и некоторые рекомендации по выбору их параметров и конструкций представлены в работах в следующем параграфе.

1.3. Обзор опыта применения ДГК в сейсмостойком строительстве

Первые публикации об эффекте динамического гашения колебаний относятся к концу XIX века [53, 172]. В России разработкой различных типов конструкций цистерн, снижающих колебания кораблей, занимался адмирал С.О. Макаров [53]. Однако принято считать, что динамические гасители колебаний были предложены и запатентованы Х. Фрамом в 1909 г. [141, 142]. Его имя носят цистерны для снижения колебаний кораблей. В последующие 100 лет вопросами оптимизации и проектирования ДГК занимались многие выдающиеся специалисты в области механики и теории колебаний. Здесь можно отметить исследования О.А.Савинова [81], С.П.Тимошенко [99], Г. Варбуртона [171], Б.Г.Коренева и Л.М.Резникова [46, 47], И.В. Ананьева [11], Дж. П. Ден-Гартога [30], В.С. Полякова [46, 71, 73], М.Г. Мелкумяна [54, 157], Шульмана С.Г. И Альберта И.У. [119], Г.А. Богдановой [17, 20] и других специалистов [143, 154, 155].

Простейшая схема системы с ДГК, состоящего из одной массы, представлена на рисунке 1.9 ДГК представляет собой инерционную массу m_g , соединенную с защищаемой системой линейно-упругой связью с коэффициентом

жесткости c_r и линейно-вязким демпфером с коэффициентом вязкого трения B_r [119, 237]. В идеале параметры гасителя (относительная масса $\nu = m_r/m$, настройка $f = k_r/k$, и коэффициент неупругого сопротивления линейной связи γ_r) можно подобрать так, что при гармоническом воздействии колебания защищаемого объекта прекратятся.

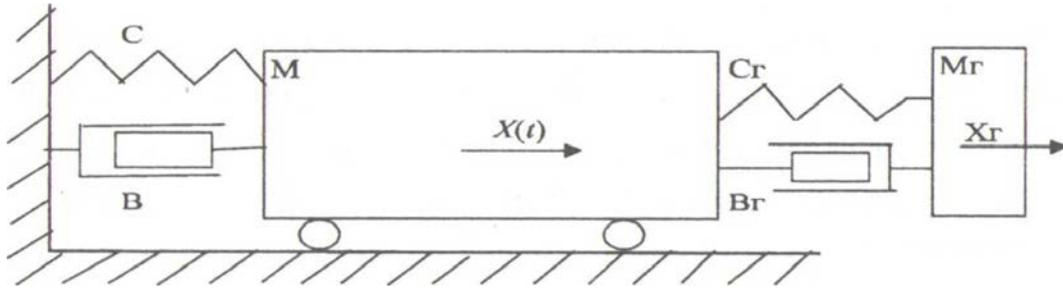


Рисунок 1.9. Простейшая схема динамического одномассного гасителя

При исследовании систем с ДГК для защиты строительных конструкций от динамических воздействий ученые столкнулись с рядом трудностей. К ним относятся

- 1) Неопределенность динамического воздействия, прежде всего, сейсмического
- 2) Неопределенность предельных состояний. Возможность работы конструкции за пределами упругости. Отсюда – неопределенность целевой функции для подбора параметров ДГК.
- 3) Сложность обеспечения стабильных параметров ДГК.
- 4) Возможность большого демпфирования в системе, при повреждениях в конструкциях защищаемого сооружения, и при применении в сооружении специальных демпфирующих устройств.
- 5) Увязка теоретических исследований с нормативными расчетами.

Как было сказано ранее, ДГК изначально использовались для защиты кораблей, при их спуске со стапеля. Также ДГК начали широко применяться в машиностроении, где часто возникают динамические нагрузки на разные

объекты, механизмы, фундаментные конструкции или несущие конструкций сооружений. Такие нагрузки являются чисто внешними, что отличает их от внешних воздействий природного характера – ветровых и сейсмических. При воздействии ветра или землетрясения заранее неизвестно, какой будет частота воздействия. Поэтому предлагается настраивать парциальную частоту колебаний гасителя на частоту основного тона колебаний сооружения. Такая настройка предлагается в предположении, что наиболее опасным будет сейсмическое воздействие резонансное, т.е. частота воздействия равна частоте основного тона колебаний сооружения [111]. Так же неизвестно, как задавать сейсмическое воздействие. В известных исследованиях оно принималось в виде случайного стационарного процесса [21, 47] или в виде нестационарного процесса [1, 5, 47]. До настоящего времени не ясно, как задавать параметры таких процессов. В большинстве работ определяющим принималось пиковое ускорение (PGA), которое задавалось по шкале балльности [1, 5, 17]. Однако само значение PGA не вполне понятно. В действующих строительных нормах [97] для 9 балльных воздействий $PGA=4 \text{ м/с}^2$, а по ГОСТ [29]- 7 м/с^2 . Например, в работе Сорокиной Г.В. показано, что для традиционного задания случайного воздействия в виде произведения стационарного процесса на некоторую огибающую удается обеспечить только средние значения PGA, а смещения при этом принимают неестественно маленькие значения [107]. Кроме того, при таком моделировании невозможно учесть энергетические характеристики воздействия. Этот вопрос по настоящее время является дискуссионным.

Следующая проблема состоит в задании предельных состояний. Проводимые ранее исследования исходили из того, что защищаемое сооружение работает упруго. Изучая упруго работающую систему с ДГК, исследователи подбирали параметры гасителя так, чтобы ускорения защищаемого объекта или его смещения снижались. В своих работах ученые для подбора оптимальных параметров ДГК пользовались методом инвариантных точек (рисунок 1.10). Метод инвариантных точек исходит из того, что все АЧХ системы с разным демпфированием в связи гасителя пересекаются в двух точках S и T, которые не

зависят от величины демпфирования в пружине гасителя и называются инвариантными.

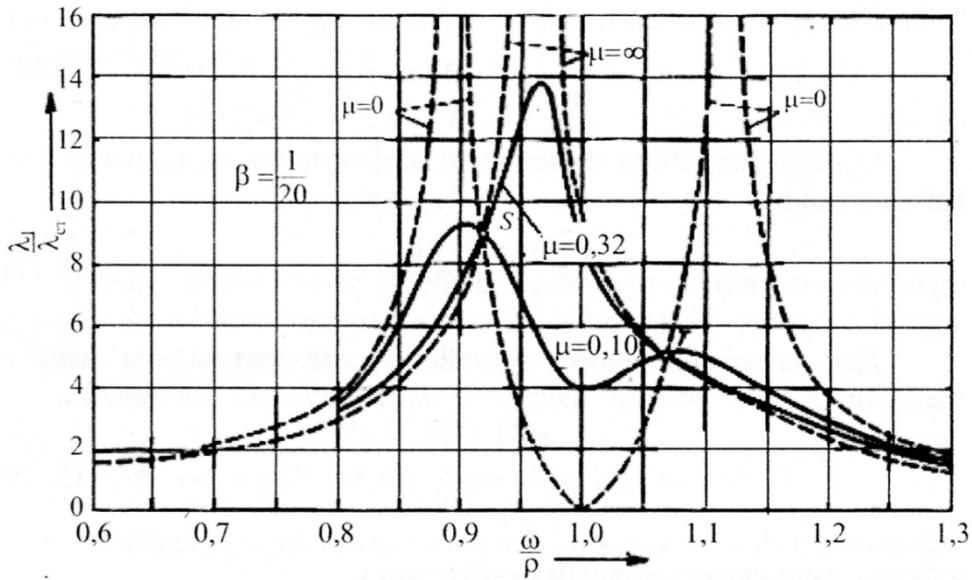


Рисунок 1.10. АЧХ линейных одномассных гасителей

Для задач сейсмостойкого строительства изложенный подход совершенно неприемлем. Для демпфированных систем инвариантные точки отсутствуют. Однако самое важное это нелинейность работы защищаемого объекта. Снижение перемещений и/или ускорений не может характеризовать сейсмостойкость сооружения. Для упругопластических тел сохранность при периодических нагрузках связана с исключением их малоциклового усталости или прогрессивного обрушения [27, 57], а для адаптивных систем – с падением жесткости. Эти показатели не определяются максимальными смещениями или ускорениями сооружения. Таким образом, возникает необходимость оценки эффективности ДГК для нелинейно-деформируемого объекта, что связано с некоторыми сложностями. Во-первых, мало проработаны модели работы зданий в нелинейной стадии. В настоящий момент наиболее распространенными являются две модели нелинейности: упруго-пластическая модель нелинейности [27, 56], и модель с деградирующей жесткостью и зависимостью поведения от общей истории нагружения [4, 7, 10].

В упругопластической модели в элементах конструкции возникают пластические деформации, а при разгрузке элемент восстанавливает свои свойства. К числу таких диаграмм относятся диаграмма Прандтля, с упрочнением, диаграмма Рамберга-Осгуда и др.

К числу моделей с деградирующей жесткостью относятся модель Кирикова – Аманкулова. В ней поведение сооружения зависит от максимального за историю нагружения смещения.

Для такого рода моделей не определены показатели эффективности. Исследованию работы ДГК при нелинейной работе сооружения рассмотрено в ограниченном наборе исследований [163]. Например, в работе А.А. Никитина [64, 111] рассмотрена модель с деградирующей жесткостью, и в качестве критерия принят коэффициент повреждаемости конструкции. А для упругопластической модели данный показатель принимать не представляется возможным. Таким образом встает вопрос о выборе целевой функции для подбора параметров ДГК при нелинейной работе защищаемой системы.

Помимо сказанного, применение гасителей связано с определенными сложностями в строительстве: далеко не всегда удастся обеспечить необходимую настройку гасителя, если его масса ДГК мала. Как показал О.А. Савинов [81], смещения гасителя будут во столько раз больше смещения защищаемого объекта, во сколько раз масса гасителя меньше, чем масса защищаемого объекта. Например, если масса гасителя в 100 раз меньше массы сооружения, то при смещении здания на сантиметр, смещения гасителя будут составлять метр. Очевидно, что реализовать на практике упругую связь, позволяющую такие смещения, не представляется возможным.

Важным является задача отклонения настроек ДГК от оптимальной настройки, которые при реализации всегда присутствуют в виде неточной реализации при строительстве, или действия природных условий таких, как лед, снег, дождь, меняющие грунтовые условия. Для гасителей малой массы такого рода отклонения свойств ДГК будут выключать его из работы.

Для решения высказанных проблем предлагается применение активных и полуактивных гасителей [123, 130, 166, 173], многомассовых гасителей [161] или применение гасителей большой массы [153].

ДГК активного типа нашли применение в зарубежной практике. Работы по проектированию систем с активными ДГК и эксплуатации осуществлялись сотрудниками фирм в Японии – Kayaba Industries и Takenaka Corporation, в США – MTS Systems Corporation of Minneapolis. Исследована эффективность применения активного ДГК в сравнении с пассивным [123].

В качестве примера можно привести здание Sendogaya INTES в Токио (рисунок 1.11.), в котором активный гаситель находится на уровне одиннадцатого этажа. В качестве массы ДГК использованы элементы здания – тепловые камеры, что позволило не применять дополнительные конструкции. Управление каждым гасителем обеспечивается системой, включающей систему датчиков, расположенных в трех уровнях, гидропривод и компьютер.

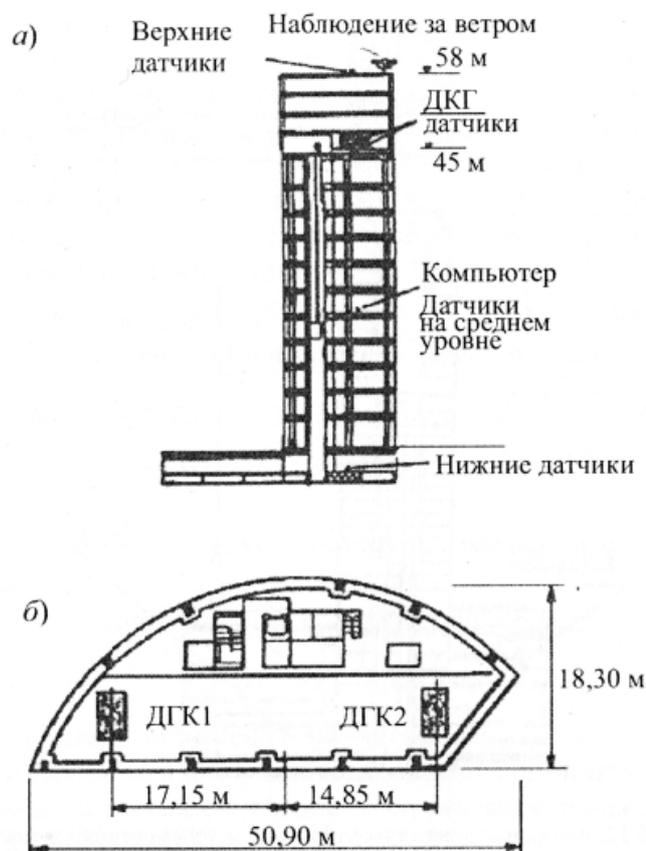


Рисунок 1.11. Здание Sendogaya INTES (Япония, Токио)

а - размещение ДГК по высоте здания б – план размещения ДГК

Гасители большой массы начали предлагаться с середины 70х годов прошлого века, в системах с такими ДГК в качестве гасящей массы используются части самого сооружения. Наиболее известны три вида конструкций гасителей большой массы:

1. Здания с верхним гибким этажом (рисунок 1.12), предложенного профессором Цейтлиным [117]
2. Использование пролётного строения моста в качестве ДГК (рисунок 1.13) для снижения колебаний опор [63, 64, 90]
3. Использование жидкость для гашения колебаний зданий (рисунок 1.14), резервуаров и гидротехнических сооружений [107, 119]

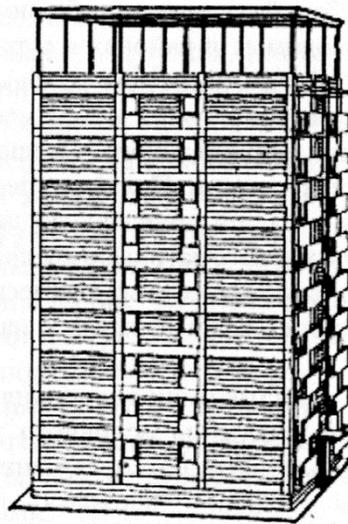


Рисунок 1.12. Сооружение с ДГК, в виде гибкого верхнего этажа (Армения)



Рисунок 1.13. Опора моста с пролётным строением, использованным в качестве ДГК

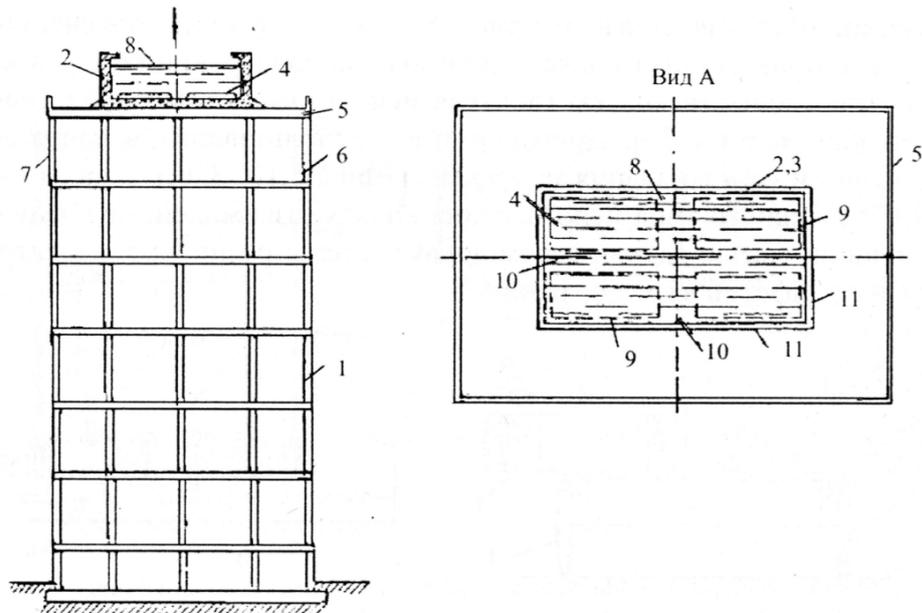


Рисунок 1.14. Здание с бассейном, использованным в качестве ДГК

В литературе отмечается, что метод инвариантных точек для ДГК большой массы уже не применим. При исследовании гашения мостовых опор А.А.Никитин и А.М. Уздин [40, 111] установили наличие критической массы гасителя. В известных работах утверждается, что относительная критическая масса равняется приблизительно двум (критическая масса гасителя составляет примерно две массы сооружения). Если масса гасителя больше критической, считается, что гаситель не работает. А.А. Никитиным получены зависимости настройки и демпфирования гасителя от относительной массы (рисунок 1.15). Как видно из рисунка настройка падает с увеличением относительной массы гасителя, а коэффициент неупругого сопротивления растет с увеличением относительной массы гасителя.

Аналогичные исследования производились зарубежом [121, 131, 154, 165]. В данной работе исследовано поведение демпфированной системы с ДГК. Характер зависимости оптимальных параметров представлен на рисунках 1.16 и 1.17.

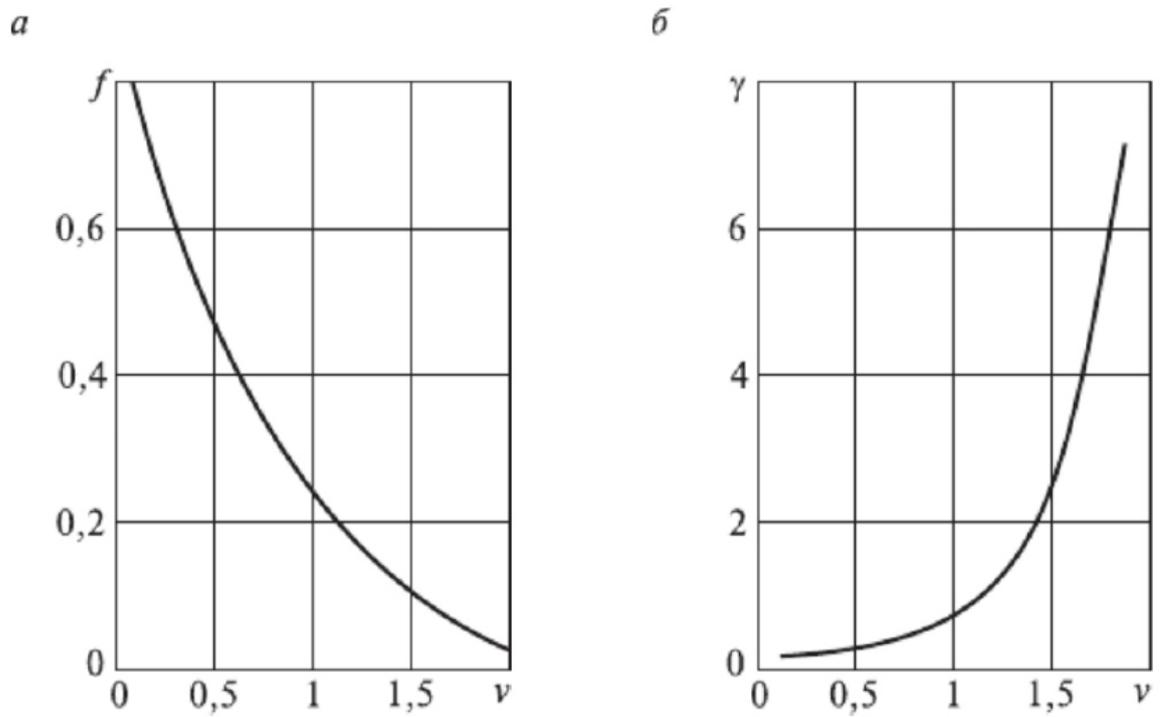


Рисунок 1.15. Зависимость настройки гасителя по частоте (а) и затуханию (б) от его относительной массы ν

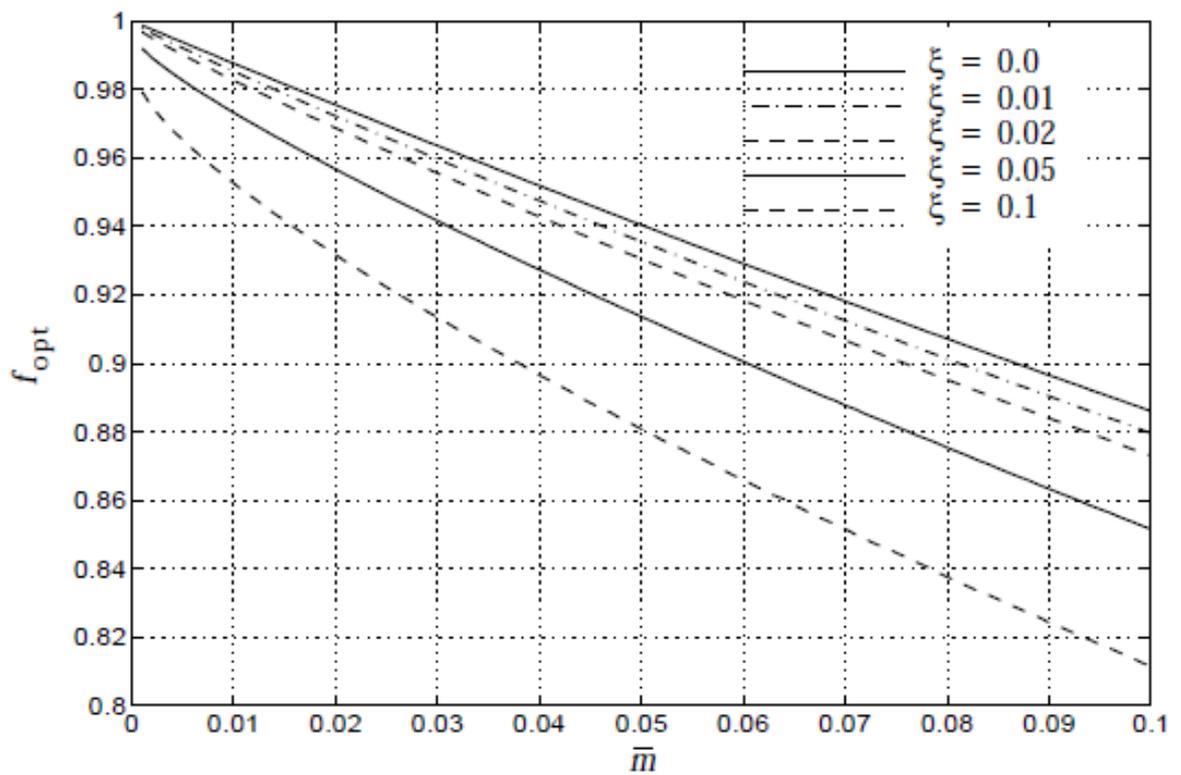


Рисунок 1.16. Зависимость настройки f_{opt} гасителя от его относительной массы \bar{m}

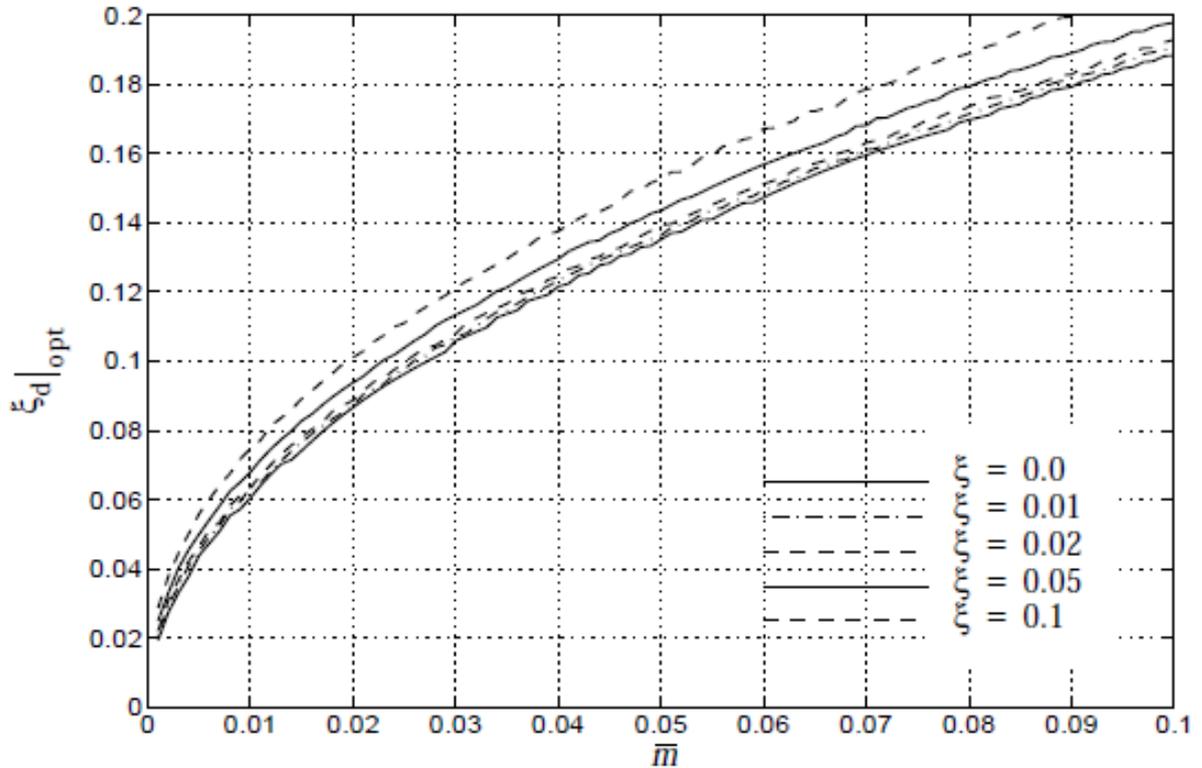


Рисунок 1.17. Зависимость затухания в связи гасителя $\xi_{d|opt}$ от его относительной массы \bar{m}

Однако, как видно из рисунков, данные исследования проведены лишь для гасителей малой массы. Так же из рисунков видно, что исследования проводились для систем с затуханием в системе в долях критического, равным максимум 0,1 (коэффициент неупругого сопротивления 0,2). В настоящее же время нашли широкое применение системы со специальными демпфирующими устройствами (с сейсмоизоляцией, например), где затухание в системе больше 15 % от затухания в долях критического. Так же следует упомянуть, что при разрушениях в сооружении затухание в системе так же растет, что делает вопрос влияния значительного демпфирования в системе на работу ДГК актуальным.

Как было сказано ранее, при расчете по нормам значительное затухание в системе не учитывается. Встает вопрос о границах применимости нормативной методики расчета.

1.4. Цель и метод исследований

Выполненный анализ исследований и области применения ДГК показывает, что они могут быть достаточно эффективны для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений. Однако их применение в сейсмостойком строительстве пока ограничено. Это связано с недостаточной разработкой теории ДГК для строительных конструкций.

Как показывают исследования, для надежной работы ДГК приходится увеличивать его массу, однако в литературе отсутствуют данные о настройке и демпфировании ДГК большой массы при наличии демпфирования в сооружении. Не решен вопрос и о расчете сооружений с ДГК, как по спектральной методике, так и по акселерограммам землетрясений. Вопрос задания расчетных акселерограмм широко обсуждается в литературе, но не имеет пока окончательного решения. Что касается задания воздействия для расчета ДГК, то этот вопрос пока не поднимался, хотя он имеет ряд специфических особенностей. Что касается ЛСТ, то нормативный вариант спектральной методики вообще не учитывает демпфирования в системе и не может использоваться для подбора демпфирования ДГК. Предложения по учету демпфирования, имеющиеся в литературе, относятся к случаю пропорционального демпфирования и неприемлемы для систем с ДГК. Наконец, совершенно неясен вопрос о работе ДГК при накоплении повреждений в конструкции. При этом ДГК отстраивается от резонансной частоты, и его эффективность становится проблематичной.

В связи со сказанным целью работы явилось развитие теории ДГК для сейсмозащиты сооружений с учетом демпфирования в защищаемой конструкции и накопления повреждений в процессе сейсмических колебаний.

Для достижения поставленной цели пришлось решить следующие задачи

1. Установить особенности работы и настройки параметров ДГК для демпфированных систем при гармоническом воздействии.
2. Выявить влияние демпфирования в системе на параметры ДГК: настройку, демпфирование в пружине гасителе и величину критической массы.

3. Разработать теорию расчета демпфированных систем на сейсмические нагрузки при использовании линейно-спектральной методики (ЛСМ).
4. Проанализировать особенности расчета ДГК по ЛСМ и по акселерограммам землетрясений.
5. Разработать методику задания расчетных акселерограмм для подбора параметров и оценки эффективности ДГК.
6. Оценить эффективность работы ДГК для гашения колебаний демпфированных систем при развитии повреждений в сооружении.

Основной метод проведения исследований – численное моделирование колебаний сооружения, оснащенного ДГК. При этом используется анализ гармонических колебаний рассматриваемых систем и численное моделирование сейсмических колебаний на ЭВМ при задании воздействия акселерограммой землетрясения.

Для задания расчетных акселерограмм возникает необходимость анализа записей прошлых землетрясений и на этой основе развитие методов построения искусственных расчетных акселерограмм, опасных для системы «сооружение-ДГК».

Полученные результаты сопоставляются с многочисленными результатами исследований ДГК, которые являются частным случаем задачи, поставленной в диссертационной работе.

2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ В СООРУЖЕНИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДГК

2.1. Подбор параметров ДГК с учетом демпфирования в сооружении

Принцип динамического гасителя впервые был запатентован Фрамом в 1909 г [141]. Динамический гаситель колебаний (ДГК) представляет собой небольшую массу, которая соединена с сооружением упругой связью. Жесткость и демпфирование этой связи можно подобрать так, что в идеале основная масса может остановиться при гармоническом воздействии. В течение более чем 100 лет с момента изобретения ДГК вопросами настройки и демпфирования гасителей занимались многие выдающиеся специалисты. В России наиболее известны работы Б. Г. Коренева и Л. М. Резникова [47]. Также серьезные работы по этому вопросу есть и у С. П. Тимошенко [99], О. А. Савинова [81]. Применение ДГК в сейсмостойком строительстве исследованы в работах В.С. Полякова [4]. В указанных исследованиях подбор параметров ДГК базировался на методе инвариантных точек [99]. Этот метод проиллюстрирован на рисунке 2.1. Исходные данные для построения заимствованы из известной монографии [99]. Метод инвариантных точек исходит из того, что все АЧХ системы с разным демпфированием в пружине гасителя пересекаются в двух точках N и T, которые не зависят от величины демпфирования в пружине гасителя и называются инвариантными.

Но далеко не всегда удается обеспечить необходимую настройку гасителя, если его масса мала [87]. В связи с этим с середины 70-х годов прошлого века стали предлагаться гасители большой массы, в которых в качестве гасящей массы используются части самого сооружения [63, 64, 117].

При исследовании гашения мостовых опор А.А.Никитин и А.М.Уздин установили наличие критической массы гасителя [63, 64, 111]. В [40, 107, 111] утверждается, что относительная критическая масса равняется приблизительно двум (критическая масса гасителя составляет примерно две массы сооружения). Если масса гасителя больше критической, считается, что гаситель не работает.

Полученная в [64] зависимость настройки и демпфирования гасителя от относительной массы вошли в учебную [107] и нормативную [40] литературу.

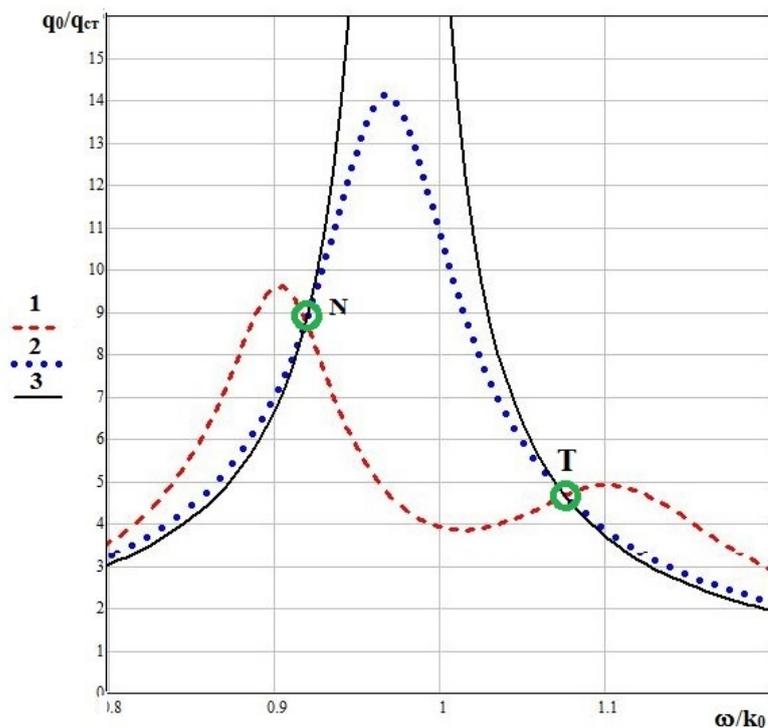


Рисунок 2.1. АЧХ по данным [99], N и T – инвариантные точки

1 – АЧХ смещений основной массы при $\mu = \gamma_r \cdot f^2 / 2p = 0,1$;

2 – АЧХ смещений основной массы при $\mu = \gamma_r \cdot f^2 / 2p = 0,32$;

3 – АЧХ основной массы при жестком соединении ДГК с основной массой

Ранее при исследовании ДГК затуханием в сооружении пренебрегали. Но в связи с недавно появившейся возможностью создания систем сейсмозащиты с затуханием более 30% от критического, возникла необходимость исследования зависимости параметров ДГК от затухания в сооружении.

Для анализа влияния демпфирования в сооружении на работу ДГК рассмотрена двух массная система с затуханием по Е.С.Сорокину при гармоническом воздействии, и для нее строились АЧХ (рисунок 2.2). При этом в качестве параметров демпфирования сооружения принят коэффициент неупругого сопротивления γ_c , а в гасителе - γ_r ; масса гасителя характеризуется относительной массой $\nu = m_r / m_c$, где m_r – масса гасителя, а m_c – масса сооружения.

В качестве настройки ДГК принимается $f=k_r/k_c$, где k_r – парциальная частота собственных колебаний гасителя, а k_c – парциальная частота собственных колебаний сооружения. Жесткость сооружения характеризуется величиной c_c , а жесткость пружины гасителя – c_r .

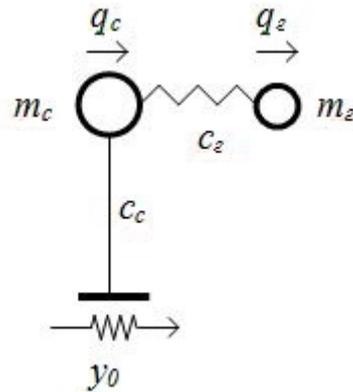


Рисунок 2.2. Расчетная схема для анализа работы ДГК

Уравнение движения рассматриваемой системы имеет вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}_c\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{R}\mathbf{Y} = \mathbf{A} \sin \omega t \quad (2.1)$$

где \mathbf{M} и \mathbf{R} – матрицы инерции и жесткости системы: $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_c & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$ и

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} c_c + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$$

\mathbf{Y} – вектор обобщенных координат, $\mathbf{Y} = \mathbf{C} \cos \omega t + \mathbf{S} \sin \omega t$;

\mathbf{B}_c – матрица гистерезисного демпфирования по Е.С.Сорокину

$$\mathbf{B}_c = \begin{pmatrix} c_c \gamma_c + c_2 \gamma_2 & -c_2 \gamma_2 \\ -c_2 \gamma_2 & c_2 \gamma_2 \end{pmatrix}$$

$\dot{\mathbf{Y}}$ – вектор сопряженных по Сорокину обобщенных координат [1]. $\dot{\mathbf{Y}} = -\mathbf{C} \sin \omega t + \mathbf{S} \cos \omega t$.

\mathbf{A} – вектор возмущений, причем $\mathbf{A} = A_0 \cdot \mathbf{V}_p$, где A_0 – амплитуда возмущения,

$\mathbf{V}_p = (1, 0)^T$ для возмущения только основной массы (силовом воздействии) и

$\mathbf{V}_p = (1, 1)^T$ для кинематического (сейсмического) возмущения

Решение системы (1) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \left[(\mathbf{R} - \mathbf{M}\omega^2) + \mathbf{B}_c (\mathbf{R} - \mathbf{M}\omega^2)^{-1} \mathbf{B}_c \right]^{-1} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} = -(\mathbf{R} - \mathbf{M}\omega^2)^{-1} \mathbf{B}_c \mathbf{S} \end{cases} \quad (2.2)$$

Исследования 70-80 гг. прошлого века показали ограниченность применимости метода инвариантных точек, в том числе, это относится к сильно демпфированным системам и ДГК большой массы. Ниже приводятся некоторые результаты анализа работы ДГК. На рисунке 2.3 приведены АЧХ с оптимальным подбором настроек ДГК, причем на рисунке 2.3а при тех же параметрах что и на рисунке 2.1, но при $\gamma_c=0,3$, а на рисунке 2.3б при аналогичных параметрах, что и на рисунке 2.1, но при $\nu=1,5$. АЧХ построено в безразмерных параметрах. По оси абсцисс отложена безразмерная частота, равная отношению $p=\omega/k_c$ (ω - частота вынуждающих колебаний), а по оси ординат безразмерное смещение равное отношению смещений к их статическому значению. Как видно из рисунка 2.3 теория инвариантных точек для систем с затуханием не применима.

Строго говоря, на отсутствие инвариантных точек влияет и сейсмическое воздействие. На рисунке 2.4 приведены АЧХ с оптимальным подбором настроек ДГК в условиях сейсмического воздействия. На рисунке 2.4а при тех же параметрах что и на рисунке 2.1, а на рисунке 2.4 в при аналогичных параметрах, что и на рисунке 2.1, но при $\nu=1,5$. Как видно из рисунка 2.4а при малом затухании АЧХ проходят близко, но не пересекаются.

В связи со сказанным все последующие исследования проводятся методом перебора значений параметров на сетке их возможных значений. Для подбора оптимальных параметров была разработана программа в системе Windows на языке C++.

Выполненные исследования подтверждают известный вывод [64, 107] о падении настройки и росте демпфирования ДГК с увеличением его относительной массы. Кроме того, установлено, что оптимальная настройка падает, а оптимальное демпфирование ДГК возрастает с увеличением демпфирования в сооружении. Последний вывод особенно существенен при использовании ДГК для снижения смещений в системах сейсмоизоляции.

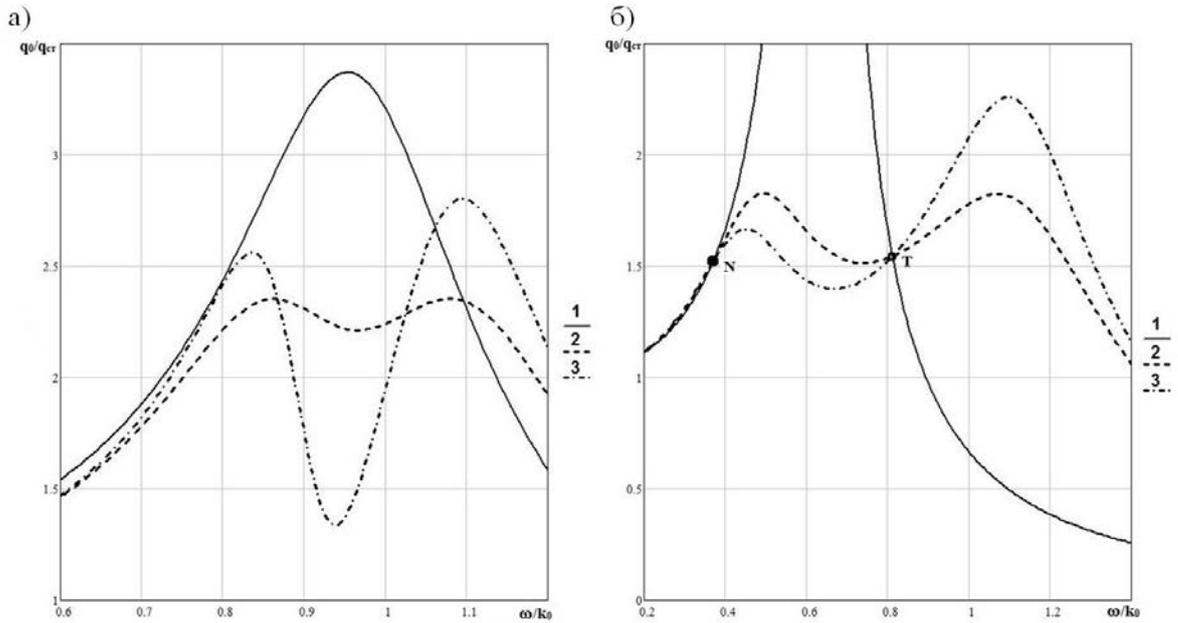


Рисунок 2.3. АЧХ для системы, рассмотренной в [99] с изменением
 а - $\gamma_c=0,3$; б - $\nu=1,5$; N и T – инвариантные точки;

- 1 - АЧХ основной массы при жестком соединении ДГК с основной массой;
- 2 – АЧХ смещений основной массы с оптимально настроенным гасителем;
- 3 – АЧХ смещений основной массы с отстроенным гасителем

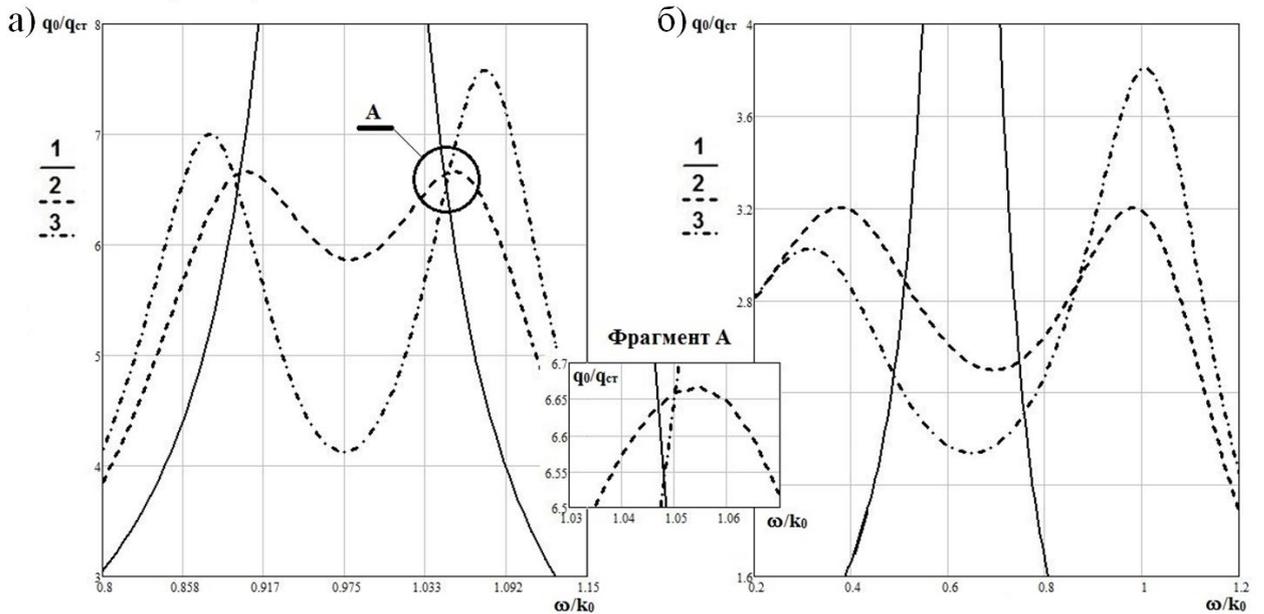


Рисунок 2.4. АЧХ для системы, рассмотренной в [99] при сейсмическом
 воздействии

- а – $\nu=0,05$; фрагмент А АЧХ, иллюстрирующий отсутствие инвариантной точки;
- б – $\nu=1,5$;
- 1 - АЧХ основной массы при жестком соединении ДГК с основной массой;
- 2 – АЧХ смещений основной массы с оптимально настроенным гасителем;
- 3 – АЧХ смещений основной массы с отстроенным гасителем

Эти выводы наиболее сильно проявляются при кинематическом возмущении, когда $V=(1,1)^T$. На рисунке 2.3 приведены зависимости $f(\gamma_c)$ и $\gamma_r(\gamma_c)$ при сейсмическом воздействии.

На рисунке 2.5 приведены полученные зависимости оптимальных параметров ДГК от затухания в сооружении при классическом силовом воздействии, рассмотренном в работах [47].

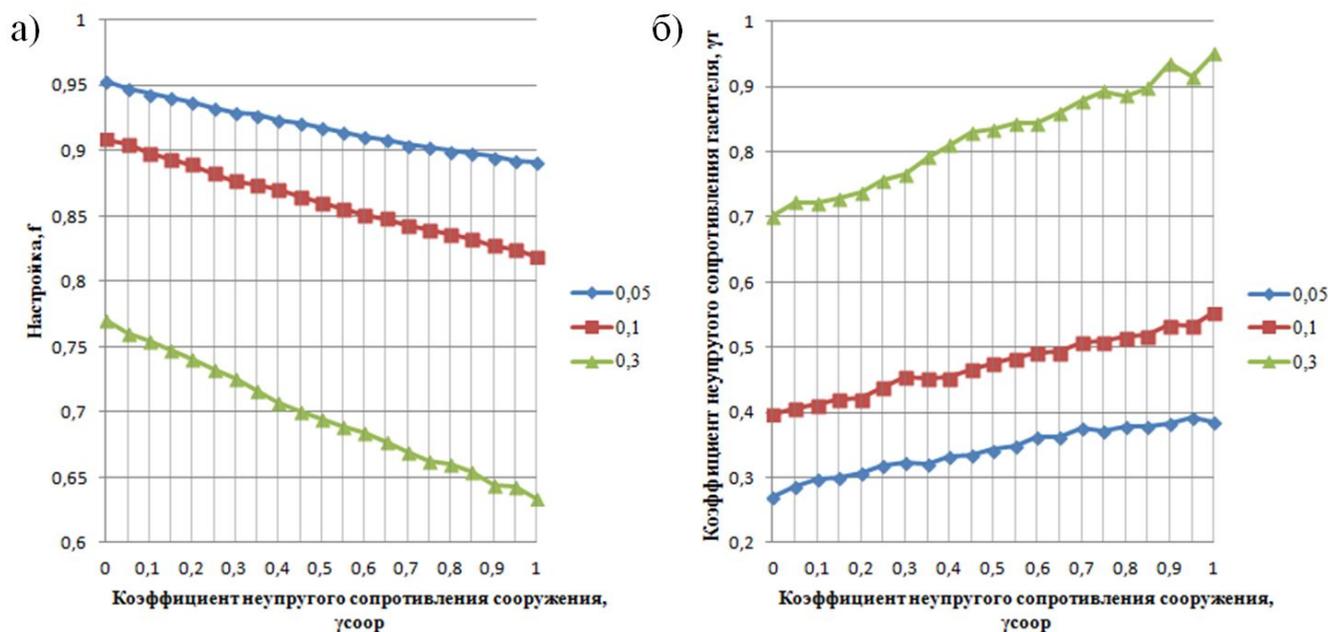


Рисунок 2.5. Зависимость настройки (а) и демпфирования (б) ДГК от затухания в сооружении при классическом силовом воздействии.

Рисунок 2.5 подтверждает известный вывод [64, 107, 131] о падении настройки и росте демпфирования ДГК с увеличением его относительной массы. Кроме того, из рисунков следует, что оптимальная настройка падает, а оптимальное демпфирование ДГК возрастает с увеличением демпфирования в сооружении. Последний вывод существенен при использовании ДГК для снижения смещений в системах сейсмоизоляции.

На рисунке 2.6 приведены такие же зависимости, но при сейсмическом воздействии.

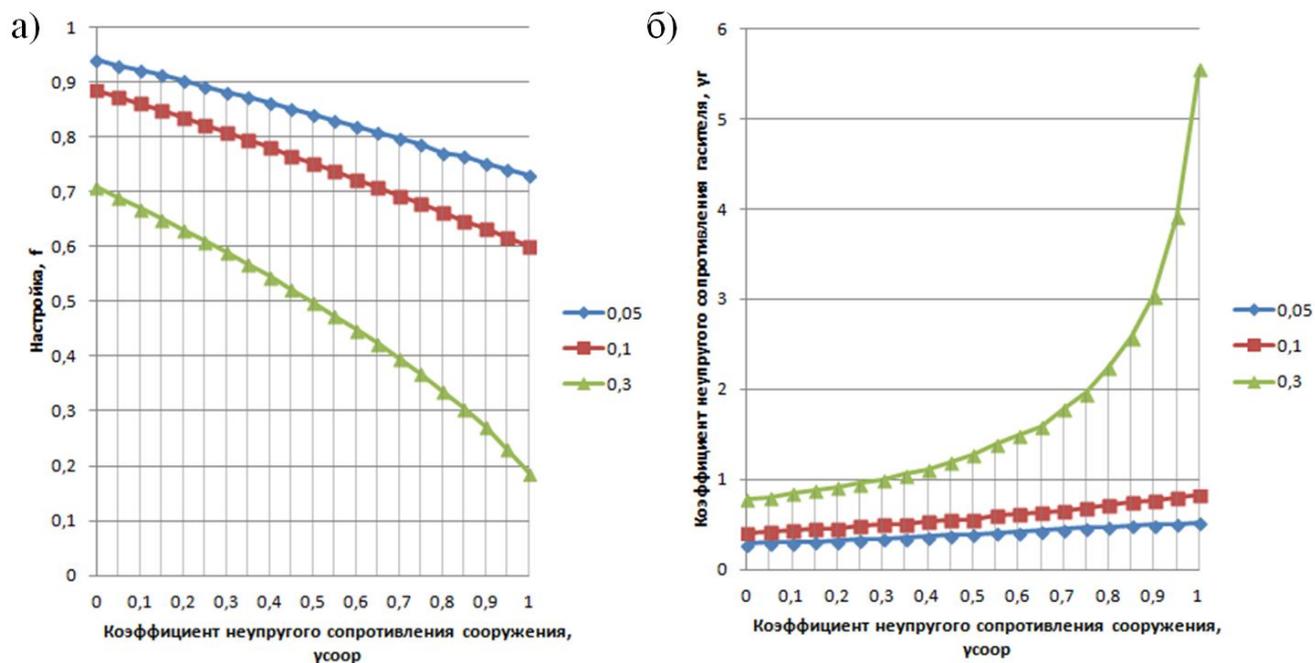


Рисунок 2.6. Зависимость настройки (а) и демпфирования (б) ДГК от затухания в сооружении при сейсмическом воздействии.

Из рисунка 2.6 так же следует, что оптимальная настройка падает, а оптимальное демпфирование ДГК возрастает с увеличением демпфирования в сооружении. Но при сейсмическом воздействии такой эффект значительнее.

Настройки параметров ДГК зависят не только от затухания в сооружении, но и от относительной массы гасителя. Эти зависимости рассмотрены ниже.

2.2. Влияние демпфирования в сооружении на величину критической массы

Зависимость параметров ДГК от относительной массы гасителя исследовалась ранее в работах [64]. При этом А.А. Никитиным и А.М. Уздиным введено понятие критической массы. Как отмечалось ранее, по данным работ [40] относительная критическая масса равняется примерно двум. При этом в упомянутых работах нет четкого определения критической массы. Отмечается только, что при массе большей критической эффект гашения исчезает.

Поскольку в известных работах затухание в сооружении не учитывалось, проведены исследования зависимости параметров гасителя от относительной

массы при различном затухании в сооружении. А для установления точного значения критической массы детально проанализировано поведение системы с ДГК при больших значениях относительной массы.

На рисунке 2.7 приведены зависимости искомых параметров от относительной массы ДГК. Из рисунка видно, что оптимальная настройка падает, а оптимальное демпфирование ДГК возрастает с увеличением относительной массы. Полученные результаты соответствуют известным данным, приведенным в [107]. Так же было обнаружено наличие наиболее эффективной массы ДГК, при которой эффект снижения смещения основной массы максимален, на рисунке соответствующая точка обозначена черным «крестом». Указанный результат проиллюстрирован на рисунке 2.8, на котором представлены графики зависимости эффективности ДГК от его относительной массы. Следует отметить, что указанный эффект имеет место только при кинематическом воздействии; при классическом силовом воздействии на основную массу наиболее эффективная масса гасителя отсутствует, что продемонстрировано на рисунке 2.9. При классическом воздействии, как видно из рисунка, чем больше относительная масса ДГК, тем он более эффективно работает.

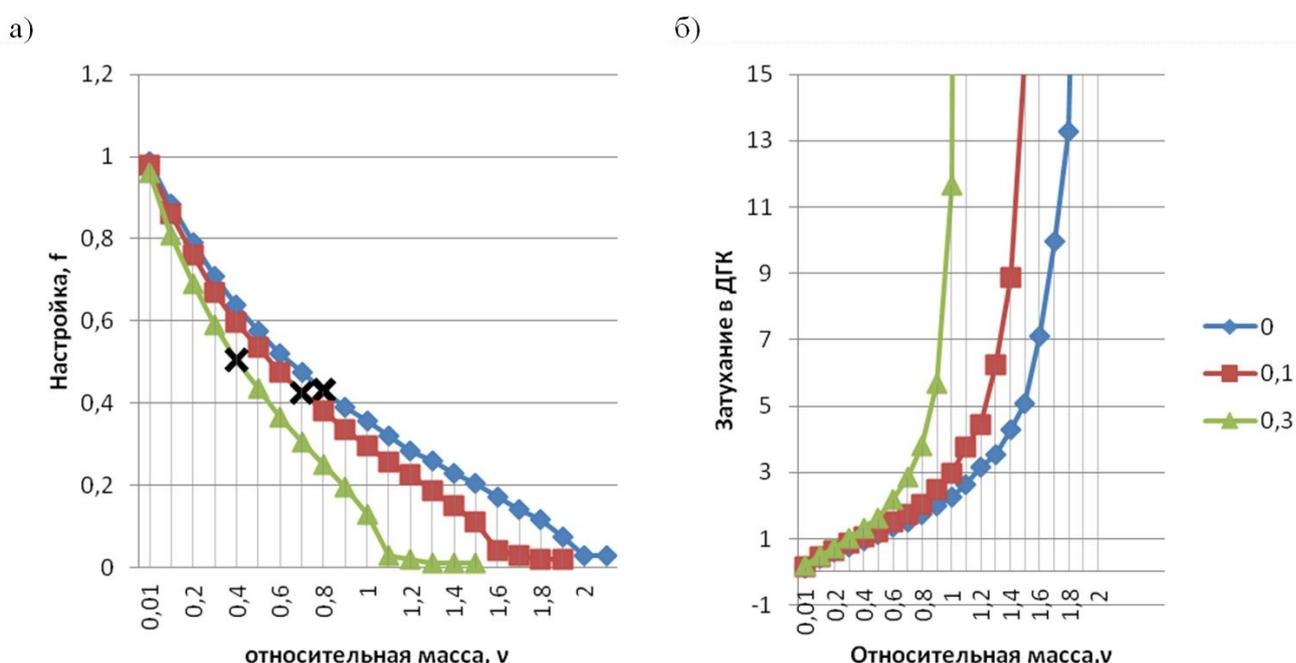


Рисунок 2.7. Зависимость настройки (а) и демпфирования (б) ДГК от его относительной массы v при сейсмическом воздействии

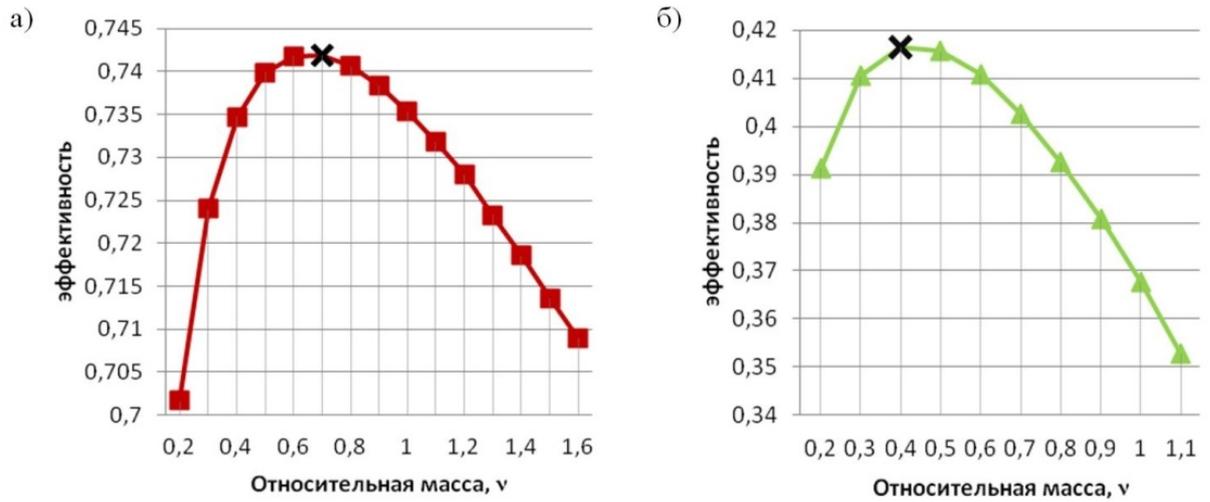


Рисунок 2.8. Зависимость эффективности ДГК от относительной массы при затухании в сооружении равном: а - 0,1; б – 0,3.

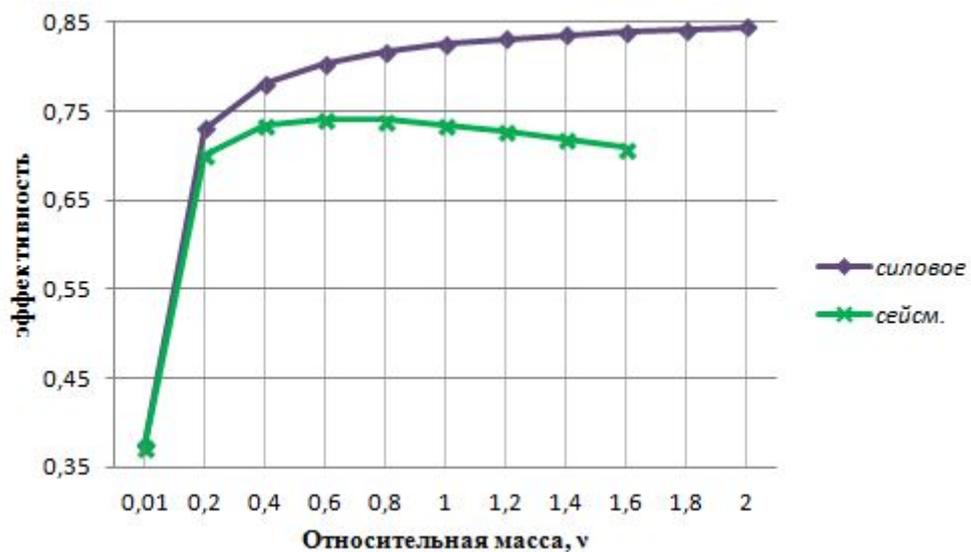


Рисунок 2.9. Зависимость эффективности ДГК от относительной массы при разных видах воздействия.

Вместе с тем исследования показали, что зависимость параметров ДГК от относительной массы существенно зависит от затухания в сооружении. На рисунке 2.7 видно, что с ростом затухания в сооружении оптимальная настройка падает, а оптимальное демпфирование возрастает.

Для оценки величины критической массы, прежде всего, была поставлена задача установить четкий критерий, по которому можно определить величину

критической массы. Для этого было детально проанализирована область, в которой происходит переход от падения оптимальной настройки к её стабильному значению близкому к нулю. Из графика, представленного на рисунке 2.10, видно, что в рассматриваемой области зависимость имеет экстремум. Таким образом, критической массой можно назвать такую массу, которая соответствует точке, в которой производная настройки ДГК по его относительной массе равна нулю:

$$\left. \frac{df}{dv} \right|_{v=v_{кр}} = 0.$$

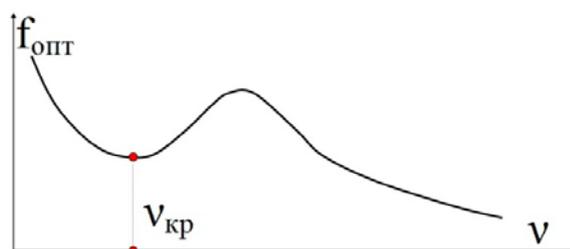


Рисунок 2.10. Характер зависимости настройки ДГК от его относительной массы v при больших значениях v и при сейсмическом воздействии

В [111] отмечается что, $v_{\text{кр}} \approx 2$; при детальном рассмотрении $v_{\text{кр}} = 1,9$. С ростом затухания в сооружении относительная критическая масса существенно падает. Следовательно, вывод [111] о том, что $v_{\text{кр}} \approx 2$, следует считать ошибочным, поскольку относительная критическая масса зависит от затухания в сооружении. Данный эффект продемонстрирован на рисунке 2.11. Как видно из этого рисунка, чем больше затухание в сооружении, тем меньше величина $v_{\text{кр}}$.



Рисунок 2.11. Зависимость относительной критической массы от затухания в сооружении

Следует так же отметить, что эффект возникновения критической массы проявляется только при кинематическом воздействии. Это проиллюстрировано на рисунке 2.12, на котором представлены зависимости настроек ДГК от относительной массы при различных видах воздействия. Из этого рисунка четко видно, что при классическом воздействии критическая масса отсутствует, т.е. с ростом относительной массы ДГК снижение настройки и рост демпфирования ДГК происходят плавно.

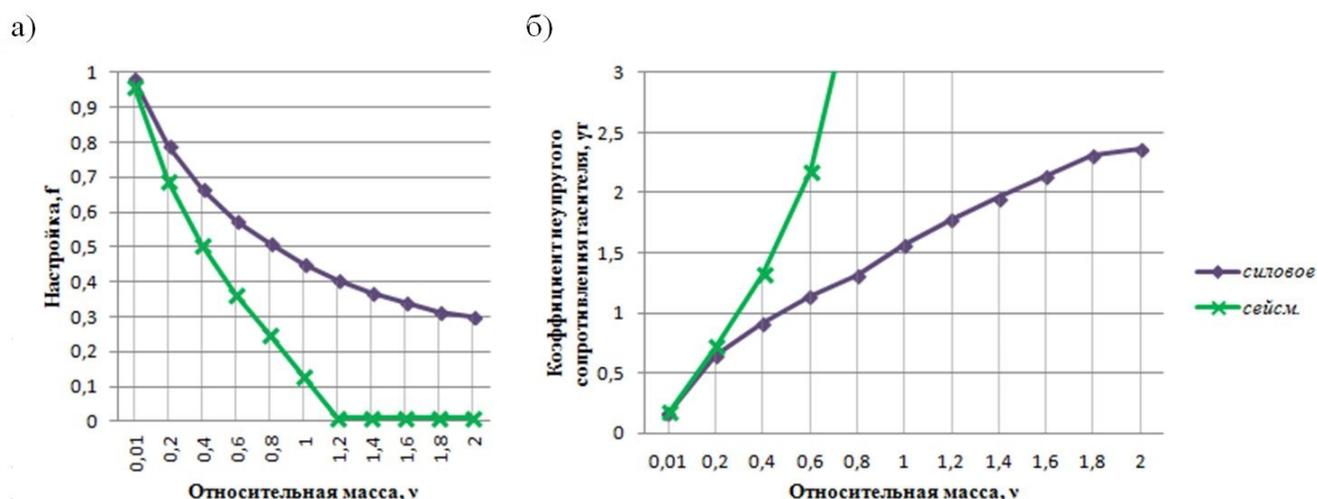


Рисунок 2.12. Зависимость настройки (а) и демпфирования (б) ДГК от его относительной массы ν при различных видах воздействия

2.3. Особенности расчета сооружений с ДГК по линейно-спектральной методике

ДГК предлагается применять для сейсмозащиты сооружений с середины 70-х годов прошлого века [71, 77]. Исследования показывают, что применение ДГК может быть более эффективно, чем сейсмоизоляция [111]. Однако, в отличие от сейсмоизоляции, вопросы нормирования расчета и проектирования ДГК до настоящего времени не рассмотрены специалистами. В РФ и большинстве других стран для оценки сейсмостойкости используется ЛСМ. В связи с этим становится интересным вопрос возможности расчета и подбора оптимальных параметров настройки и демпфирования ДГК по действующему СП 14.13330.2014 [97] и модификациям ЛСМ [68, 85, 104].

С этой целью была рассмотрена оценка сейсмостойкости системы с двумя массами с затуханием по Е.С.Сорокину, представленная на рисунке 2.2.

В рассматриваемой постановке задачи уравнение движения при кинематическом возмущении выглядит следующим образом:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_c\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{R}\mathbf{q} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0, \quad (2.3)$$

где \mathbf{M} – матрица инерции системы, \mathbf{R} – матрица жесткости, \mathbf{q} – вектор обобщенных координат, $\ddot{\mathbf{Y}}_0$ – вектор кинематических возмущений, \mathbf{B}_c – матрица гистерезисного демпфирования по Е.С.Сорокину-Сороке, $\tilde{\mathbf{q}}$ – вектор сопряженных по Сорокину обобщенных координат [33, 96, 168].

В этом случае матрица демпфирования \mathbf{B}_c строится так же как матрица жесткости \mathbf{R} , но с заменой модулей упругости E элементов сооружения на произведение этих модулей на соответствующие элементам коэффициенты неупругого сопротивления $\gamma \cdot E$. Однако уравнение 2.3 неудобно для решения и подвергается в литературе обоснованной критике [33, 51]. По этой причине в дальнейшем уравнение 2.3 заменяется эквивалентным вязким демпфированием [33, 75, 116, 158].

Нормативный вариант ЛСМ не позволяет учесть демпфирование, однако позволяет построить зависимости сейсмических нагрузок от настройки гасителя f . Известные формулы СП [97] позволяют записать следующую зависимость для относительных инерционных нагрузок

$$\bar{S}_{ij} = \frac{S_{ij}}{AK_1K_0K_\psi} = m_i\beta(T_j)\eta_{ij} \quad (2.4)$$

здесь A – значение ускорения в уровне основания, K_1 – коэффициент, учитывающий допустимые повреждения зданий и сооружений, K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность, K_ψ – коэффициент для учета затухания, вводимый эмпирически и не зависящий явно от затухания, $\beta(T_j)$ – коэффициент динамичности, соответствующий j -й форме собственных колебаний сооружения, η_{ij} – коэффициент формы, $\eta_{ij} = x_{ij} \cdot d_j$: здесь x_{ij} –

элемент матрицы собственных векторов \mathbf{X} , где \mathbf{X} – матрица собственных векторов недемпфированной системы, т.е. матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$, d_j – элемент вектора $\mathbf{X}^{-1}\mathbf{V}_p$.

Для рассматриваемой системы момент по подошве определяется следующим соотношением:

$$M_n = \sqrt{(\bar{S}_{00} + \bar{S}_{10})^2 + (\bar{S}_{01} + \bar{S}_{11})^2} \quad (2.5)$$

На рисунке 2.13 приведена зависимость относительной эффективности (отношение момента по подошве M_n системы с ДГК к тому же моменту системы без гасителя) от настройки ДГК f при различных значениях относительной массы гасителя. Как видно из рисунка, ЛСМ, приведенная в СП, позволяет учесть эффект ДГК и определить оптимальную настройку вплоть до относительной массы, равной приблизительно 0,7 (штрихпунктирная кривая на рисунке 2.13а) при затухании в сооружении равном 0,1. При увеличении затухания в сооружении возможно использование ЛСМ, но при меньшей относительной массе. Можно ввести понятие предельной массы ДГК v_{lim} , зависящей от γ_c , при которой ЛСМ перестает показывать оптимальную настройку. Так при $\gamma_c=0.3$ использование ЛСМ возможно лишь при $v<0,28$ (штриховая кривая на рисунке 3.13б), т.е. $v_{lim}=0.28$. При этом результаты, полученные по ЛСМ, приведенной в СП, совпадают с результатами, полученными при точном расчете для гармонического воздействия. Сравнительный анализ расчетов оптимальной настройки по ЛСМ и с использованием точного решения сведён в таблицу 2.1. При увеличении значения v более указанных выше значений ЛСМ не показывает оптимальной настройки, хотя фактически такая имеется. Это связано с тем, что ДГК большой массы требуют большого демпфирования, которое не учитывается в нормативном варианте ЛСМ. Возникает необходимость учета влияния демпфирования на формы колебаний. Соответствующая методика рассматривается в работах [95, 104].

Далее рассматривается уточненный вариант ЛСМ, в котором учитывается различное затухание в сооружении и в пружине ДГК в соответствии с [111]. В

этом случае формула для определения инерционных сейсмических нагрузок имеет следующий вид:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{S_{ij}}{AgK_1K_0} = K_{\psi}(\gamma_j)m_i\beta(T_j)\eta_{ij} \quad (2.6)$$

Здесь $K_{\psi}(\gamma_j) = \sqrt{\gamma_s/\gamma_j}$ – коэффициент, учитывающий затухание в конструкции, принятый в соответствии с [111], причем γ_s – эталонное значение коэффициента неупругого сопротивления, характерное для объектов массовой застройки, γ_j – коэффициент неупругого сопротивления конструкция по j-ой форме колебаний (модальное затухание). В соответствии с [33] модальное затухание определяется разложением матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}$ по формам колебаний недемпфированной системы, т.е. по собственным векторам матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$.

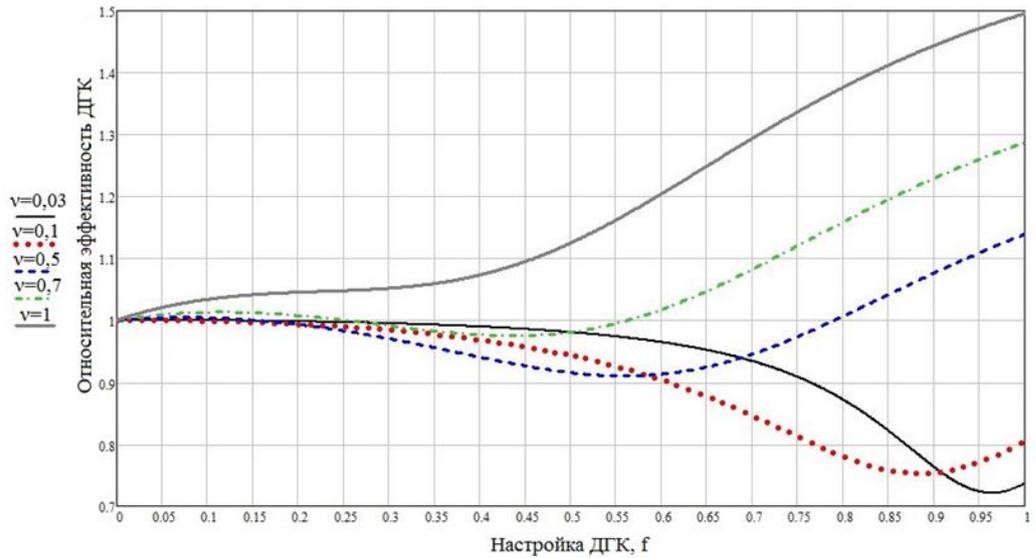
Таблица 2.1

Оптимальное значение настройки ДГК

| Затухание в сооружении, γ_c | Относительная масса гасителя, ν | Оптимальное значение настройки ДГК, полученное по ЛСМ | Оптимальное значение настройки ДГК, полученное точным расчетом при гармоническом воздействии |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 0,1 | 0,03 | 0,963 | 0,964 |
| | 0,1 | 0,885 | 0,885 |
| | 0,5 | 0,56 | 0,575 |
| | 0,7 | 0,437 | 0,475 |
| | 1 | - | 0,355 |
| 0,3 | 0,03 | 0,941 | 0,92 |
| | 0,1 | 0,812 | 0,81 |
| | 0,2 | 0,636 | 0,69 |
| | 0,3 | - | 0,59 |

На рисунке. 2.14. приведены зависимости эффективности ДГК от затухания в пружине гасителя, полученные по уточненной ЛСМ. Как видно из рисунка, оптимальное демпфирование ДГК в расчете по ЛСМ отсутствует, т.е. чем больше затухание в пружине гасителя, тем эффективнее работает гаситель.

а)



б)

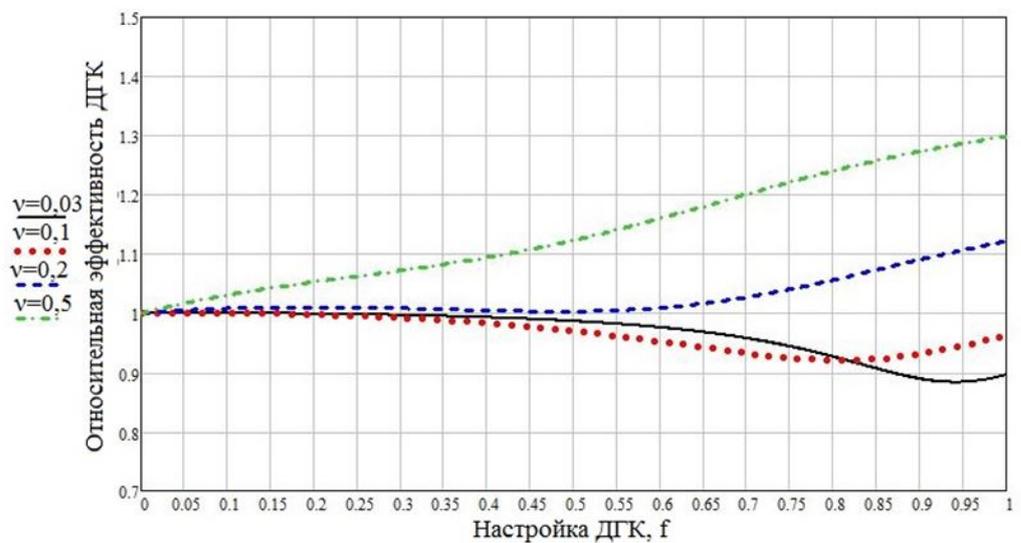


Рисунок 2.13. Зависимость относительной эффективности ДГК от его настройки при затухании в сооружении равном а - 0,1, б – 0,3.

Так же из этого рисунка видно, что уточненной ЛСМ можно пользоваться в промежутке, где кривая, полученная по ЛСМ, лежит ниже кривой, построенной по точной методике расчета при гармоническом сейсмическом воздействии. При затухании в элементах системы менее 0,4 (20% от критического значения) ЛСМ можно применять при любой массе ДГК. С ростом величины ν область применения ЛСМ для расчета сооружения увеличивается вплоть до $\gamma_r > 1$ при $\nu > 0,7$. Результаты, принадлежащие этому промежутку, идут в запас. Но при этом, уточненная ЛСМ, не предоставляет оптимальных параметров ДГК.

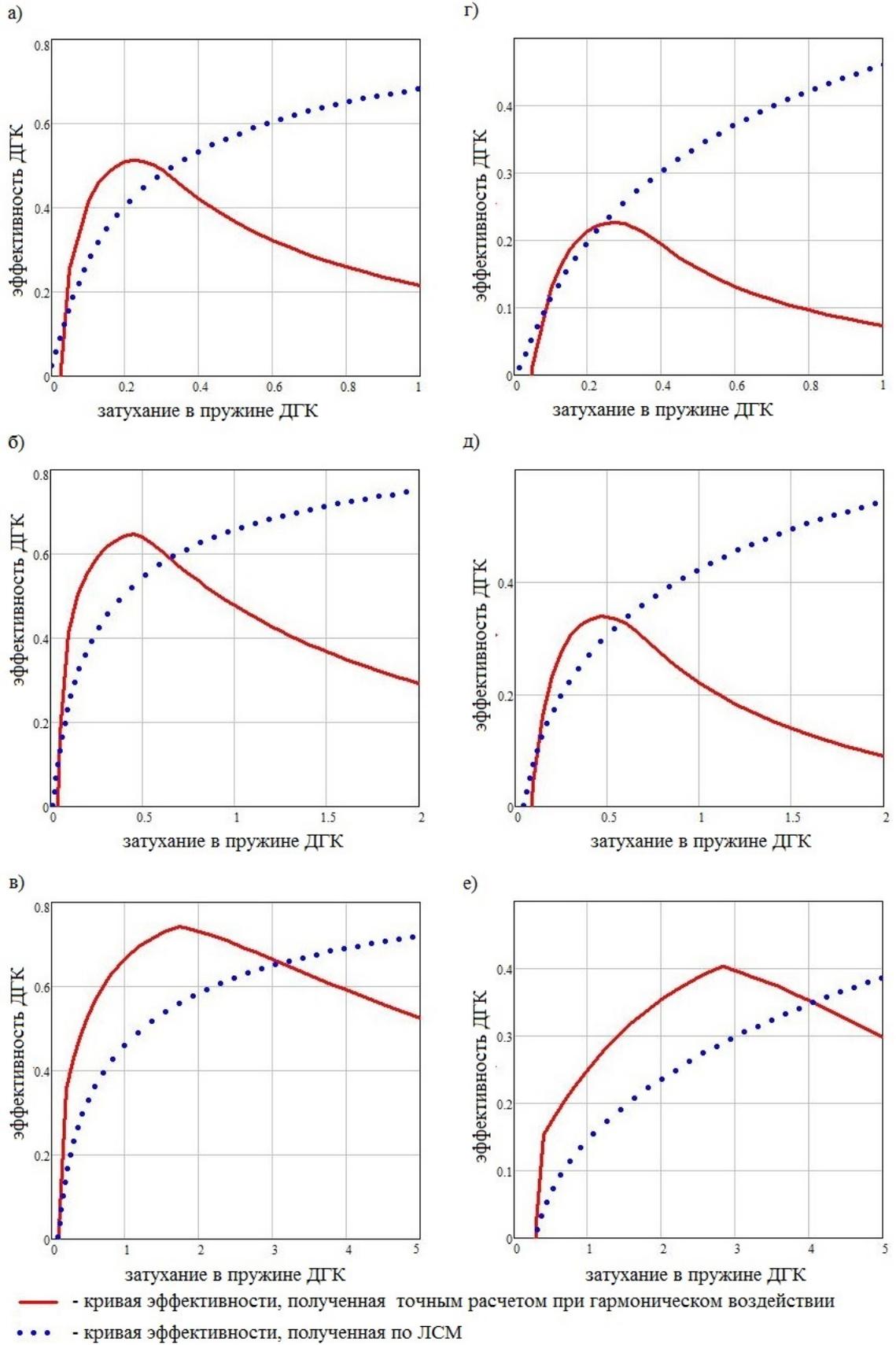


Рисунок 2.14. Зависимость эффективности ДГК от затухания в его пружине при затухании в сооружении равном а, б, в - 0,1; г, д, е - 0,3 и относительной массе а, г - 0,03; б, д - 0,1; в, е - 0,7

Далее рассматривается вариант уточненной ЛСМ с учетом корреляции форм колебаний. Для вычисления значения коэффициентов корреляции ε_{ij} использована формула А.А.Петрова [69, 70]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2 \cdot (\gamma_i k_i + \gamma_j k_j) \cdot \sqrt{\gamma_i \gamma_j k_i^3 k_j^3}}{(k_i + k_j)^2 \cdot (k_i - k_j)^2 + k_i k_j \cdot (\gamma_i \gamma_j (k_i^2 + k_j^2) + k_i k_j (\gamma_i^2 + \gamma_j^2))} \quad (2.7)$$

где γ_j - коэффициент неупругого сопротивления конструкция по j-ой форме колебаний (модальное затухание), k_j - частота колебаний главных координат по j-ой форме колебаний.

В этом случае момент по подошве определяется следующим соотношением:

$$M_n = \sqrt{(\bar{S}_{00} + \bar{S}_{10})^2 + (\bar{S}_{01} + \bar{S}_{11})^2 + \varepsilon_{01} (\bar{S}_{00} + \bar{S}_{10})(\bar{S}_{01} + \bar{S}_{11})} \quad (2.8)$$

На рисунке 2.15 приведена зависимость эффективности ДГК от затухания в его пружине. Как видно из рисунка, влияние корреляции существенно в случае, когда относительная масса гасителя мала. В том случае, когда рассматривается ДГК большой массы, корреляцией можно пренебречь. Так же из рисунка видно, что с ростом затухания в сооружении влияние корреляции увеличивается.

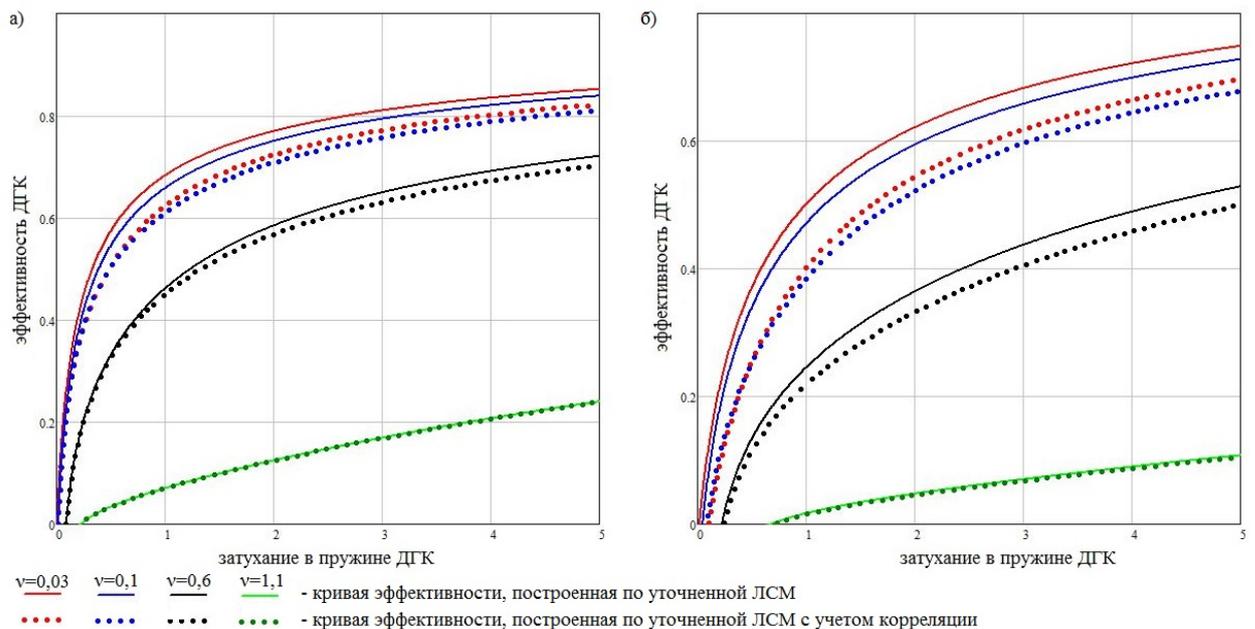


Рисунок 2.15. Зависимость относительной эффективности ДГК от его коэффициента неупругого сопротивления

а – при затухании в сооружении 0.1, б – при затухании в сооружении 0.3.

Рассмотренное выше разложение уравнений движения (2.3) допускается при затухание в системе меньше 15% от критического [60, 75, 96, 116]. Для сильно демпфированных систем необходимо работать с полной матрицей-системой (2.9):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Тогда уравнение движения примет вид:

$$\dot{\Theta} = \mathbf{A} \cdot \Theta - \mathbf{Q} \quad (2.10)$$

где $\Theta = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{q} \end{pmatrix}$, $\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{Y}}_0 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$

Матрица-система \mathbf{A} порождает комплексные собственные числа:

$$\Lambda = \left[-\frac{\gamma_1 k_1}{2}, -\frac{\gamma_2 k_2}{2}, \dots, -\frac{\gamma_n k_n}{2}, -\frac{\gamma_1 k_1}{2}, -\frac{\gamma_2 k_2}{2}, \dots, -\frac{\gamma_n k_n}{2} \right] + i \left[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, -\omega_1, -\omega_2, \dots, -\omega_n \right], \quad (2.11)$$

где n - число степеней свободы

$$\lambda_{i,i+1} = -\frac{\gamma_i k_i}{2} \pm i\omega_i, \quad \omega_i = k_i \sqrt{1 - \frac{\gamma_i^2}{4}} \quad (2.12)$$

где λ , k , ω , γ - собственное значение, собственная частота, частота затухающих колебаний и модальный коэффициент неупругого сопротивления системы соответственно.

Для применения ЛСМ к сильно демпфированной системе удобно воспользоваться теоремой о приведении произвольной вещественной матрицы к трехдиагональному виду. Данная трехдиагональная матрица имеет порядок $2n$, где n - число степеней свободы; матрица состоит из 4 квадратных диагональных блоков, размером $n \times n$. У первого и последнего блока на диагонали стоят вещественные части собственных чисел матрицы \mathbf{A} , у второго и третьего блоков – мнимые части, причем у одного из блоков со знаком минус. Трехдиагональная матрица Φ имеет следующий вид:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{\Omega} \\ -\mathbf{\Omega} & \mathbf{N} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

где $\mathbf{N} = \left[v_1, v_2, \dots, v_n \right]$ - вещественные части собственных чисел матрицы \mathbf{A} ;

$\mathbf{\Omega} = \left[\omega_1, \omega_1, \dots, \omega_n \right]$ - мнимые части собственных чисел матрицы \mathbf{A} .

Переход от матрицы-системы \mathbf{A} к трехдиагональной матрице Φ осуществляется с помощью матрицы преобразования \mathbf{T} :

$$\Phi = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} \quad (2.14)$$

Преобразование при этом имеет следующую структуру:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1 & \mathbf{W}_1 & \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{V}_2 & \mathbf{W}_2 & \mathbf{T}_2 \end{pmatrix}, \quad (2.15)$$

Далее осуществляется переход от обобщенных координат $\{\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}\}$ к главным $\{\Xi, \mathbf{H}, \mathbf{I}\}$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{V}_1\Xi + \mathbf{W}_1\mathbf{H} + \mathbf{T}_1\mathbf{I} \\ \mathbf{q} = \mathbf{V}_2\Xi + \mathbf{W}_2\mathbf{H} + \mathbf{T}_2\mathbf{I} \end{cases} \quad (2.16)$$

В новых координатах система (2.10) примет вид:

$$\begin{pmatrix} \Xi \\ \mathbf{H} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} = \Phi \begin{pmatrix} \Xi \\ \mathbf{H} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} - \mathbf{T}^{-1} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{Y}}_0 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

где $\mathbf{T}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{Q}_1 & \mathbf{Q}_2 \\ \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 \end{pmatrix}$

Уравнения движения в главных координатах примут следующий вид:

$$\ddot{\Xi} + \mathbf{G}\mathbf{K}\dot{\Xi} + \mathbf{K}^2\Xi = -(\Omega\mathbf{Q}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{G}\mathbf{K}\mathbf{P}_1)\ddot{\mathbf{Y}}_0 - \mathbf{P}_1\ddot{\mathbf{Y}}_0 \quad (2.18)$$

$$\ddot{\mathbf{H}} + \mathbf{G}\mathbf{K}\dot{\mathbf{H}} + \mathbf{K}^2\mathbf{H} = -(\Omega\mathbf{P}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{G}\mathbf{K}\mathbf{Q}_1)\ddot{\mathbf{Y}}_0 - \mathbf{Q}_1\ddot{\mathbf{Y}}_0 \quad (2.19)$$

Здесь $\Xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k]$, $\mathbf{H} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_k]$ – главные координаты;

$$\ddot{\mathbf{Y}}_0 = \mathbf{V}_p \ddot{y}_0$$

$\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ – спектр частот матрицы \mathbf{A} , составляемый из элементов матрицы собственных чисел \mathbf{A} матрицы \mathbf{A} ;

$\mathbf{G} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ – спектр демпфирования матрицы \mathbf{A} , составляемый из элементов матрицы собственных чисел \mathbf{A} матрицы \mathbf{A} ;

При суммировании перемещений и усилий по формам колебаний в ЛСМ предполагается, что суммируемые функции являются случайными функциями с

нулевым математическим ожиданием. А в качестве расчетного усилия принимается среднеквадратическое отклонение этой величины.

Для сейсмической силы S_i по i -ому обобщенному направлению формулу с учетом корреляции можно записать в виде:

$$s_i = \left[\sum_j \sum_k s_{ij} s_{ik} \varepsilon_{jk} + \sum_j \sum_k s'_{ij} s'_{ik} \varepsilon''_{jk} + \sum_{j \neq k} \sum_k s_{ij} s'_{ik} \varepsilon'_{jk} \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

В этой формуле в первой сумме S_{ij} является аналогом традиционных сейсмических сил и вычисляется по формуле:

$$s_{ij} = A \beta(T_j) K_\psi(\gamma_j) \eta_{ij} \quad (2.21)$$

ε_{jk} , ε'_{jk} , ε''_{jk} и ε'''_{jk} – коэффициенты корреляции форм колебаний.

Обычно [21, 129] коэффициент корреляции определяют в предположении стационарности процессов

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K_{ij}^{(0)}}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (2.22)$$

где $K_{ij}^{(0)}$ – корреляционная функция i -ой и j - координат при $t=0$ (математическое ожидание произведения $\overline{\xi_i \xi_j}$), σ_j – среднеквадратичное отклонение j -ой главной координаты.

Значения $K_{ij}^{(0)}$ и σ_j определяются по известным формулам [21, 91]

$$K_{ij}^{(0)} = \int_0^\infty \frac{Z(\omega) S(\omega) d\omega}{H_i(\omega) \cdot H_j(\omega)}, \quad (2.23)$$

здесь $H_j(\omega) = (\omega^2 - k_j^2)^2 + \gamma_j^2 k_j^2 \omega^2$, $Z(\omega) = (k_j^2 - \omega^2) \cdot (k_k^2 - \omega^2) + \gamma_j \gamma_k k_j k_k \omega^2$;

$$\sigma_j^2 = \int_0^\infty \frac{S(\omega) d\omega}{H_j(\omega)} \quad (2.24)$$

Не представляет затруднений численное взятие интегралов (2.23 и 2.24). Для ряда процессов (вида функции $S(\omega)$) интегралы (2.23 и 2.24) взяты аналитически [69, 70, 145, 146, 151].

Вторая сумма в формуле 2.20 определяется составляющими смещений от компоненты уравнений (2.18 и 2.19) с \ddot{y}_0 . Сейсмические силы в данной сумме вычисляются по формуле, аналогичной (2.21). Коэффициент корреляции в этом слагаемом определяется интегралами:

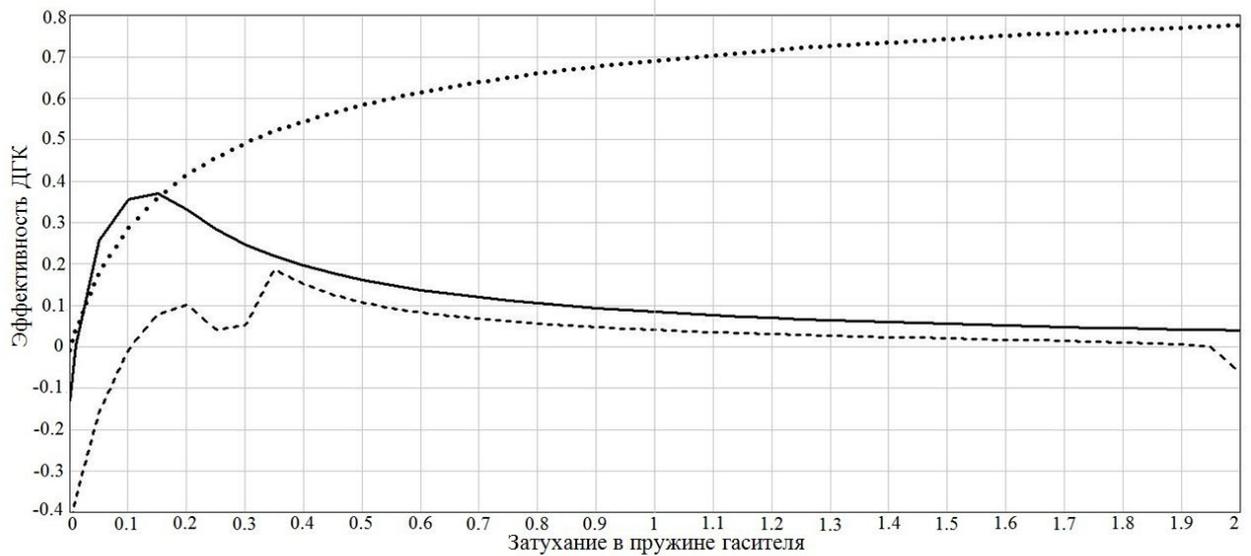
$$K_{ij}^{r(0)} = \int_0^{\infty} \frac{Z(\omega)S(\omega)\omega^2 d\omega}{H_i(\omega) \cdot H_j(\omega)}; \quad (\sigma_j^r)^2 = \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)\omega^4 d\omega}{H_j(\omega)} \quad (2.25)$$

Третья сумма связана с попарной корреляцией компонент смещений вызванных составляющими \ddot{y}_0 и \ddot{y}_0 в уравнении (2.18 и 2.19). Коэффициент корреляции в этом слагаемом определяется интегралами:

$$K_{ij}'^{(0)} = \int_0^{\infty} \frac{Z(\omega)S(\omega)\omega d\omega}{H_i(\omega) \cdot H_j(\omega)}; \quad (\sigma_j')^2 = \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)\omega^2 d\omega}{H_j(\omega)} \quad (2.26)$$

Коэффициенты корреляции факторов, обусловленных второй и третьей производной при $j=k$, равны нулю.

По приведенной методике произведен расчет системы, приведенной на рисунке 2.2. В основном сооружении коэффициент неупругого сопротивления принят $\gamma_c=0.1$, а в пружине гасителя эта величина γ_r варьируется.



- кривая, полученная точным расчетом при гармоническом воздействии
- кривая, полученная по расчету по ЛСМ по СП
- .-.- кривая, полученная по расчету по ЛСМ с учетом влияния демпфирования на формы

Рисунок 2.16. Зависимость эффективности ДГК от затухания в его пружине

Следует отметить, что в рассматриваемой системе, как было показано в ранее, существенны демпфирование и корреляция форм колебаний. В связи с этим расчет перерезывающей силы по основанию стержня выполнен как по нормативной ЛСМ, так и по уточненной методике, учитывающей демпфирование в системе, с использованием формулы (2.20). Соответствующие зависимости величины перерезывающей силы от демпфирования в пружине гасителя приведены на рисунке 2.16. Как видно из рисунка, неоднородное демпфирование и корреляция форм колебаний существенно сказывается на результатах расчета при затухании в пружине гасителя близком к оптимальному, причем, когда не учитывается влияние демпфирования на формы колебаний, получается неконсервативный результат. Уточненная методика позволяет выявить эффекты, которые видны при гармоническом воздействии. Разница между этими двумя кривыми обусловлена тем, что кривые динамичности для точного расчета и расчета по ЛСМ отличаются.

2.4. Выводы по главе 2

1. Выполненные исследования показали, что известные рекомендации по подбору параметров и оценки эффективности ДГК нельзя использовать в системах с большим затуханием в сооружении (больше 5% от критического). В этом случае метод инвариантных точек для подбора параметров ДГК не применим, и оптимизацию работы гасителя приходится выполнять путем перебора значений параметров на сетке их возможных значений. Метод инвариантных точек также не применим при кинематическом возмущении основания. Для гасителей большой массы метод инвариантных точек применим при силовом воздействии на сооружение и отсутствии затухания в сооружении. Известный вывод о неприменимости метода инвариантных точек для системы с ДГК большой массы связан исключительно с наличием затухания в сооружении.

2. При кинематическом возмущении имеется наиболее эффективная масса гасителя, при которой снижения смещении основной массы максимально. При

классическом силовом возбуждении наиболее эффективная масса отсутствует: эффективность ДГК растет с увеличением его относительной массы.

3. С ростом относительной массы гасителя оптимальная настройка снижается, а демпфирование увеличивается. Скорость падения настройки и роста демпфирования увеличивается с ростом затухания в сооружении.

4. При кинематическом возмущении имеется критическая масса гасителя, после превышения значения которой падение настройки прекращается. Данная точка определяется условием:

$$\left. \frac{df}{dv} \right|_{v=v_{кр}} = 0$$

Ранее в литературе отмечалось наличие критической массы, и указывалось её значение равное примерно двум. Это утверждение справедливо при отсутствии затухания в сооружении. В этом случае критическая масса равна 1,9. При наличии затухания в сооружении критическая масса может быть значительно меньше, например, при затухании в сооружении равном 0,3 критическая масса равняется 1,04. Для классического силового воздействия критическая масса отсутствует.

5. Нормативный вариант ЛСМ позволяет учесть эффект ДГК для сейсмозащиты сооружений. При этом, если масса гасителя меньше предельного значения v_{lim} , возможна и оценка настройки ДГК. Эффективность ДГК в этом случае оценивается в запас.

6. Для более точной оценки эффективности ДГК необходимо использовать уточненный вариант ЛСМ [7], в котором вводится поправка, учитывающая затухание по формам колебаний (модальное демпфирование). В этом случае использование ЛСМ позволяет оценить работу ДГК с некоторым запасом при затухании в пружине гасителя $\gamma_r > 0,3$ (15% от критического значения). При чем с ростом массы гасителя возможность применения ЛСМ вплоть до критического значения γ_r при $v > 0,7$.

7. При $v > 0,6$, когда оптимальная настройка демпфирования составляет 75% от критического значения расчет по ЛСМ приводит к большим погрешностям, завышая эффективность ДГК и не давая возможности определить его настройку.

8. Приведенный пример расчета по ЛСМ, учитывающей влияние затухания по формам колебаний, иллюстрирует возможность применения ЛСМ для анализа работы и подбора параметров ДГК. Различие между расчетом на гармоническое воздействие и расчетом по ЛСМ не носят качественного характера и обусловлены различным видом кривых динамичности в расчетах на гармонику и по ЛСМ. Использование уточненного варианта ЛСМ с учетом влияния демпфирования на формы колебаний позволяет учесть основные качественные особенности работы ДГК и подобрать оптимальное демпфирование в пружине гасителя.

3. РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ С ДГК ПО АКСЕЛЕРОГРАММАМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При динамическом расчете сооружения можно использовать записи прошедших землетрясений или сгенерированные акселерограммы.

При использовании акселерограмм произошедших землетрясений необходимо производить расчет на пакет записей, т.к. неизвестно, какая из акселерограмм окажется наиболее опасной. Как правило, используют пакет из 60-100 записей, каждый расчет рассматривают, как реализацию случайного процесса, а результат осредняют по выборке [21].

При генерации акселерограмм существует два принципиальных подхода: генерация под площадку строительства и под сооружение [101].

Первый подход предлагается сейсмологами [13, 23, 120] и должен учесть все сейсмологические особенности площадки строительства: глубину и расположение возможных очагов землетрясений (ВОЗ), рельеф местности, грунтовые условия и т.п. Основными недостатками данного подхода является ограниченность исходной сейсмологической информации и отсутствие учета динамических свойств рассчитываемого сооружения при генерации воздействия. Ограниченность нашей информации о воздействии иллюстрирует тот факт, что из 27 сильных землетрясений, имевших место на территории бывшего СССР, 24 произошли в районах, считавшихся не сейсмичными или слабосейсмичными [107]. Необходимость учета свойств сооружения обусловлена тем, что даже при возможности получения полной сейсмологической информации данные сейсмологов имеют погрешности, а даже небольшие изменения спектрального состава воздействия могут существенно повлиять на реакцию сооружения. В связи со сказанным, расчет по акселерограммам, сгенерированным под площадку строительства, может приводить к неверным техническим решениям. В связи с этим обычно генерируют несколько акселерограмм, а также прибегают к варьированию преобладающих частот воздействия в рамках сейсмологических данных [107].

При генерации воздействия опасного для сооружения [14, 24, 39, 87, 148] задается модель воздействия с опасной (резонансной) для сооружения частотой. Как известно, для линейного осциллятора наиболее опасным является воздействие в виде прямоугольного синуса [111] с опасной для сооружения частотой, равной резонансной частоте сооружения. Однако удорожание сооружения оказывается достаточно значительным, что приводит к необходимости дальнейшего уточнения модели воздействия. Для этого задаются многопараметрической функцией, состоящей из набора затухающих синусоид или подобных осциллирующих функций. Частота осцилляций подбирается опасной для сооружения. Для линейных систем это собственные частоты колебаний сооружения. Простейшим синтетическим воздействием является затухающая синусоида, использованная И.Л. Корчинским в 1954 г. [49]. Обобщение этого воздействия предложено А.А. Долгой [31]. Ею для описания велосиграммы использовано следующее представление:

$$\dot{y}_0 = \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_i t \quad (3.1)$$

Частоты ω_i назначаются опасными (резонансными) для сооружения. Шесть параметров (три амплитуды A_i и три затухания ε_i) являются неопределенными. Дополнительным, седьмым параметром является продолжительность воздействия. Более сложная модель воздействия предложена в работах [107], где синтетическая велосиграмма записывается в виде:

$$\dot{y} = v(t + \phi) + \sum_{i=1}^3 e^{-\alpha_i t} (1 - e^{-\beta_i t}) A_i \sin \omega_i t \quad (3.2)$$

$$\text{Здесь } v(t) = \begin{cases} 0 & \text{если } t < T_* \\ a + b & \text{если } T_A < t < \frac{T}{2} \\ -a + b & \text{если } T_A + \frac{T}{2} < t < T_A + \tau \\ 0 & \text{если } t > T_A + \tau \end{cases} \quad (3.3)$$

На рисунке 3.1 приведен вид импульса скорости и соответствующие ему акселерограмма и сейсмограмма.

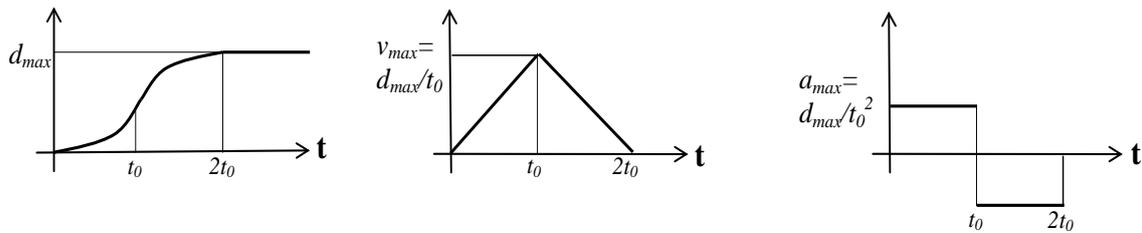


Рисунок 3.1. Графики смещений, скоростей и ускорений для импульса скорости

Продолжительность $2t_0$ и остаточное смещение d_{\max} зависит от магнитуды M_w и гипоцентрального расстояния R .

$$t_0 = 10^{(-3.471+0.5 \cdot M_w)}; \quad d_{\max} = 10^{(-6.3+M_w - \log(R))} \quad (3.4)$$

В результате выражение (3.2) характеризуется двенадцатью неопределенными параметрами: тремя амплитудами A , шестью показателями затухания α_i и β_i , двумя параметрами очага M_w и R и моментом начала импульса ϕ . Неопределенные параметры в выражениях (3.1,3.2) подбираются так, чтобы свойства сгенерированного воздействия соответствовали свойствам реальных акселерограмм. Эти свойства, хотя и рассматривались в литературе [110], до настоящего времени не определены однозначно.

Так же важно отметить, что при проектировании зданий на сейсмическое воздействие производят расчет на несколько уровней воздействия. Минимум на два: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Для каждого из уровней воздействия определяющие характеристики землетрясения различны. При ПЗ сооружение работает в упругой стадии, и усилия и перемещения в элементах конструкции пропорциональны уровню ускорений. Чем больше ускорения, тем больше соответствующие факторы. Поэтому основной характеристикой ПЗ является пиковое ускорение, или PGA (pick grund acceleration). При проектировании на МРЗ необходимо исключить малоцикловую усталость и прогрессивное обрушение основных несущих конструкций. Критерием этих повреждений является работа сил пластического

деформирования. Для разрушения конструкции необходимо совершить работу, для чего землетрясение должно обладать достаточной энергией. Большие кратковременные пиковые ускорения могут быть совершенно безопасными. В связи с этим при генерации воздействия нужно обращать внимание на энергетические характеристики воздействия.

3.1. Требования к расчетным акселерограммам при подборе параметров и оценке эффективности ДГК. Основные характеристики сейсмического воздействия

В литературе [26, 107, 110] выделяют три группы характеристик сейсмического воздействия: кинематические, спектральные и энергетические.

Спектральные характеристики модели воздействия задаются частотами ω_i наиболее опасными для сооружения и далее не рассматриваются.

Для анализа кинематических и энергетических характеристик было проанализировано около 100 записей сильных землетрясений.

Кинематические характеристики землетрясений включают пиковые ускорения, скорости, смещения, остаточные смещения, продолжительность воздействия и коэффициент гармоничности [107]. Кроме того, к кинематическим характеристикам следует отнести пиковое ускорение и продолжительность импульса скорости, который можно выделить из любого воздействия [26]. Кинематические характеристики воздействия являются основными для расчета на проектное землетрясение (ПЗ), поскольку они определяют напряженно деформированное состояние упругой конструкции. Наиболее распространенной кинематической характеристикой является пиковое ускорение (PGA). Оно нормируется в строительных нормах [97]. В действующих нормах PGA принято для 9-балльных воздействий равным 4 м/с^2 . Это значение попало в нормы из шкалы балльности [94], подготовленной в 1952 г. Опыт прошедших землетрясений показал ошибочность этой величины. Так, Бухарестское землетрясение 1977 г. имело пиковые ускорения всего 2 м/с^2 , а Табасское – более 9 м/с^2 . Этот вопрос подробно обсуждался в литературе [101, 105]. В частности,

было установлено, что пиковое ускорение падает с ростом преобладающего периода землетрясения T_{eq} . Наиболее четко это показано в работе А.А. Долгой [31], где получены аппроксимирующая зависимость $A(T_{eq})$ по данным обработки 240 8-балльных записей. Полученная в [31] зависимость $A(T_{eq})$ приведена на рисунке 3.2. а. В работе [19], выполненной при участии автора, проведен аналогичный анализ 100 записей 9-балльных воздействий, собранных российскими и китайскими специалистами. Результаты статистической обработки пиковых ускорений по этим воздействиям приведены на рисунке 3.2. б, 3.2. в. На рисунке 3.2 б приведена аппроксимирующая кривая, близкая по параметрам к зависимости [31] и имеющая вид

$$A = a \cdot \left(e^{-1.8 \cdot T_{eq}} + c \cdot e^{-4.1 \cdot T_{eq}} \right) + b, \quad (3.5)$$

а на рисунке 3.2 в - аналогичная кривая, полученная с оптимизацией показателей степени в и имеющая аналитическое представление вида

$$A = a + b \cdot e^{-\alpha \cdot T_{eq}} + c \cdot e^{-\beta \cdot T_{eq}}. \quad (3.6)$$

Т.к. разброс точек очень большой, то вид кривых на рисунках 3.2 б и 3.2 в получается разный, при этом погрешность построения примерно одинаковая, из-за чего трудно отдать предпочтение той или другой кривой.

Эти данные подтверждают зависимость амплитуды от преобладающего периода воздействия. В [31, 32, 133] показано, что при фиксированном периоде T_{eq} величина пикового ускорения распределена по закону Вейбула. При этом можно оценить расчетное ускорение с заданной вероятностью превышения.

Можно аналогичным образом задать скорости и смещения, но имеющийся опыт генерации расчетных акселерограмм показывает, что более важной характеристикой является коэффициент κ , называемый коэффициентом гармоничности и определяемый следующим образом

$$\kappa = \frac{\ddot{y}_0^{(\max)} \cdot y_0^{(\max)}}{\left(\dot{y}_0^{(\max)} \right)^2} \quad (3.7)$$

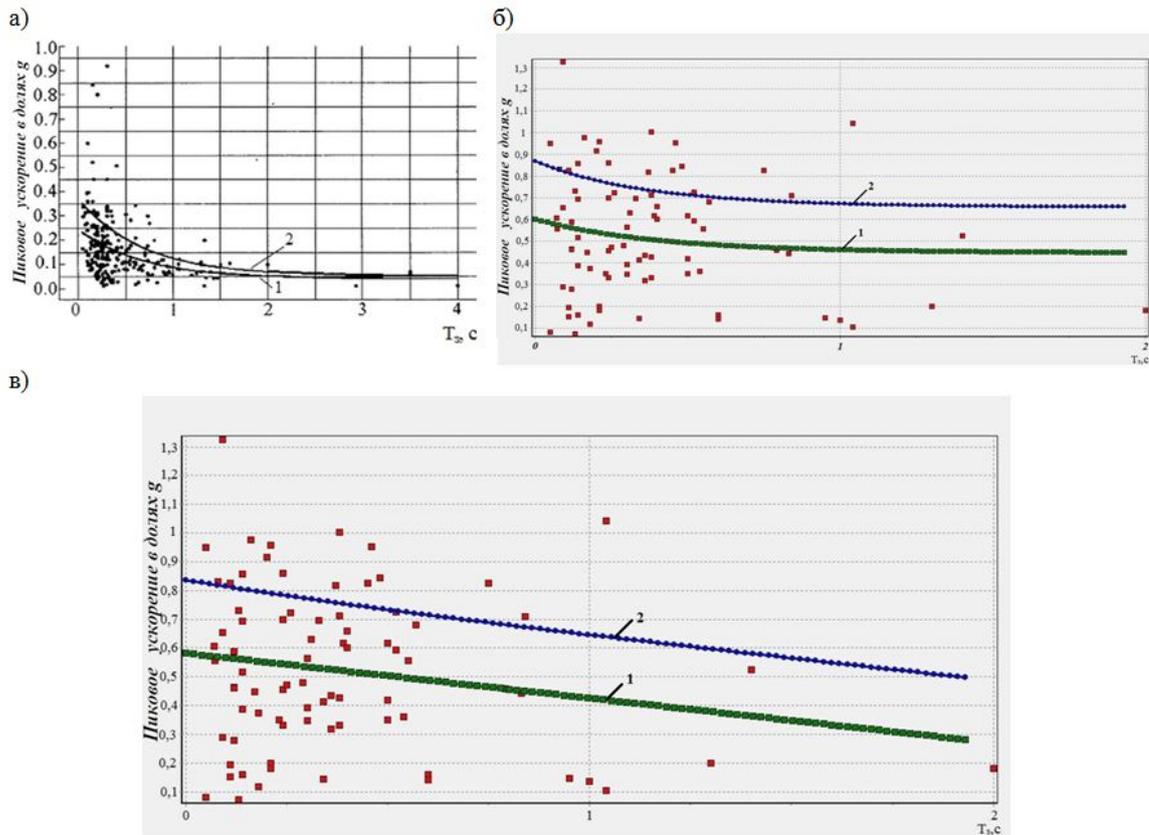


Рисунок 3.2. Зависимость пиковых ускорений от преобладающего периода воздействия T_z

а) для 8 баллов по данным [5]; б) по данным авторов; в) по данным авторов с оптимизацией показателей

1 – среднее значение ускорений; 2 – среднее значение ускорений с учетом среднеквадратического отклонения

Коэффициент гармоничности не позволяет генерировать монохромные воздействия. Для гармоник $k=1$. По американским рекомендациям, приведенным в [18], величина коэффициента k принимается равной пяти. Эта цифра соответствует калифорнийским землетрясениям. Исследования [19] показали, что величина k снижается с ростом преобладающего периода землетрясения T_{eq} . Данные имеющихся записей землетрясений подтверждают указанную закономерность. На рисунке 3.3 приведены зависимости $k(T_{eq})$ для имеющихся акселерограмм. Из рисунка видно, что, во-первых $k(T_{eq})$ – убывающая функция и, во-вторых, разброс величины k весьма значителен от 1.1 до 34.

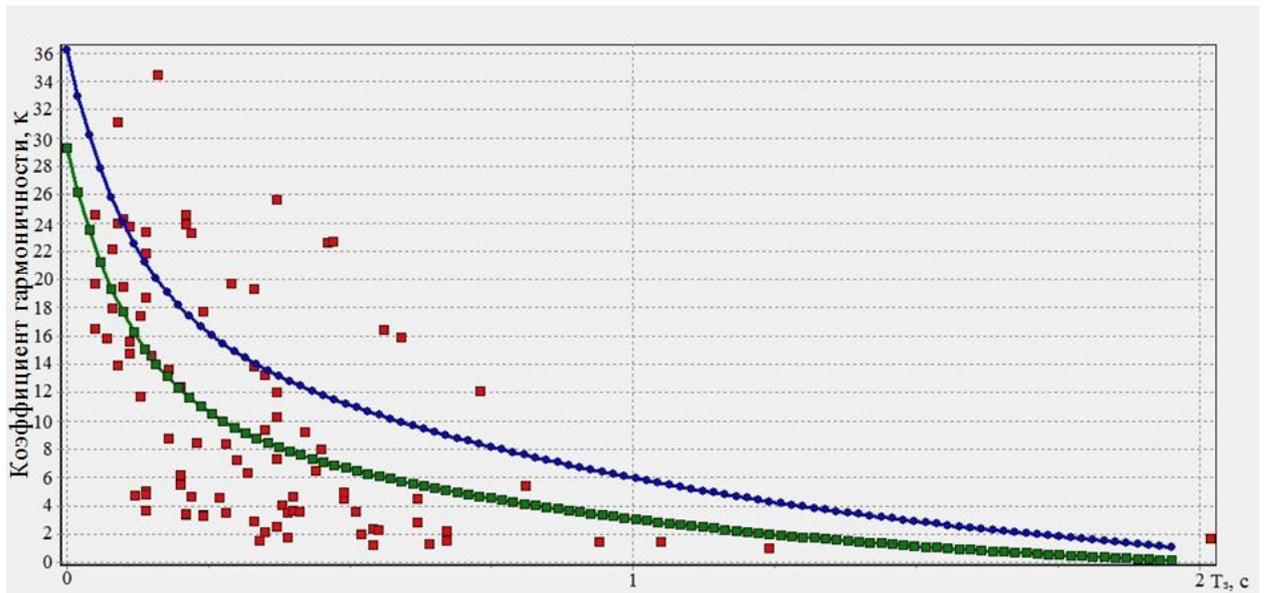


Рисунок 3.3. Зависимость коэффициента гармоничности от преобладающего периода воздействия T_z

Большие значения k связаны с полигармоничностью процесса. В этом случае энергия воздействия распределена между многими частотами. Если же k близко к 1, то в воздействии преобладает одна гармоника. Если эта гармоника резонансная, то воздействие будет опасным для сооружения. В связи со сказанным при генерации воздействия следует назначить величину k по нижней доверительной границе с принятой вероятностью выхода за границу.

Возможность представление воздействия в виде импульса скорости и полигармонического процесса теоретически обоснована сейсмологами [137], а в работе [170] выявлено наличие составляющей в виде импульса скорости в реальных акселерограммах. В связи с этим параметры этого импульса тоже можно отнести к кинематическим характеристикам воздействия. Его задание определяет и другие кинематические характеристики, прежде всего, остаточное смещение. Наличие в воздействии импульса скорости обусловлено природой сейсмического воздействия, и сейсмологи связывают параметры импульса с характеристиками очага [137]. Что касается момента включения импульса скорости в акселерограмме, то он зависит от многих факторов, но прежде всего от момента включения аппаратуры. Имеются записи, на которых первые 10-15 сек.

наблюдаются слабые высокочастотные вибрации, а некоторые записи начинаются непосредственно с интенсивной фазы колебаний. Для имеющихся записей произведен анализ момента включения импульса по следующей методике. Принималось, что сейсмограмма представлена в виде:

$$y = V(R, M, lag) + y_{noise} \quad (3.8)$$

Параметры R , M и lag варьировались на сетке возможных значений, и выбиралась тройка (R, M, lag) , при которой остаточные смещения части воздействия y_{noise} минимальны. С целью исключения зависимости lag от начала записи эта величина измерялась от момента, когда ускорение достигало значения $0,25 \text{ м/с}^2$. Это значение часто используется для выделения интенсивной части землетрясения [150]. На рисунке 3.4 приведена зависимость $lag(T_{eq})$. Значение lag возрастает с ростом преобладающего периода воздействия T_{eq} .

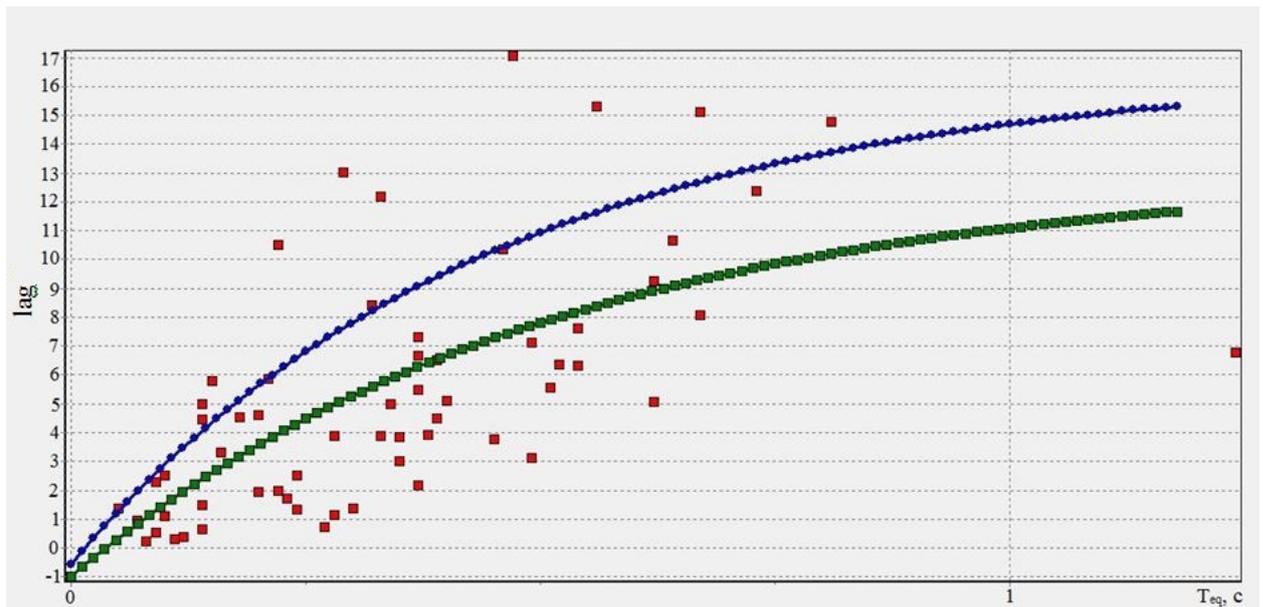


Рисунок 3.4. Зависимость lag от преобладающего периода воздействия T_{eq}

К числу важных кинематических показателей относятся продолжительность воздействия τ_{eq} и остаточное смещение d_{max} . Последнее однозначно определяется параметрами импульса по формулам (4).

Энергетические характеристики должны быть основными в расчетах на МРЗ. Это обусловлено тем, что при действии МРЗ условия прочности заведомо

нарушаются, а предельным состоянием является возникновение прогрессирующего обрушения или малоциклового усталости конструкции [27, 57]. Эти предельные состояния возникают, если работа сил пластического деформирования превысит некоторое допустимое значение. Таким образом, оценка сейсмостойкости должна носить энергетическую форму. Этот факт можно представить математически. Уравнение сейсмических колебаний одномассовой системы имеет вид:

$$m\ddot{y} + R(\dot{y}) + cy = -m\ddot{y}_0 \quad (3.9)$$

здесь m – масса сооружения, y – его перемещение, $R(\dot{y})$ – силы сопротивления, c – жесткость сооружения, \ddot{y}_0 – акселерограмма землетрясения. Если умножить обе части уравнения на $dy=dt \quad dy = \dot{y}dt$, и проинтегрировать по времени воздействия, то получим энергетическую форму уравнения сейсмических колебаний:

$$\int_0^t m\dot{y}\ddot{y}dt + \int_0^t R(t)\dot{y}dt + \int_0^t cy\dot{y}dy = \int_0^t m\dot{y}_0\dot{y}dt \quad (3.10)$$

здесь первое слагаемое – работа сил инерции в относительном движении, второе слагаемое – работа сил сопротивления, третье слагаемое – работа сил упругости. Расчеты показывают, что определяющим является второе слагаемое и в случае, если интеграл в правой части превысит предельную работу сил сопротивления, произойдет разрушение конструкции. Разные авторы [69, 79, 80, 124, 150 и др.], пытались оценить этот интеграл. В результате появились энергетические характеристики воздействия

- Интенсивность по Ариасу

$$\bullet \quad I_A = \frac{\pi}{2g} \cdot \int_0^{T_{eq}} (\ddot{y}_0(t))^2 dt \quad (3.11)$$

- Абсолютная кумулятивная скорость

$$\bullet \quad CAV = \int_0^{T_{eq}} |\ddot{y}_0(t)| dt \quad (3.12)$$

- Плотность сейсмической энергии

$$\bullet \quad SED = \int_0^{T_{eq}} (\dot{y}_0(t))^2 dt \quad (3.13)$$

Заметим, что величины I_A и CAV имеют размерность $[м/с]$, а величина SED – $[м/с^2]$. Чтобы привести их к одной размерности предлагается использовать другую характеристику – корень из распределенной плотности сейсмической энергии, которая имеет размерность $[м/с]$.

$$SED_{\text{mod}} = \sqrt{\frac{SED}{T_{eq}}} \quad (3.14)$$

На рисунках 3.5 - 3.8 приведены зависимости четырёх рассмотренных характеристик от преобладающего периода воздействия T_{eq} .

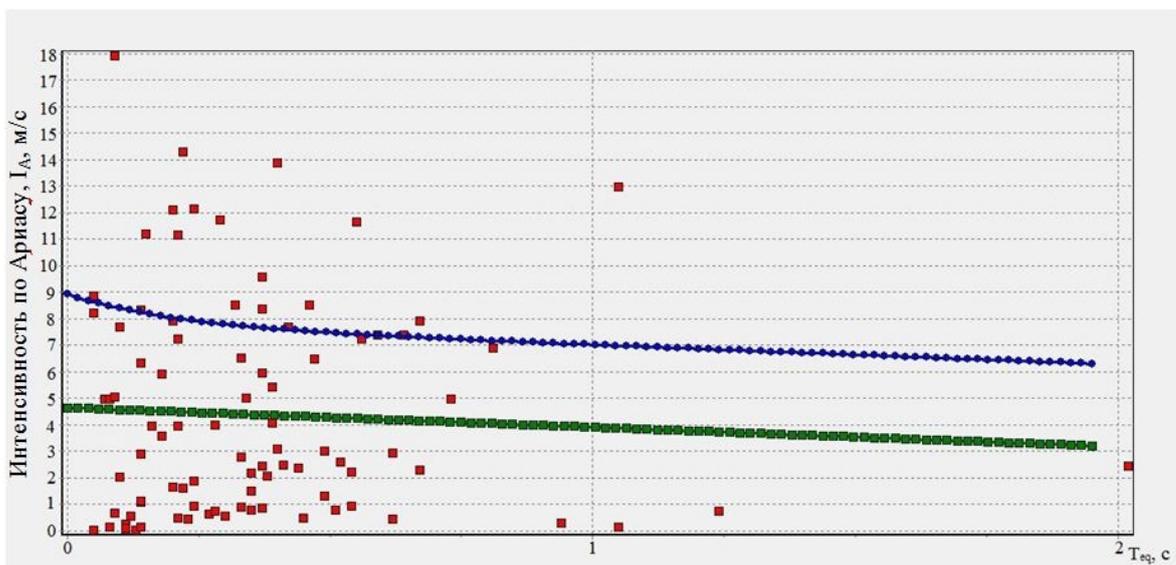


Рисунок 3.5. Зависимость интенсивности по Ариасу от преобладающего периода воздействия T_{eq}

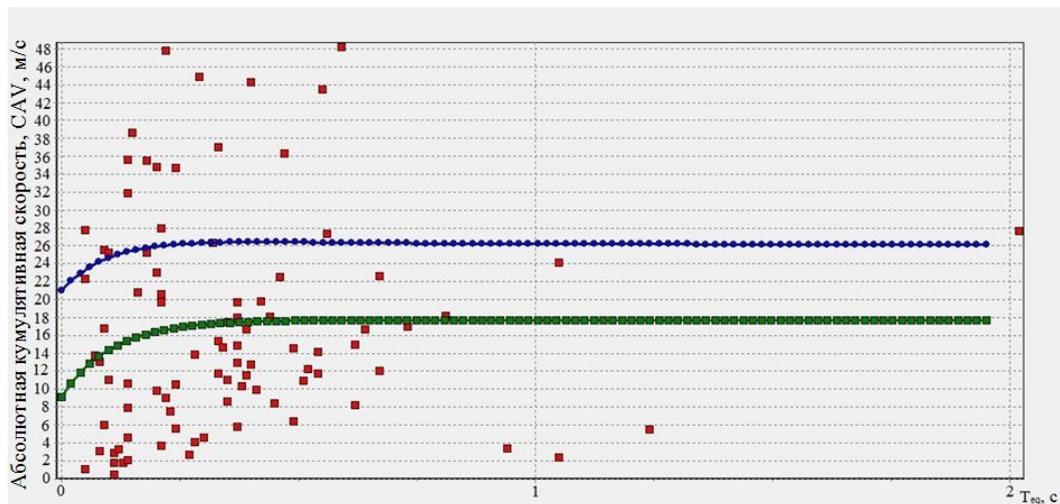


Рисунок 3.6. Зависимость абсолютной кумулятивной скорости от преобладающего периода воздействия T_{eq}

Недостатком рассмотренных характеристик является неопределенность значения времени землетрясения T_{eq} , определяющая значения интегралов в формулах (10-13). В литературе высказываются различные предложения по этому вопросу [12, 13, 69]. В [150] из акселерограммы исключаются участки с ускорениями менее $0,25 \text{ м/с}^2$ и такие значения параметров обозначаются как стандартные $I_A^{(STD)}$, CAV_{STD} и т.д.

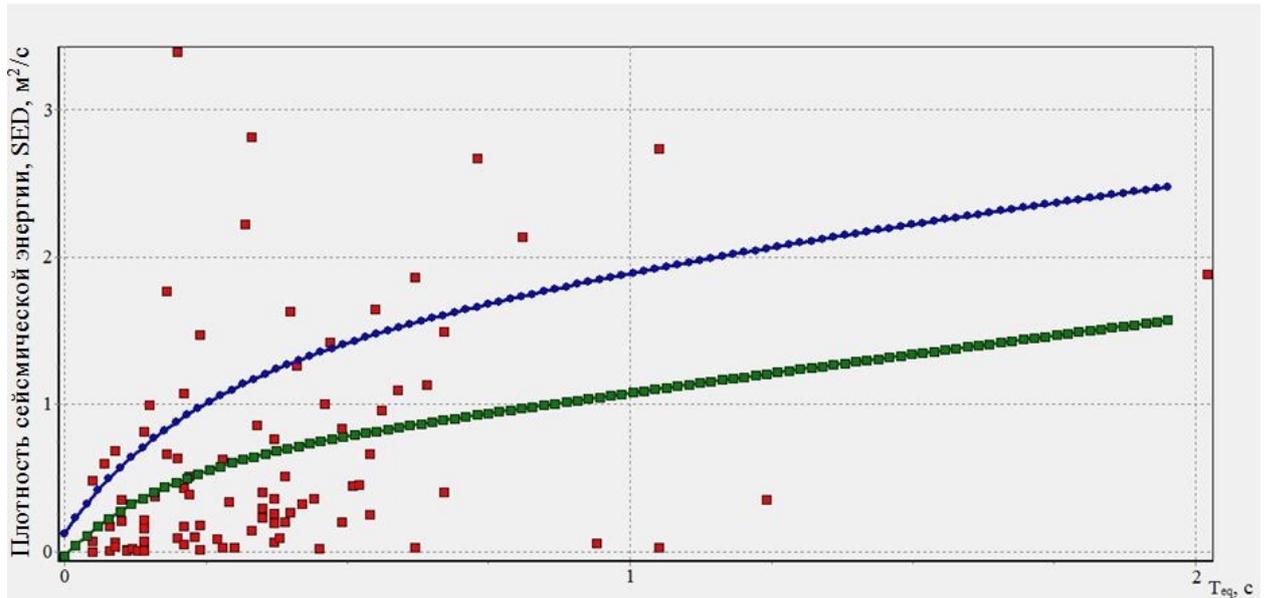


Рисунок 3.7. Зависимость плотности сейсмической энергии от преобладающего периода воздействия T_{eq}

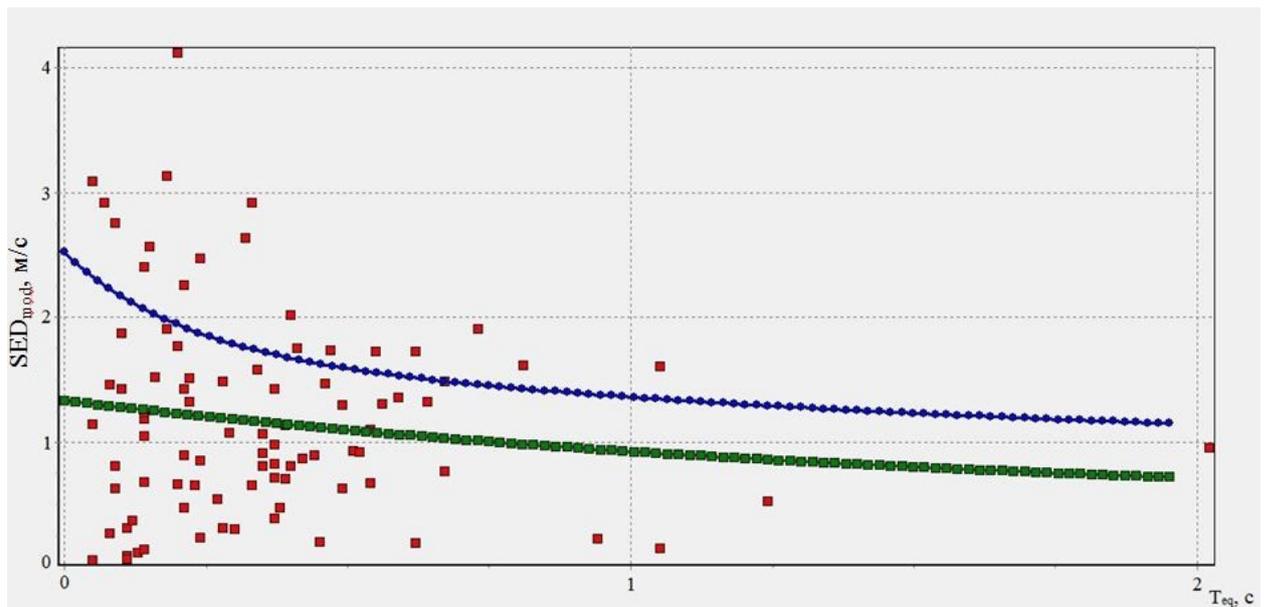


Рисунок 3.8. Зависимость модифицированной плотности сейсмической энергии от преобладающего периода воздействия T_{eq}

В рамках работы по международному гранту ГФЕН № № 16-58-53095 «Развитие теории предельных состояний для обеспечения сейсмостойкости строящихся и эксплуатируемых железнодорожных мостов», выполненной при участии автора диссертации, был предложен новый универсальный энергетический критерий для оценки силы землетрясения [62]. Для этого строятся спектры работы сил пластического деформирования $W(f, T)$. Построение осуществляется на базе решения уравнения:

$$\ddot{y} + \gamma k \dot{y} + C(y, \dot{y}) = -\ddot{y}_0 \quad (3.15)$$

$$\text{где } C(y, \dot{y}) = \begin{cases} f_g \text{ sign } \dot{y} & \text{if } y > y_{el} \\ k^2 y & \text{if } y < y_{el} \end{cases}$$

$$y_{el} = \frac{gf}{k^2} - \text{предельное упругое смещение}$$

Для построения спектра $W(f, T)$ осуществляется пошаговое решение уравнения (3.9) и, если на данном шаге $y > y_{el}$, вычисляется соответствующая работа $f_g \cdot \Delta y$, где Δy – приращение смещений на данном шаге. Расчеты выполнены при $\gamma = 0,15$, что соответствует литературным данным [107]. На рисунках 3.9, 3.10 показаны примеры зависимостей $W(f, T)$ для Бухарестского и Табасского землетрясений. Хотя землетрясения внешне совсем не похожи и по пиковым ускорениям отличаются в 4 раза, их спектры $W(f, T)$ весьма близки. Представляется естественным объем под поверхностью $W(f, T)$ использовать для оценки силы землетрясения. Чтобы соблюсти размерность [м/с], необходимо из этой величины извлечь корень. Полученный показатель назван в диссертации SEI (seismic energy index)

$$SEI = \sqrt{\int_f \int_T W(f, T) df dt} \quad (3.16)$$

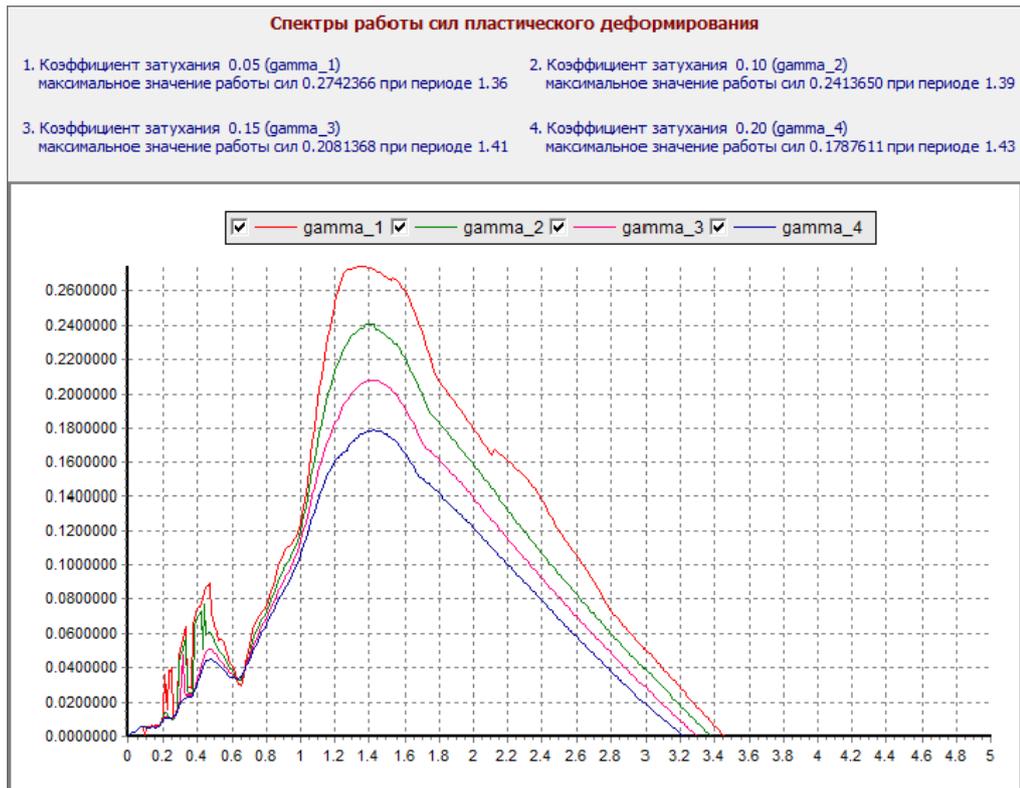


Рисунок 3.9. Спектры работы сил пластического деформирования для Бухарестского землетрясения с пиковым ускорением 0.2g

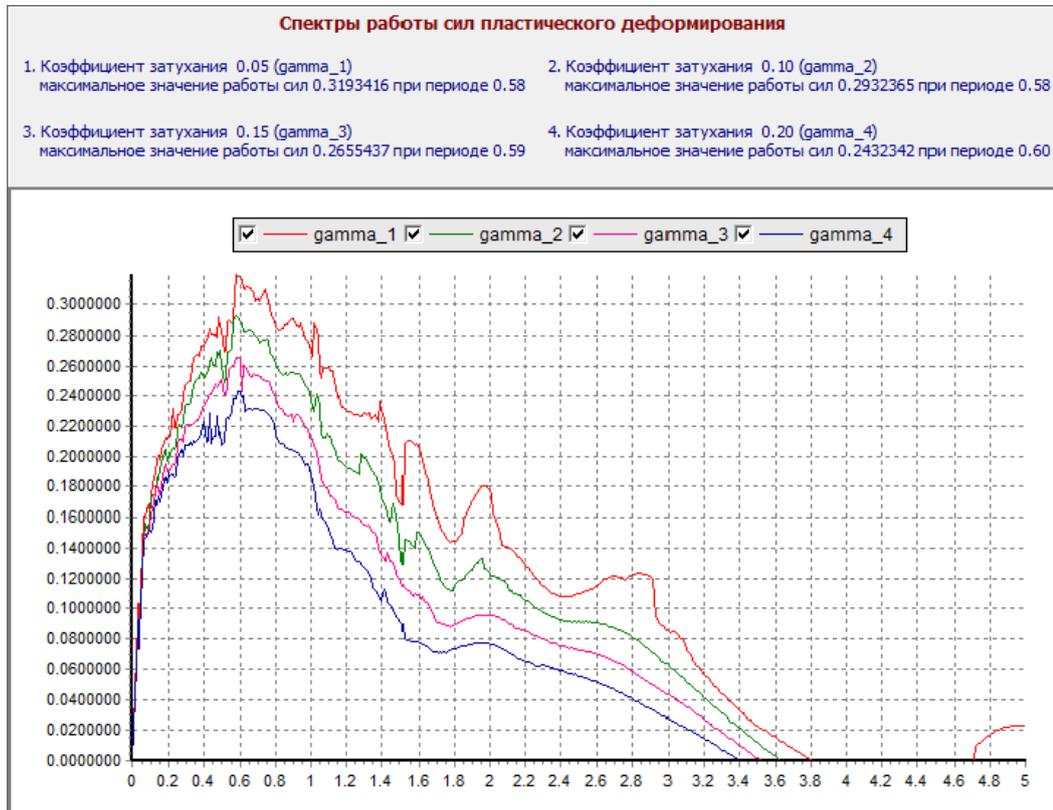


Рисунок 3.10. Спектры работы сил пластического деформирования для Табасского землетрясения с пиковым ускорением 0.2g

Данный показатель имеет два преимущества по сравнению с существующими. Во-первых, он не требует задания продолжительности землетрясения. Эффективная часть воздействия начинается, когда начинается переход от упругой ветви диаграммы деформирования к пластической. Естественно, что для разных сооружений продолжительность интенсивных колебаний будет различной, однако она получается в процессе расчета автоматически. Во-вторых, предлагаемый показатель позволяет оценить потенциальные разрушительные способности сейсмического воздействия. Сейчас силу землетрясения оценивают по повреждениям сооружений, оказавшихся в зоне сейсмических толчков. При этом в зоне могут оказаться только сооружения одного типа, например, малоэтажные здания. Длиннопериодное воздействие будет безопасно для них, и его сила будет недооценена. При оценке же показателя SEI землетрясению даётся возможность выбрать все сооружения, над повреждениями которых оно может поработать. Слабым является землетрясение, которое не может повредить никакое сооружение.

3.2. Методика и программа генерации сейсмического воздействия

С учетом выполненного анализа кинематических, спектральных и энергетических характеристик сейсмического воздействия были разработаны методика и программа генерации расчетного сейсмического воздействия.

Модель воздействия характеризуется некоторым набором неопределенных параметров. Так, модель, описываемая уравнением (1), имеет 7, а уравнением (2) - 12 неопределенных параметров. Эти параметры перебираются на сетке их возможных значений. Для каждого варианта значений параметров вычисляется невязка

$$er = \sum p_i \Delta_i^2 \quad (3.17)$$

где Δ_i – невязка по i -ой характеристике, p_i – соответствующий весовой коэффициент.

Неопределенные параметры перебираются на сетке их возможных значений, и для каждого варианта вычисляется невязка по формуле (3.17). Выбираются значения параметров, дающие наименьшую невязку.

Задавая различные весовые показатели характеристик, можно получать различные воздействия с близким спектральным составом. Это обстоятельство можно использовать для генерации воздействий при многоуровневом проектировании. При таком проектировании задаются минимум двумя уровнями воздействия [88, 89]: проектное землетрясение (ПЗ) повторяемостью раз в 50-100 лет и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) – раз 500-5000 лет. При ПЗ здание должно работать упруго, без повреждений. Расчет на ПЗ – силовой. В таком случае при генерации воздействия основной характеристикой являются пиковые ускорения. Расчет на МРЗ – неупругий, т.е. условия прочности не выполняются. В таком случае конструкции рассчитываются на малоцикловую усталость или прогрессивное обрушение, т.е. расчет – энергетический, и основными характеристиками воздействия становятся энергетические.

В соответствии с изложенной методикой на языке C++ в среде windows разработана программа генерации воздействия. Окно программы представлено на рисунке 3.11.

В представленной программе в качестве общих исходных данных задаются 5 энергетических и кинематических показателей. Частоты сооружения задаются резонансными для сооружения. Энергетические и кинематические характеристики предлагается задавать по полученным эмпирическим данным. В последней колонке общих данных задаются весовые коэффициенты задаваемых параметров. В приведенном примере генерируется акселерограмма для ПЗ, поэтому веса энергетических коэффициентов заданы нулевыми. В рассматриваемом варианте модель воздействия имеет 5 варьируемых параметров и дополнительный параметр – продолжительность воздействия, который варьируется от 10 до 30 с. Амплитуда второй синусоиды задается так, чтобы в начальный момент времени смещение равнялось 0. Описание параметров

воздействия и особенностей их перебора описано в Рекомендациях [76] и учебном пособии [107].

Общие данные

| | | | |
|---|------|---------|-----|
| Интенсивность по Ариасу Ia* | 6 | P_Ia* | 0 |
| Скорость САУ | 5 | P_CAV | 0 |
| Показатель гармоничности Карра | 1.5 | P_Kappa | 0.3 |
| Коэффициент динамичности Beta | 2.5 | P_Belta | 0 |
| Пиковое ускорение сейсмического воздействия Acalc (м/с ²) | 3.79 | P_Acalc | 0.7 |

Параметры синусоид синтетической акселерограммы

Преобладающие частоты

| | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|-----|--------|
| W 1 | 3.977 | W 2 | 3.491 | W 3 | 31.416 |
|-----|-------|-----|-------|-----|--------|

Диапазоны изменения амплитуд скоростей

| | | | | | |
|----------|-------|----------|---------|------------|-------|
| A1 (нач) | 0.43 | A1 (кон) | 0.48001 | Шаг для A1 | 0.01 |
| A3 (нач) | 0.049 | A3 (кон) | 0.05401 | Шаг для A3 | 0.001 |

Диапазоны изменения затуханий

| | | | | | |
|----------|---------|----------|--------|------------|------|
| e1 (нач) | 0.19 | e1 (кон) | 0.2501 | Шаг для e1 | 0.01 |
| e2 (нач) | 3.79999 | e2 (кон) | 4.8 | Шаг для e2 | 0.2 |
| e3 (нач) | 0.6 | e3 (кон) | 1.201 | Шаг для e3 | 0.1 |

Buttons: **Расчет**, **SIN**

Рисунок 3.11. Окно программы генерации сейсмических воздействий

Особенностью разработанной программы и методики является дополнительное требование доминирования первой гармоники. Это требование сводится к наложению на процесс трех условий

$$\begin{aligned}
 A_1^2 &> A_2^2 + A_3^2 \\
 A_1^2 \omega_1 &> A_2^2 \omega_2 + A_3^2 \omega_3 \\
 A_1^2 \omega_1^2 &> A_2^2 \omega_2^2 + A_3^2 \omega_3^2
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Эти условия обеспечивают тот факт, что первая компонента воздействия вносит наибольший вклад, как в PGA, так и в энергетические характеристики воздействия. В этом случае можно говорить о преобладающей частоте

воздействия, которая определяет предполагаемое значение PGA в сгенерированной акселерограмме.

3.3. Расчет сооружения с ДГК по акселерограммам землетрясений

Для расчета сооружения с ДГК были сгенерированы по приведенной методике акселерограммы, опасные для сооружения, для расчета на проектное землетрясение. При расчете на МРЗ необходимо рассматривать работу сооружения в нелинейной стадии, что рассмотрено в следующей главе. Генерируются три акселерограммы: опасная для сооружения и опасная для сооружения с ДГК (по частотам первой и второй формы колебаний), т.к. у этих двух систем различные резонансные частоты колебаний. Параметры генерируемых акселерограмм приведены в таблице 3.1. Для анализа работы ДГК выбрана реальная система мостовой опоры с пролетным строением в качестве гасителя, представленная на рисунке 3.12. Опора задается 5 массами и ДГК- 1 массой, данная система имеет 6 форм колебаний.

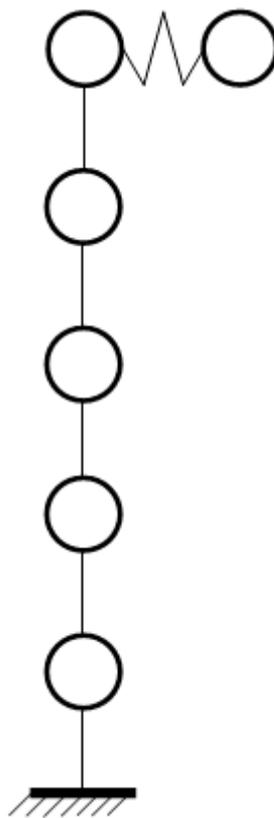


Рисунок 3.12. Расчетная схема для расчета по акселерограммам

Исходные данные для генерации акселерограмм

| Название задаваемой характеристики | Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК (рисунок 3.13) | Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК 1 частота (рисунок 3.14) | Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК 2 частота (рисунок 3.15) |
|--------------------------------------|---|---|---|
| Ускорения сооружения, м/с^2 | 4,02 | 3,49 | 4,14 |
| Преобладающий период, с | 0,099 | 0,178 | 0,083 |

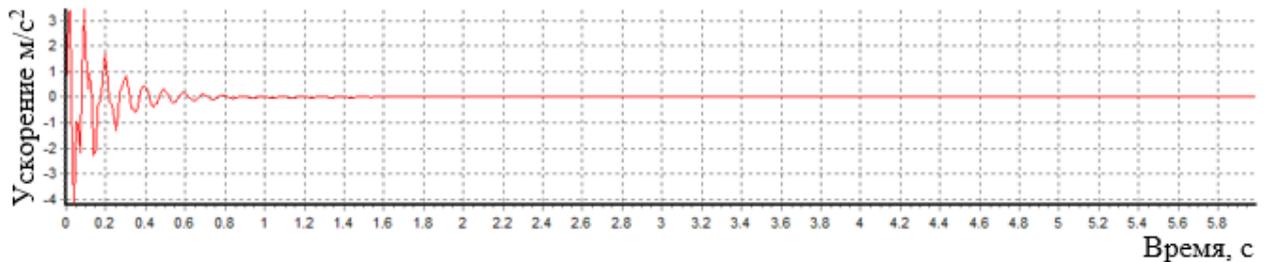


Рисунок 3.13. Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК

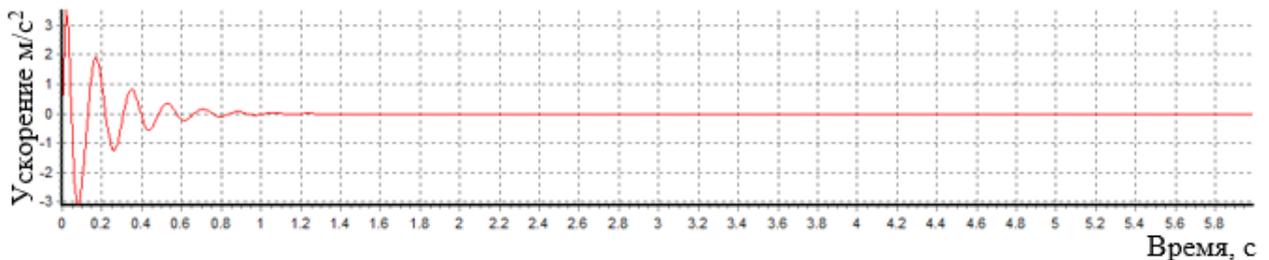


Рисунок 3.14. Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК по первой частоте

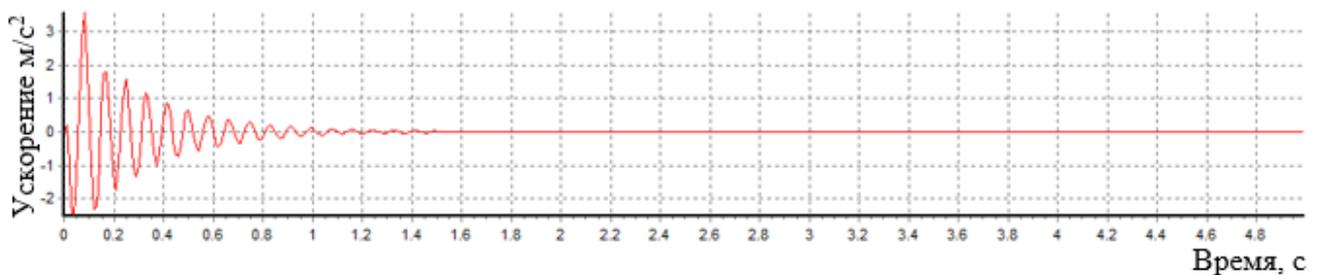


Рисунок 3.14. Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК по второй частоте

Результаты расчета

| Название сравниваемой характеристики | Сооружения без ДГК | Сооружения с ДГК | | |
|---|---|---|--|--|
| | Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК | Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК | Акселерограмм а, опасная для сооружения с ДГК 1 частота | Акселерограмм а, опасная для сооружения с ДГК 2 частота |
| Ускорения сооружения, м/с ² | 11,5 | 9 | 6,5 | 9 |
| Ускорения ДГК, м/с ² | - | 5,5 | 9 | 8 |
| Смещение опоры, м | 0,0029 | 0,0012 | 0,002 | 0,002 |
| Смещение ДГК, м | - | 0,0025 | 0,007 | 0,004 |
| Момент по подошве фундамента, кНм | 320 | 180 | 260 | 259 |
| Перерезывающ ие силы по подошве фундамента, кН | 136 | 110 | 130 | 130 |
| Перерезывающ ие силы по верху сооружения, кН | 35 | 26 | 36 | 26 |
| Усилие в пружине | - | 84 | 94 | 104 |

По данным таблицы 3.2 видно, что расчет только на акселерограмму, опасную для сооружения без ДГК (рисунок 3.15, 3.16) завышает эффективность ДГК. Для расчета сооружения с ДГК следует использовать акселерограммы, сгенерированные опасными для сооружения с ДГК. Акселерограмма, сгенерированная по частоте первой формы колебаний (рисунок 3.17), в результате даёт наибольший момент по подошве, а по второй (рисунок 3.18) – наибольшее усилие в пружине. Эффективность применения ДГК по уменьшению момента составила в рассмотренном примере 20%. Параметры ДГК, настройка,

относительная масса и затухание в пружине, подобраны при гармоническом воздействии. И данные величины принимались для расчета по акселерограммам. По результатам расчета видно, что ДГК при такой настройке гасит колебания защищаемого сооружения, но эффект меньше. Это связано с тем, что в акселерограмме присутствует несколько синусоид, и на каждую приходится часть энергии. Эффективность ДГК будет тем выше, чем больше энергии будет приходиться на опасную для системы синусоиду. Так же на эффективность гасителя влияет количество форм. ДГК гасит колебания только по одной форме. Так же на эффективность влияет характер акселерограммы. Для жестких сооружений, как в выбранном примере для расчета, опасными являются короткие высокочастотные воздействия с большой амплитудой, похожие на импульс. Для таких воздействий эффективность ДГК составляет примерно 15-30%.

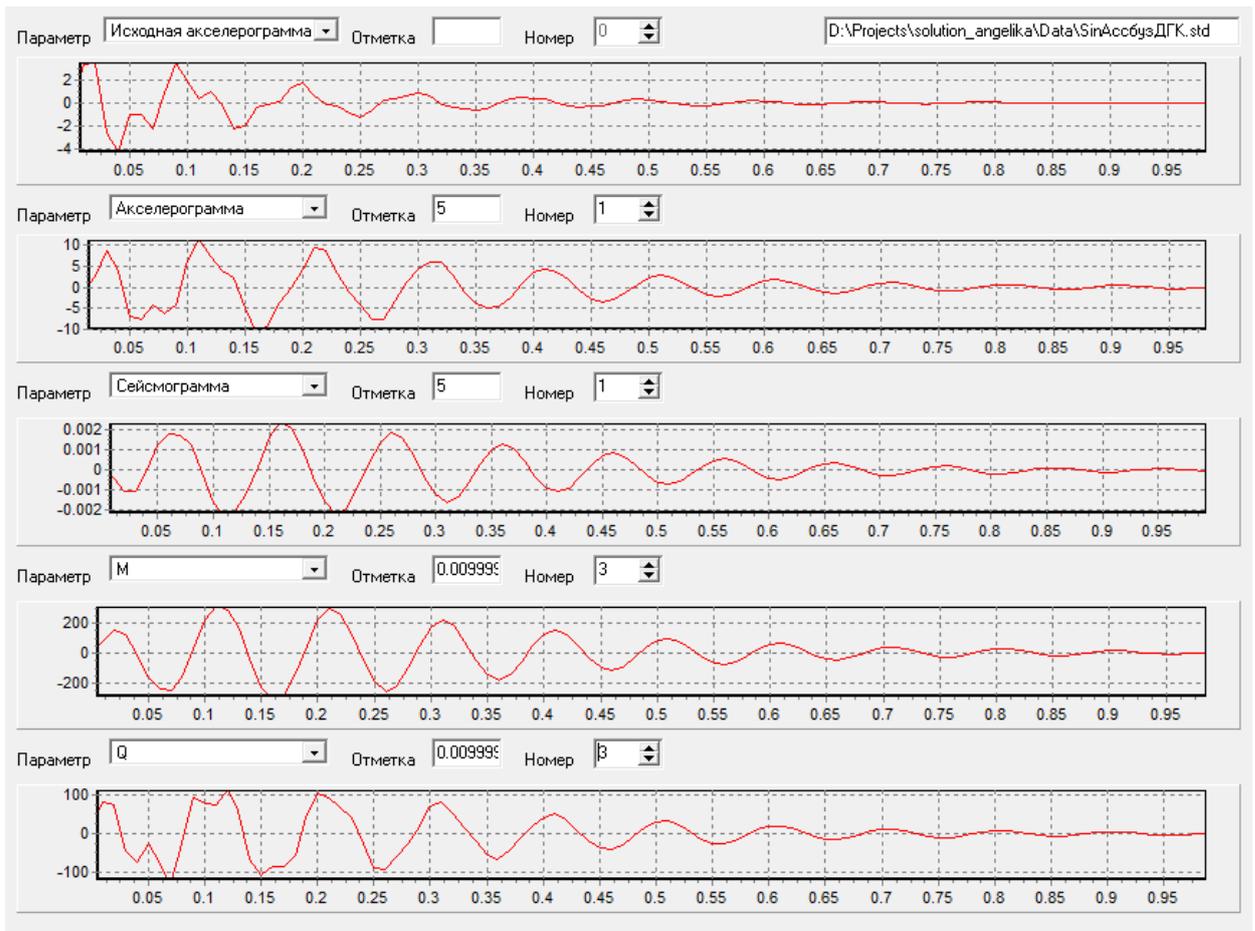


Рисунок 3.15. Результаты расчета сооружения без ДГК на акселерограмму, опасную для сооружения без ДГК

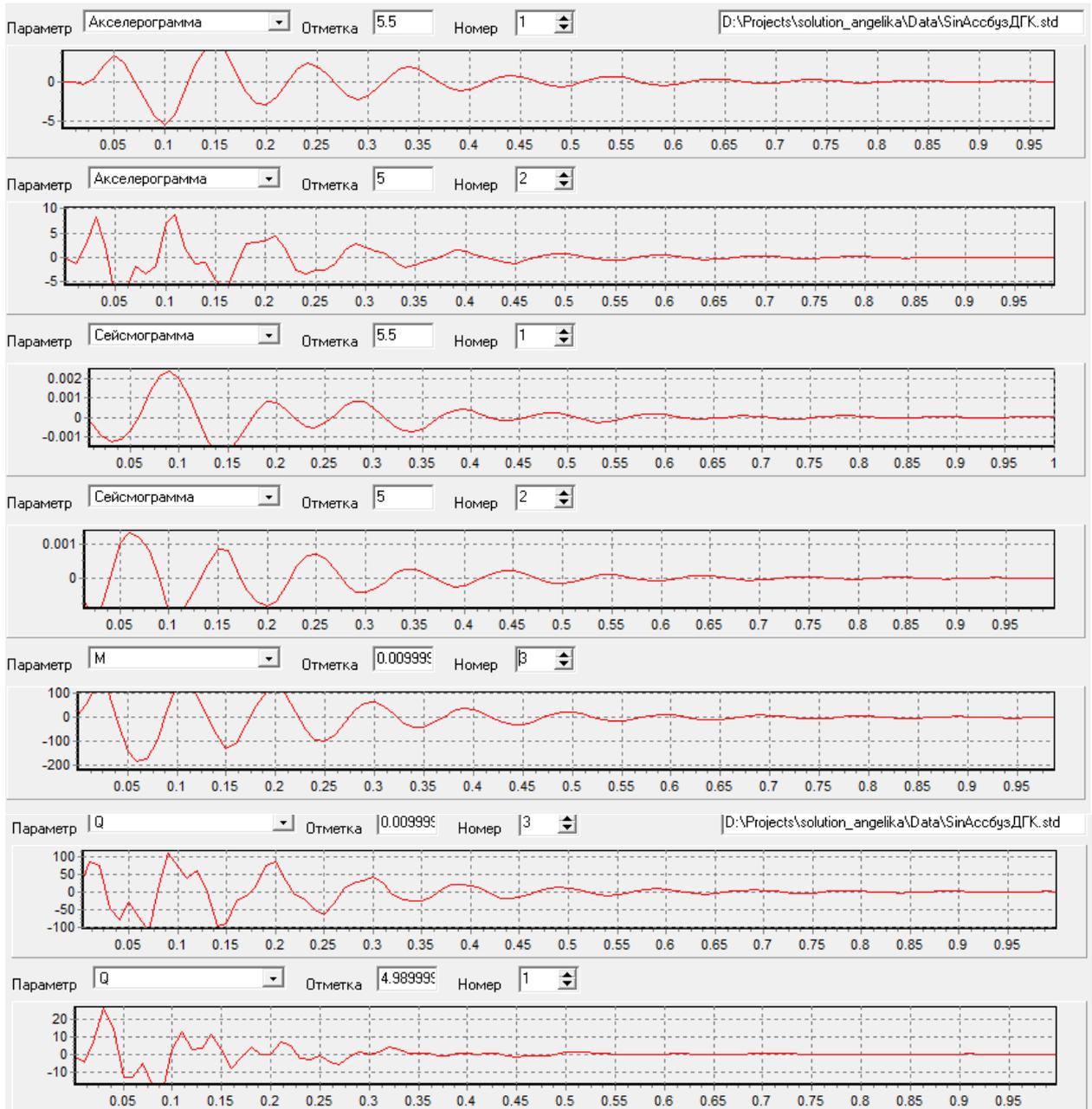


Рисунок 3.16. Результаты расчета сооружения с ДГК на акселерограмму, опасную для сооружения без ДГК

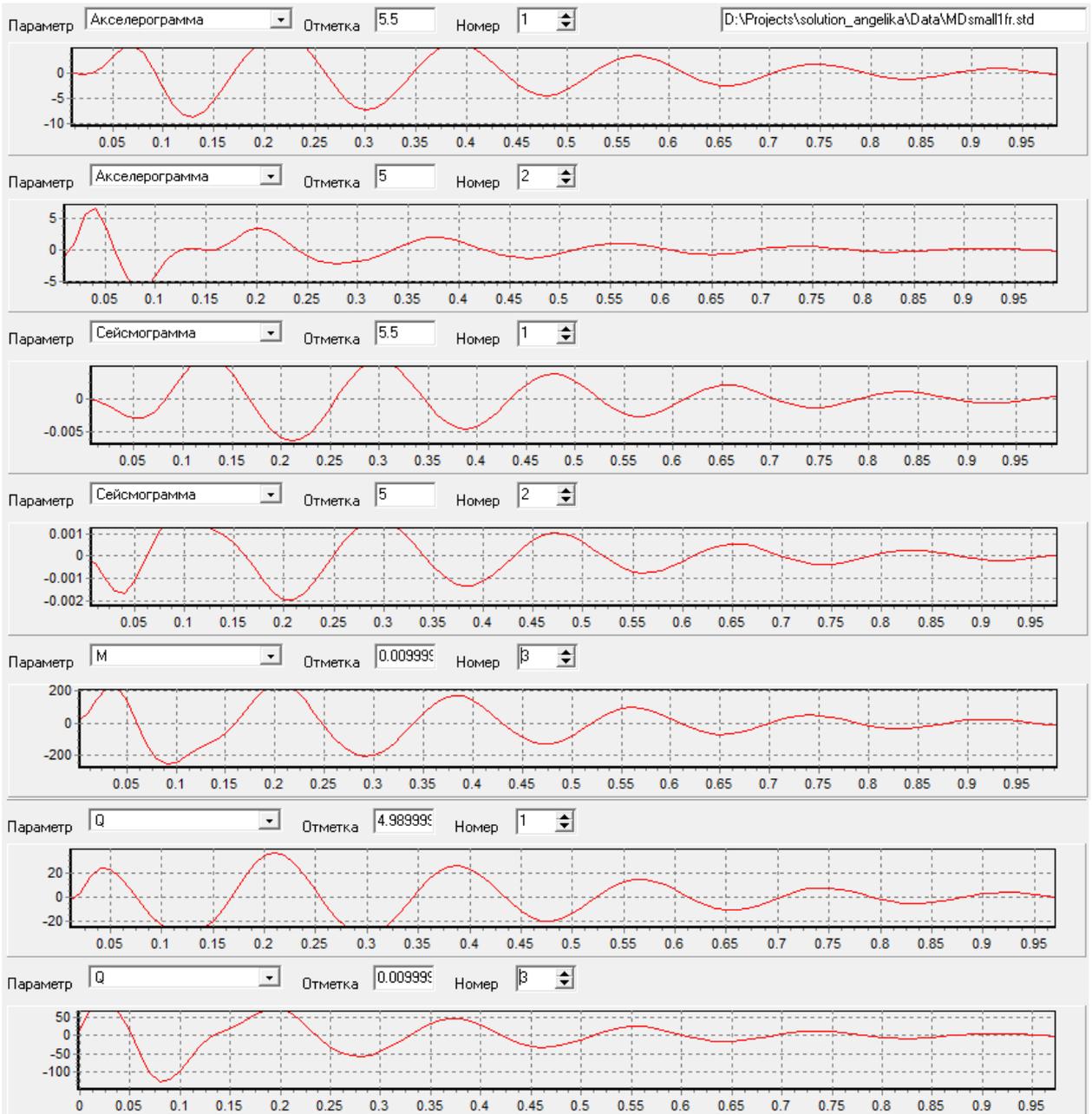


Рисунок 3.17. Результаты расчета сооружения с ДГК на акселерограмму, опасную для сооружения с ДГК по первой частоте

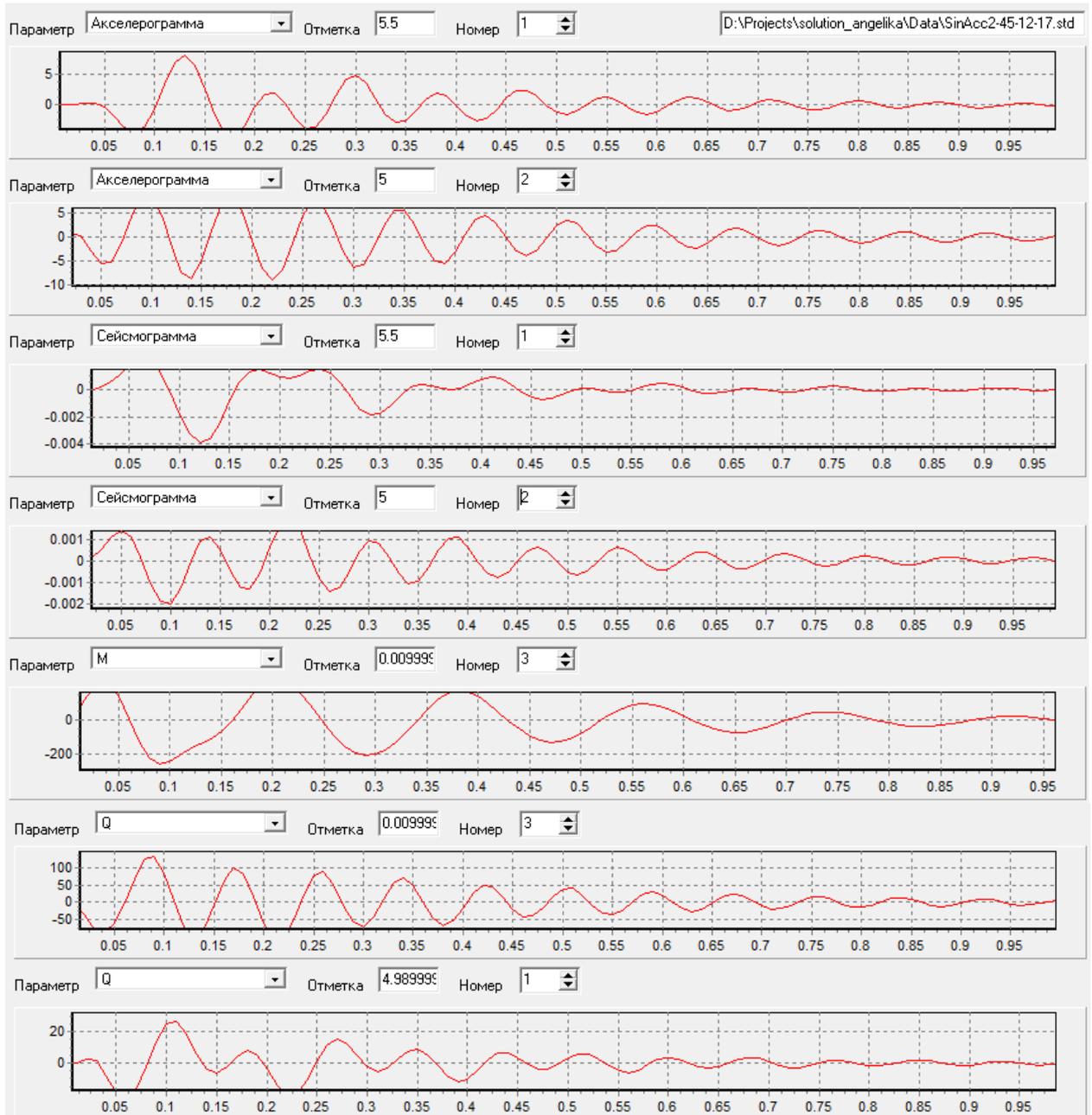


Рисунок 3.18. Результаты расчета сооружения с ДГК на акселерограмму, опасную для сооружения с ДГК по второй частоте

В качестве примера для дополнительной оценки эффективности ДГК произведен расчет на акселерограммы прошлых землетрясений. Результаты расчета сведены в таблицу 3.3.

Из полученных результатов видно, что более опасной является акселерограмма с преобладающим периодом близким к резонансной частоте колебаний сооружения с ДГК. Эффективность ДГК составляет 15%. Поэтому при

расчете сооружения с ДГК по существующим акселерограммам прошлых землетрясений необходимо использовать два пакета записей: опасный для сооружения и опасный для сооружения с ДГК.

Таблица 3.3

Результаты расчета на акселерограммы прошлых землетрясений

| Название сравниваемой характеристики | Сооружения без ДГК | Сооружения с ДГК | |
|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | LCENTRO, $T_{eq}=0,1$ с | LCENTRO, $T_{eq}=0,1$ с | Fokshan, $T_{eq}=0,18$ с |
| Ускорения сооружения, m/c^2 | 17 | 7,6 | 6,8 |
| Ускорения ДГК, m/c^2 | - | 9,5 | 11,4 |
| Смещение опоры, м | 0,0045 | 0,002 | 0,004 |
| Смещение ДГК, м | - | 0,006 | 0,001 |
| Момент по подошве фундамента, кНм | 600 | 300 | 450 |
| Перерезывающие силы по подошве фундамента, кН | 240 | 130 | 150 |
| Перерезывающие силы по верху сооружения, кН | 50 | 36 | 55 |
| Усилие в пружине | - | 94 | 95 |

Отметим в заключении, что эффективность ДГК, оцененная на основе динамических расчетов по акселерограммам землетрясений оказывается заметно ниже, чем в расчетах на гармонику. Это связано с тем, что акселерограммы имеют полигармонический состав. Только одна из гармоник является резонансной и снижается часть усилий, вызываемая именно этой гармоникой. Для жестких сооружений опасными являются короткие высокочастотные воздействия с большой амплитудой, похожие на импульс. Для таких воздействий эффективность ДГК ограничена величиной 15-30%. Наиболее эффективным следует ожидать применение ДГК для гашения длиннопериодных воздействий. В этом случае показатель гармоничности относительно мал и воздействие похоже на гармонику. Высокие показатели эффективности при расчете по акселерограммам, полученные другими авторами, обусловлены тем, что они

брали опасные воздействия, например Бухарестское, и проводили упругий расчет системы. К сожалению, соблюдение требований к воздействию, прежде всего к коэффициенту гармоничности снижает ожидаемую эффективность ДГК.

3.4. Выводы по главе 3

Выполненные в рамках настоящего раздела диссертации исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации

1. При использовании акселерограмм произошедших землетрясений расчет производится на пакет записей (60-100 акселерограмм), т.к. неизвестно, какая из акселерограмм окажется наиболее опасной. Каждый расчет рассматривают, как реализацию случайного процесса, а результат осредняют по выборке. При расчете сооружения с ДГК по существующим акселерограммам прошлых землетрясений необходимо использовать два пакета записей: опасный для сооружения и опасный для сооружения с ДГК. Т.к. наиболее опасным оказывается воздействие с преобладающим периодом, совпадающим с резонансной частотой сооружения с ДГК.

2. Существуют различные подходы к генерации сейсмических воздействий. Первый подход - генерация под площадку строительства, предлагается сейсмологами. В таком случае должны быть учтены все сейсмологические особенности площадки строительства: глубина и расположение возможных очагов землетрясений (ВОЗ), рельеф местности, грунтовые условия и т.п. Основными недостатками данного подхода является ограниченность исходной сейсмологической информации и отсутствие учета динамических свойств рассчитываемого сооружения при генерации воздействия. Второй подход – генерация под сооружение. В таком случае при генерации воздействия опасного для сооружения задается модель воздействия с опасной (резонансной) для сооружения частотой. Возможны два способа генерации воздействия. Первый – сумма трех затухающих синусоид с семью неопределенными параметрами: три амплитуды A_i , три затухания ε_i и продолжительность воздействия. При её генерации задаются три резонансные частоты для сооружения. Второй – процесс

в виде суммы колебательного процесса и импульса скорости, характеризуемый двенадцатью неопределенными параметрами: тремя амплитудами A , шестью показателями затухания α_i и β_i , двумя параметрами очага магнитудой M_w и гипоцентральной расстоянием R и моментом начала импульса ϕ . При проектировании зданий на сейсмическое воздействие производят расчет на несколько уровней воздействия. Минимум на два: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Для каждого из уровней воздействия определяющие характеристики землетрясения различны.

3. В работе уточнены параметры сейсмического воздействия: кинематические, определяющие ПЗ, и энергитические, определяющие МРЗ. К кинематическим относятся пиковые ускорения основания, коэффициент гармоничности и момент включения импульса скорости. Построена зависимость пиковых ускорений от преобладающего периода воздействия, совпадающая с полученными ранее кривыми. По графику видно, что значения ускорений падают с увеличением преобладающего периода. Опыт генерации расчетных акселерограмм показывает, что более важной характеристикой является коэффициентом гармоничности, который не позволяет задать монохромный процесс. Для данной величины также получена зависимость от преобладающего периода, на которой видно уменьшение данного коэффициента с ростом периода. Также было проанализирована зависимость момента включения импульса скорости от преобладающего периода. Из зависимости видно, что чем больше преобладающий период, тем позже наступает момент включения импульса. Построены зависимости для энергетических характеристик землетрясения от преобладающего периода воздействия: интенсивности по Ариасу (I_A), кумулятивной абсолютной скорости (CAV) и плотности сейсмической энергии (SED). Интенсивность по Ариасу падает с ростом периода, в то время как, значения абсолютной кумулятивной скорости и плотности сейсмической энергии увеличиваются. Величины I_A и CAV имеют размерность [м/с], а величина SED – [м/с²]. Чтобы привести их к одной размерности предложено использовать другую

характеристику – $SED_{mod} = \sqrt{\frac{SED}{T_{eq}}}$, которая имеет размерность [м/с]. Зависимость

данной величины от преобладающего периода воздействия также была построена.

4. Предложен новый показатель интенсивности землетрясения, названный SEI (seismic energy index). Данная энергитическая характеристика определяет работу сил пластического деформирования землетрясения. Данный показатель имеет два преимущества по сравнению с существующими. Во-первых, он не требует задания продолжительности землетрясения. Эффективная часть воздействия начинается, когда начинается переход от упругой ветви диаграммы деформирования к пластической. Во-вторых, предлагаемый показатель позволяет оценить потенциальные разрушительные способности сейсмического воздействия. При оценке показателя SEI землетрясению даётся возможность выбрать все сооружения, над повреждениями которых оно может поработать. Слабым является землетрясение, которое не может повредить никакое сооружение.

5. Разработана методика и программное обеспечение для генерации расчетных акселерограмм с учетом их возможных кинематических, спектральных и энергетических характеристик

6. При расчете сооружения с ДГК по синтетическим акселерограммам необходимо сгенерировать три воздействия: опасное для сооружения без ДГК, опасное для сооружения с ДГК по 1 частоте и опасное для сооружения с ДГК по 2 частоте. Т.к. наиболее разрушительными могут оказаться второе и третье воздействия.

7. Необходимо генерировать опасное воздействие для сооружения с ДГК по 1 частоте и по второй, т.к. первая акселерограмма определяет наибольший момент по подошве фундамента, а вторая – наибольшее усилие в пружине.

8. Эффективность ДГК, оцененная на основе динамических расчетов по акселерограммам землетрясений оказывается заметно ниже, чем в расчетах на гармонику. Это связано с тем, что акселерограммы имеют полигармонический состав. Только одна из гармоник является резонансной и снижается часть усилий,

вызываемая именно этой гармоникой. Для жестких сооружений опасными являются короткие высокочастотные воздействия с большой амплитудой, похожие на импульс. Для таких воздействий эффективность ДГК ограничена величиной 15-30%. Наиболее эффективным следует ожидать применение ДГК для гашения длиннопериодных воздействий. В этом случае показатель гармоничности относительно мал и воздействие похоже на гармонику. Высокие показатели эффективности при расчете по акселерограммам, полученные другими авторами, обусловлены тем, что они брали опасные воздействия, например Бухарестское, и проводили упругий расчет системы. К сожалению, соблюдение требований к воздействию, прежде всего к коэффициенту гармоничности снижает ожидаемую эффективность ДГК.

4. УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ ПОДБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ДГК И ОЦЕНКЕ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

При разрушительных землетрясениях в конструкциях сооружений возникают пластические деформации, трещины и разрушение отдельных элементов. При этом конструкция характеризуется нелинейной диаграммой деформирования. Учет этих эффектов необходим при расчете сооружений на действие МРЗ. Очевидно, что повреждаемость сооружения в процессе МРЗ необходимо учитывать и при оценке работы ДГК. Тот вопрос рассматривается ниже.

4.1. Модели нелинейной работы сооружения под воздействием разрушительных землетрясений

В диссертационном исследовании для анализа работы системы с ДГК рассмотрено две применяемые в теории сейсмостойкости модели нелинейной работы сооружения.

Первая модель нелинейности – упругопластическая [22, 27, 57]. При этом в элементах конструкции возникают пластические деформации, а при разгрузке элемент восстанавливает свои свойства. К числу таких диаграмм относятся диаграмма Прандтля, с упрочнением, диаграмма Рамберга-Осгуда и др. Для задач с таким типом нелинейности существует АЧХ и резонансные частоты колебаний. При этом можно подобрать наиболее опасные акселерограммы по методике, предложенной Н.В. Никоновой [65]. С точки зрения применения ДГК важными являются как вопросы эффективности его применения, так и его настройки. Следует ли настраивать ДГК на резонансную частоту колебаний упругой системы, или же на преобладающий период колебаний неупругой системы? По-видимому, ответ на этот вопрос не однозначен. Может возникнуть ситуация, когда установка ДГК, настроенного на упругий резонанс, вообще исключит пластические деформации системы. Тогда, очевидно, что настройка ДГК на пластический резонанс снизит сейсмостойкость конструкций. Если же

пластические деформации не удается исключить, то с их появлением ДГК будет отстраиваться от нового резонанса, и возможно, что лучше настраивать его на имеющуюся резонансную частоту упругопластической системы.

Второй тип нелинейности это модель с выключающимися связями и зависимостью поведения от общей истории нагружения. К числу таких моделей относятся модель Кирикова – Аманкулова [10]. В ней поведение системы зависит от максимального за историю нагружения смещения. Такие системы не имеют АЧХ и резонансной частоты. Период колебаний такой системы постоянно увеличивается в процессе нагружения системы, а частота колебаний достигает нуля в момент обрушения. Представляется очевидным, что эффективность ДГК для таких систем будет снижаться, потому что при накоплении повреждений будет возрастать отстройка параметров гасителя от оптимальных. Следует ожидать высокой эффективности ДГК для опасных резонансных колебаний. Если же воздействие по спектральному составу не является опасным, а его действие связано только с высокими пиковыми ускорениями, то эффективность ДГК может быть не очень высокой.

Подходы к подбору оптимальных параметров ДГК для каждой модели нелинейности должны быть различными

4.2. Описание и анализ упругопластической работы сооружения с ДГК

Первая модель накопления повреждений – упругопластическая. Диаграмма деформирования системы в этом случае представляет собой диаграмму Прандтля. В качестве показателя повреждаемости сооружения может быть принята работа сил пластического деформирования. Сооружения с такой диаграммой характеризуются АЧХ [106] и имеют резонансную частоту колебаний. Параметры АЧХ зависят от амплитуды колебаний. В работе А.А. Долгой [33] показано, что при гармонических колебаниях вид АЧХ зависит от одного параметра – относительного коэффициента трения: $\varphi = f/A$, где f - сила сухого трения в системе, A – амплитуда колебаний в долях ускорения силы тяжести g . Сказанное

может позволить уточнить параметры настройки ДГК при заданном коэффициенте пластичности.

Для анализа работы упругопластической системы с ДГК рассмотрена мостовая опора с пролетным строением, выполняющим роль гасителя колебаний опоры [34, 64], представленная на рисунке 4.1. Масса мостовой опоры составляет 150 т, масса пролетного строения – 15 т, т.е. относительная масса гасителя $\nu=0,1$. Для расчета оптимальные параметры ДГК, настройка и затухание в пружине, подбирались при гармоническом воздействии.

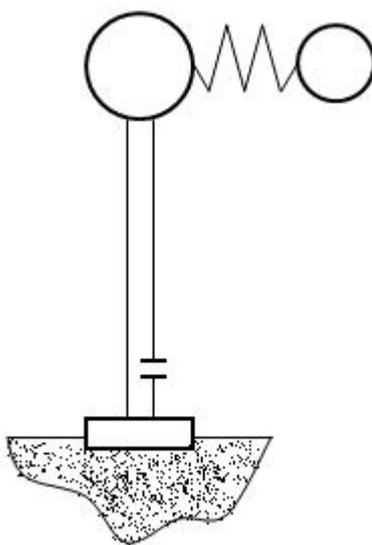
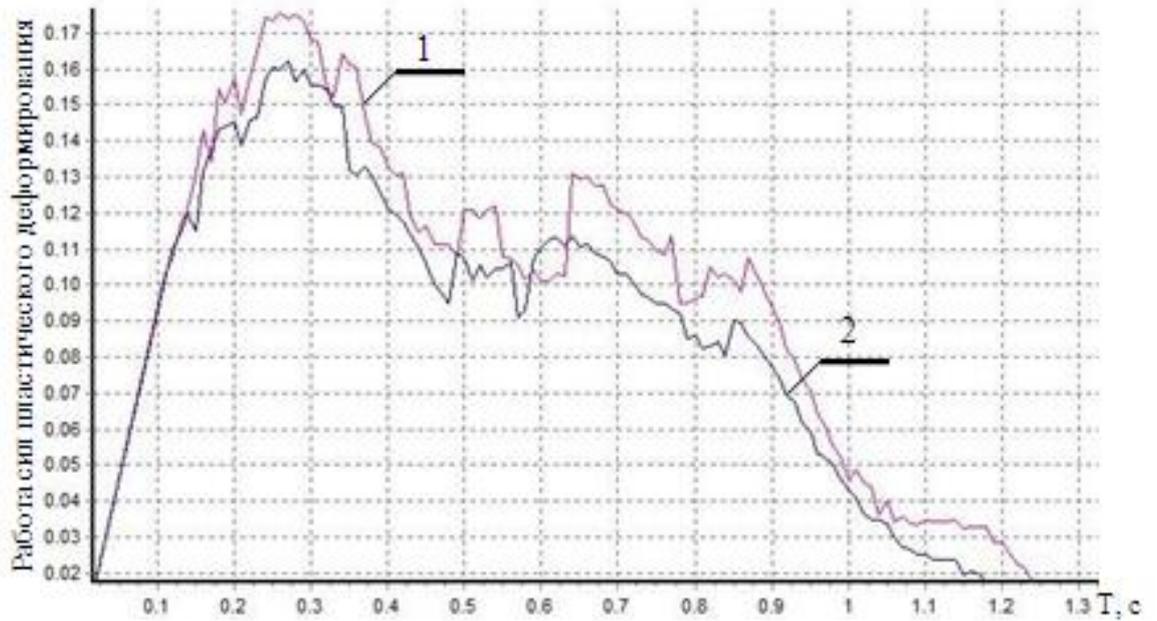


Рисунок 4.1. Расчетная схема для анализа упругопластической системы с ДГК

Для выбора опасной акселерограммы необходимо строить спектр работ силы пластического деформирования для рассматриваемых записей. С этой целью рассматривается реакция на заданную акселерограмму осциллятора, соединенного с основанием демпфером сухого трения, имеющего в качестве диаграммы деформирования диаграмму Прандтля. На рисунке. 4.2 приведены примеры спектров работ сил пластического демпфирования для записей землетрясения в Фошань (КНР), пиковое ускорение основания равно $9,5 \text{ м/с}^2$, и Газли (Узбекистан), пиковое ускорение основания равно $13,2 \text{ м/с}^2$. В качестве опасной акселерограммы выбиралась запись, имеющая наибольшее значение

работы сил пластического демпфирования для заданного начального периода для анализируемой системы $T=0,464$ с и предела упругости (30%).

а)



б)

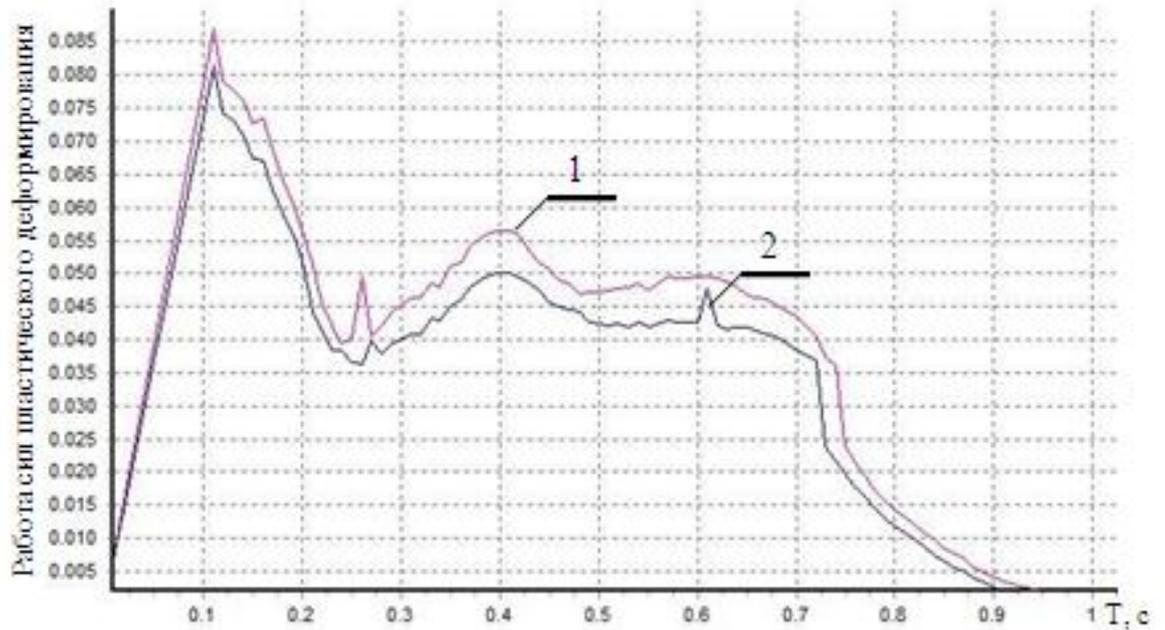


Рисунок 4.2. Спектры работ сил пластического деформирования для записей землетрясения в Фошань (а) и Газли (б)

1 – коэффициент неупругого сопротивления (γ) равен 0,15, 2 – γ равен 0,2

Как видно из рисунка 4.2, работа сил пластического деформирования для землетрясения в Газли (0,088) меньше, чем для записи в Фошань (0,175), хотя пиковые ускорения больше.

Для проведения динамического анализа использованы методика и алгоритм расчета кусочно-линейных систем релейного типа, предложенный И.О. Кузнецовой и А.М.Уздиным [108, 109].

Моделируемая кусочно-линейная система определяется вектором состояния нелинейной связи - V_c . Число элементов данного вектора равно количеству элементарных связей, в диссертационном исследовании – демпферов сухого трения (ДСТ). Каждый элемент вектора V_c представляет собой номер состояния элементарной связи N_c , изменяется в диапазоне от 0 до 1 ($N_c=0$ - связь «открыта», $N_c=1$ - связь «закрыта»). Для каждого состояния системы записывается следующее уравнение:

$$M_i \ddot{Y} + B_i \dot{Y} + R_i Y = -M \ddot{Y}_0 - S \quad (4.1)$$

где M_i , B_i и R_i – соответственно матрицы инерции, демпфирования и жесткости системы в состоянии i ($i=0$ демпфер открыт, $i=1$ демпфер закрыт); Y – матрица-вектор обобщенных перемещений; \ddot{Y}_0 - матрица-вектор кинематических возмущений, $\ddot{Y}_0 = V_p \cdot \ddot{y}_0$; V_p - вектор проекций воздействий на направления обобщенных координат; S – матрица-вектор сил, действующих по направлению обобщенных перемещений, обусловленных силами трения в открытых демпферах сухого трения ДСТ и остаточными смещениями в закрытых ДСТ. Умножив обе части уравнения (4.1) на обратную матрицу инерции M^{-1} , получим:

$$\ddot{Y} + M^{-1} B \dot{Y} + M^{-1} R Y = -V_p \ddot{y}_0 - M^{-1} S \quad (4.2)$$

В случае приближенного разложения уравнений движения рассматриваемой системы (4.2) по формам колебаний недемпфированной системы решение уравнения Y записывается в виде:

$$Y = X \Xi \quad (4.3)$$

где \mathbf{X} - матрица собственных векторов матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$; $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ – матрица-вектор главных координат; n - число учитываемых форм колебаний. При подстановке представления (4.3) в уравнение (4.2) получится:

$$\ddot{\Xi} + \mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{X}\dot{\Xi} + \mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{X}\Xi = -\mathbf{X}^{-1}\mathbf{V}_p\ddot{y}_0 - \mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S} \quad (4.4)$$

где $\mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{X} = \mathbf{\Lambda}$, $\mathbf{\Lambda} = \mathbf{K}^2$ - собственные числа матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$

Для пропорционального демпфирования [33, 107] уравнение (4.4) примет вид:

$$\ddot{\Xi} + \mathbf{\Gamma}\mathbf{K}\dot{\Xi} + \mathbf{K}^2\Xi = -\mathbf{X}^{-1}\mathbf{V}_p\ddot{y}_0 - \mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S} \quad (4.5)$$

где $\mathbf{\Gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ - диагональная матрица затухания по формам колебаний.

В скалярной форме уравнение (4.5) примет вид:

$$\ddot{\xi}_j + \gamma_j k_j \dot{\xi}_j + k_j^2 \xi_j = -\frac{\sum_{i=1}^k x_{i,j} m_i v_i}{n_j} \ddot{y}_0 - \frac{\sum_{i=1}^k x_{i,j} S_i}{n_j} \quad (4.6)$$

Расчет рассматриваемой кусочно-линейной системы релейного типа выполнен по программе «ДРАКОН», разработанной для таких систем И.О.Кузнецовой и А.А.Долгой под руководством профессора А.М.Уздина. В такой системе каждый ДСТ может находиться в одном из двух состояний: открыт (состояние 0) или закрыт (состояние 1). Вектор \mathbf{V}_c , состоящий из нулей и единиц, i -тый элемент которого определяет состояние i -того демпфера, называется вектором состояния системы. Интегрирование начинается в состоянии, когда все демпферы закрыты. Для каждого состояния системы определяются собственные частоты и формы колебаний, которые определяют движение системы в данном состоянии. В качестве шага интегрирования принимается шаг цифровки акселерограммы. За шаг цифровки состояние системы может смениться дважды, в связи с чем, была разработана программа уменьшающая шаг цифровки. В рамках одного шага цифровки на отрезке времени $[t_k; t_{k+1}]$ воздействие аппроксимируется линейной зависимостью

$$\ddot{y}_0 = \ddot{y}_0^{(k)} + \frac{\tau}{H} \dot{y}_0^{(k+1)} \quad (4.7)$$

На интервале интегрирования решение записывается в виде интеграла Дюамеля [107]. При использовании формулы (4.7) интеграл Дюамеля можно представить аналитической формулой и получить точное решение. В конце каждого шага интегрирования проводится проверка смены состояния в каждом элементе вектора V_c . Для состояния 1 (закрытое) условие открытия $N > F_{тр}$, где N – усилие в демпфере, $F_{тр}$ – сила трения в демпфере. Для состояния 0 (открытый) условием закрытия является смена знака взаимной скорости элементов системы, соединенных демпфером.

Для иллюстрации работы ДГК в упругопластической системе, прежде всего для наглядности, были рассмотрены гармонические возмущения.

На рисунке. 4.3 приведены результаты расчета системы, не защищенной ДГК, собственной частотой колебаний $13,53 \text{ с}^{-1}$ на воздействие резонансной синусоиды с амплитудой в 2 м/с^2 . На рисунке. 4.4 приведены результаты расчета на то же воздействие системы, защищенной ДГК. Как видно из рисунка критерием эффективности ДГК является время нахождения в пластическом состоянии и амплитуда пластических деформаций. Эти параметры, в конечном счете, определяют работу сил пластического деформирования, которая определяет возможность прогрессивного обрушения или малоциклового усталости.

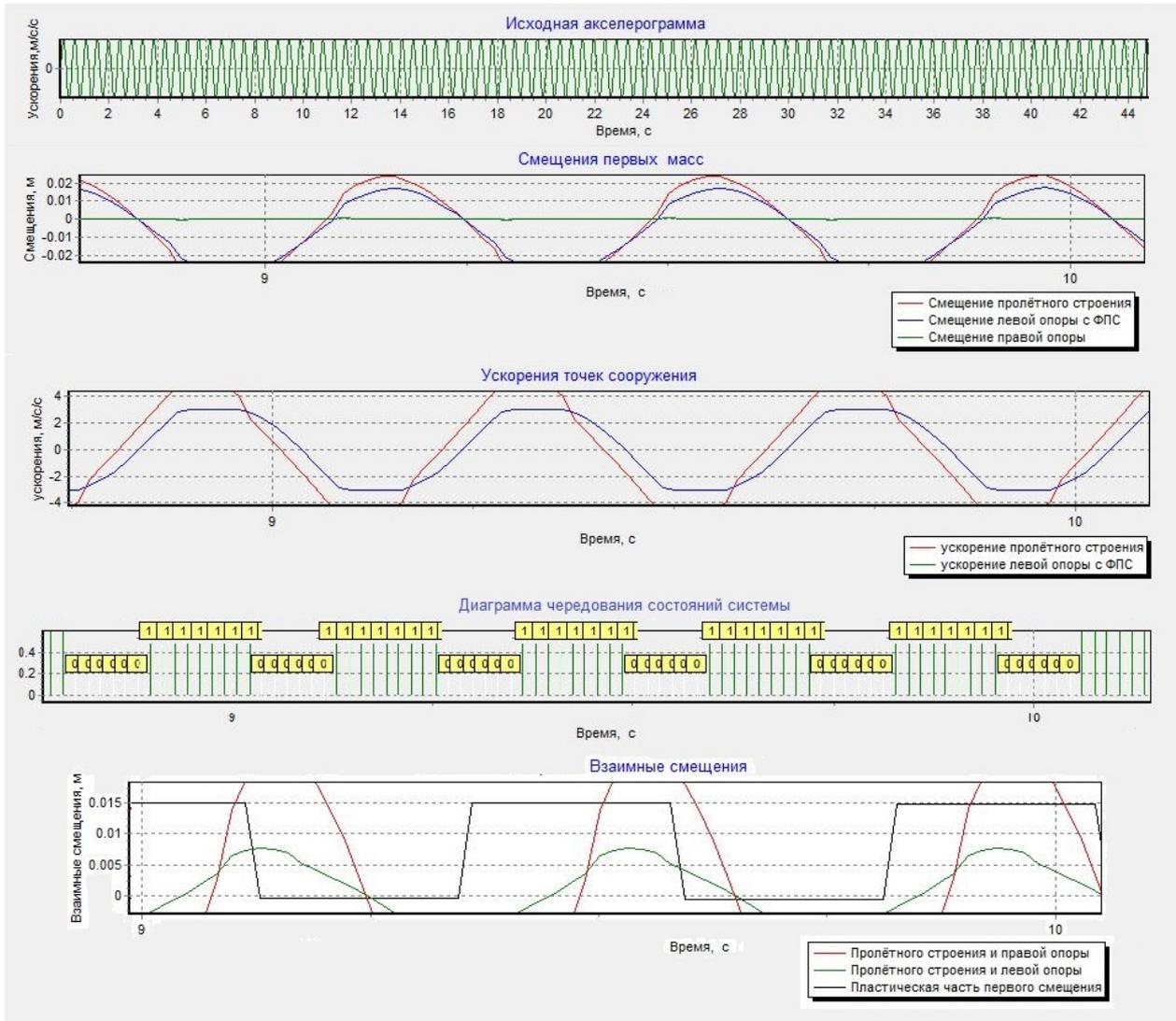


Рисунок 4.3. Результаты расчета упругопластической системы, не защищенной ДГК, на гармоническое воздействие

Состояние «0» – пластическая стадия работы, состояние «1» - упругая стадия работы

Когда система начинает работать в пластической стадии, преобладающий период колебаний сооружения меняется. Естественно встает вопрос об изменении настройки ДГК в соответствии с опасной частотой, взятой по АЧХ нелинейной системы. Для приведенного примера период собственных колебаний увеличивается с 0.464 секунд до 0.66. На рисунке 4.5. приведены результаты расчета системы с ДГК, настроенным на опасную частоту нелинейной системы.

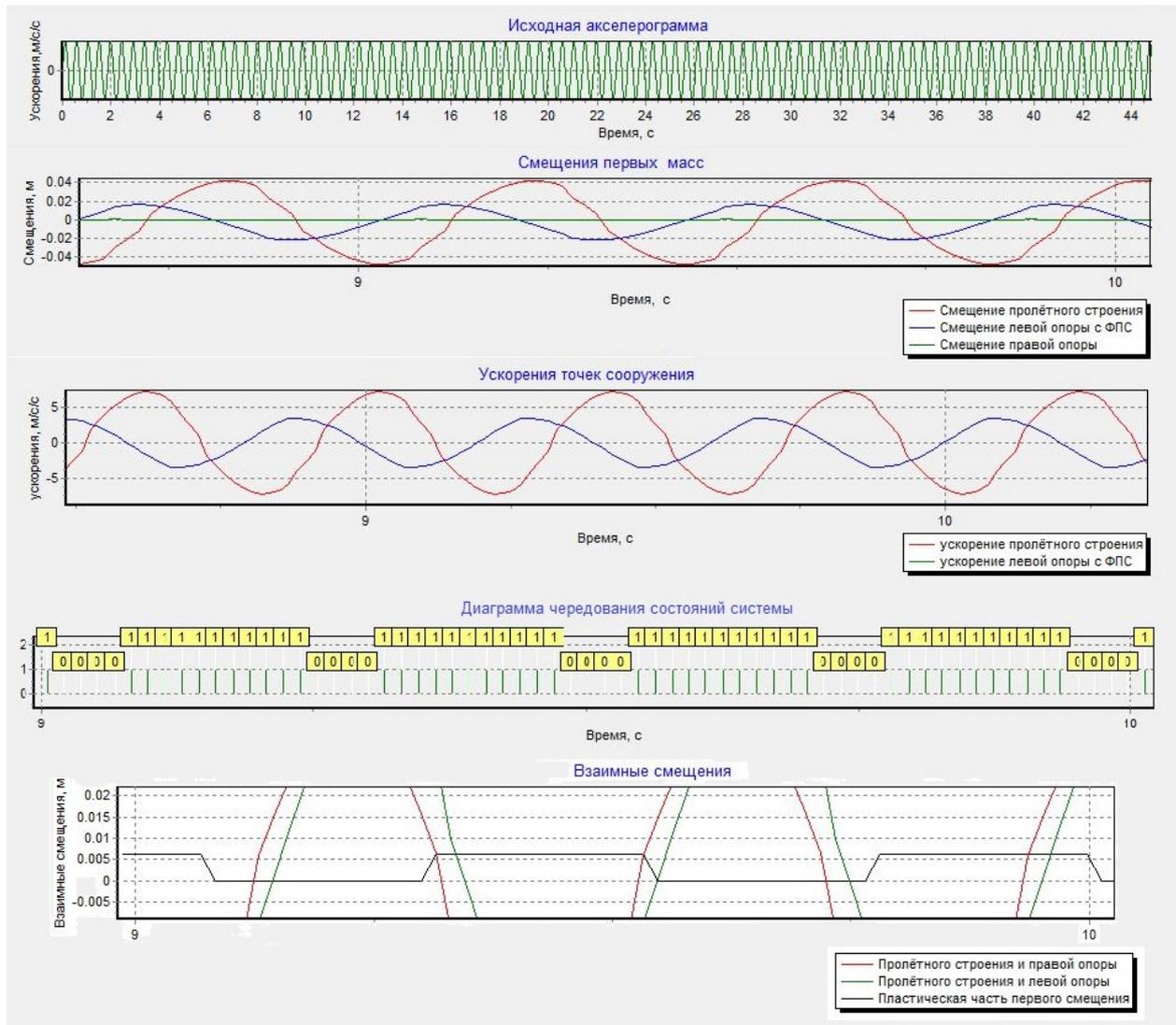


Рисунок 4.4. Результаты расчета упругопластической системы, защищенной ДГК, на гармоническое воздействие

Состояние «0» – пластическая стадия работы, состояние «1» - упругая стадия работы

Как видно из рисунка гаситель, настроенный на нелинейную работу системы, работает хуже, чем ДГК, подобранный по преобладающему периоду колебаний упругой системы. Это объясняется тем, что при воздействии нагрузки система не сразу переходит в пластическую стадию, и, как следствие, гаситель, настроенный на пластическую работу системы, хуже работает в упругой стадии работы системы. Тем не менее, такой ДГК уменьшает время нахождения системы в пластическом состоянии, хотя и меньше, чем гаситель, настроенный на упругую стадию.

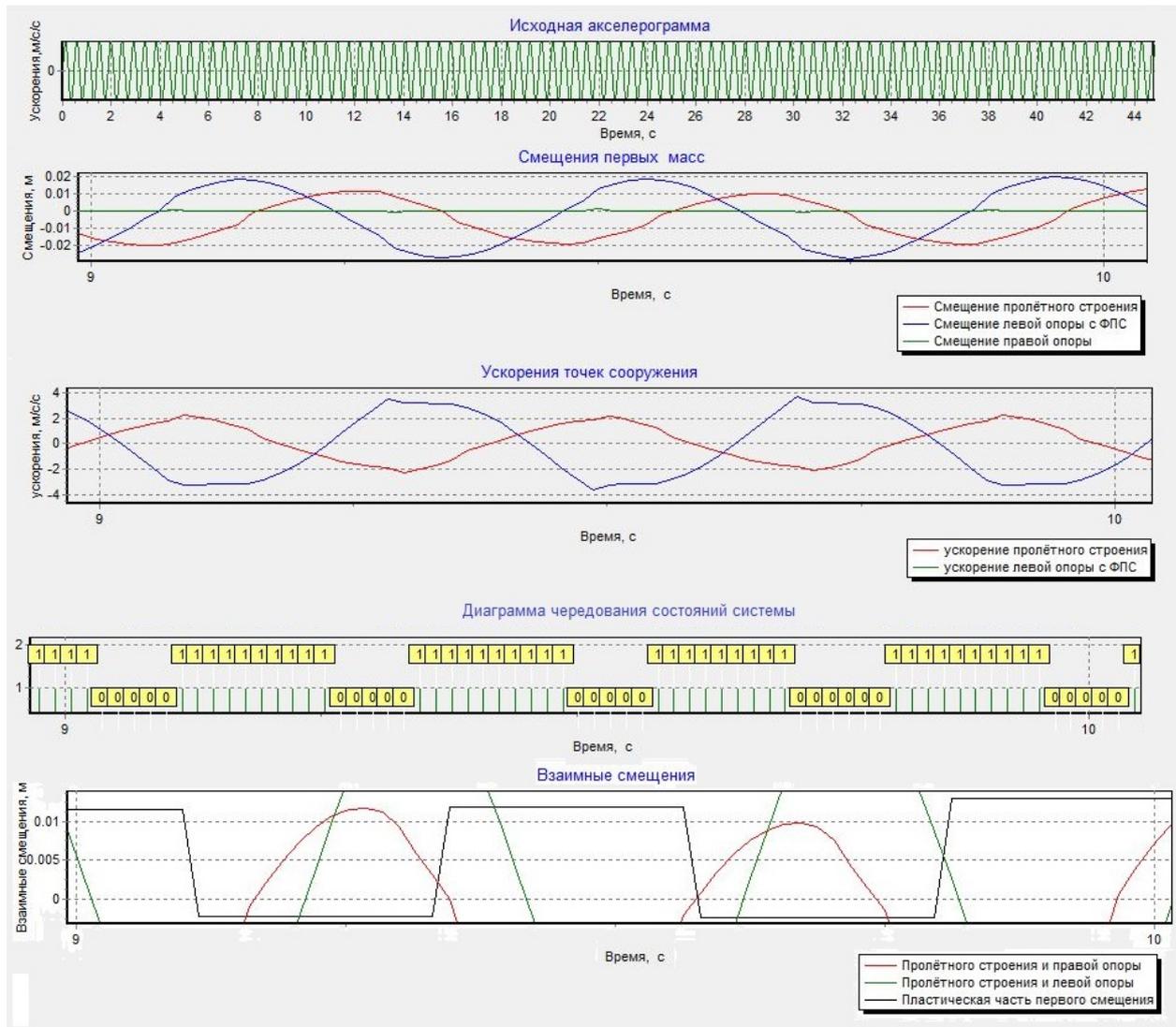


Рисунок 4.5. Результаты расчета упругопластической системы, защищенной ДГК, настроенным на нелинейную систему, на гармоническое воздействие
Состояние «0» – пластическая стадия работы, состояние «1» - упругая стадия работы

Как было сказано ранее, для системы с ДГК необходимо выполнять дополнительный расчет на воздействие, опасное для системы, защищенной гасителем, так как у новой системы меняется по сравнению с незащищенным сооружением преобладающий период колебаний. На рисунке 4.6 приведены результаты расчета системы с ДГК, настроенным на упругую стадию работы системы, подверженной воздействию с частотой колебаний, опасной для данной системы.

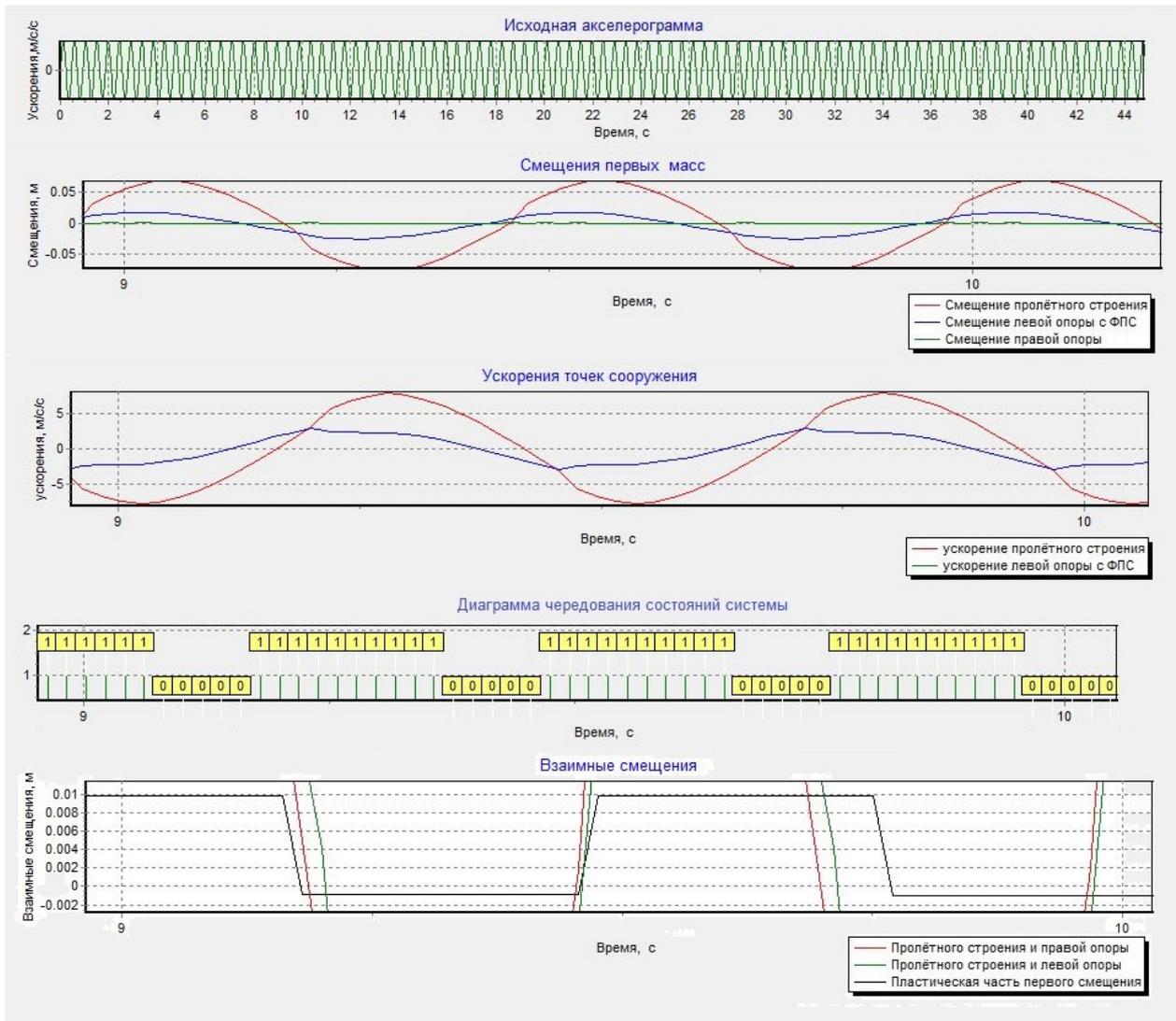


Рисунок 4.6. Результаты расчета упругопластической системы, защищенной ДГК, настроенным на упругую систему, на гармоническое воздействие, опасное для системы с гасителем

Состояние «0» – пластическая стадия работы, состояние «1» - упругая стадия работы

Как видно из рисунка, при таком воздействии гаситель работает хуже, чем при воздействии, опасном для незащищенной системы. Тем не менее, по сравнению с работой незащищенной системы время нахождения в пластической стадии также уменьшилось, что значит, что ДГК в любом случае улучшает работу системы.

Для сравнения все диаграммы чередований состояний системы для каждого случая приведены на одной схеме (Рисунок 4.7).

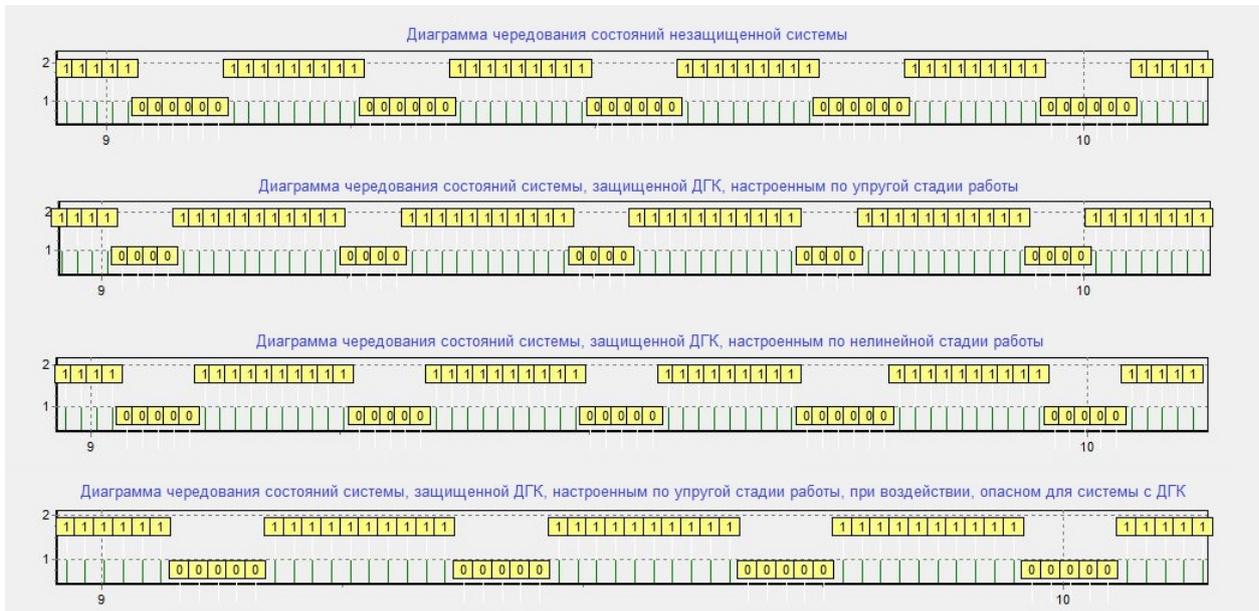


Рисунок 4.7. Диаграммы чередования состояния системы.

Состояние «0» – пластическая стадия работы, состояние «1» - упругая стадия работы

Поскольку частота собственных колебаний сооружения меняется, целесообразно устанавливать два гасителя. Один должен снижать колебания системы в упругой стадии работы, в этом случае ДГК может предотвратить переход в пластическую часть. Второй должен снижать колебания системы в пластической части. В этом случае ДГК начнет работать, когда частота колебаний сооружения совпадет с частотой, на которую настроен гаситель.

4.3. Анализ нелинейной работы системы с деградирующей жесткостью при наличии ДГК

Вторая модель – модель с деградирующей жесткостью вследствие накопления повреждений, характерна для хрупких материалов. Для системы с деградирующей жесткостью за основу в учете нелинейности работы взята модель Кирикова-Аманкулова [10], детально рассмотренная в [34]. В работах А.А.

Никитина и А.М. Уздина [107] показано, что ДГК могут быть достаточно эффективны в рассматриваемых системах.

Для данного типа нелинейности восстанавливающая сила описывается уравнением

$$R(y) = \frac{r(u)y}{1 + \kappa(u)y^2} \quad (4.8)$$

где y – смещение опоры; u – максимальное за историю нагружения перемещение опоры; κ - параметр нелинейности.

В этой модели жесткость системы R падает, а затухание и параметр нелинейности κ линейно возрастают с ростом максимальных за историю нагружения перемещений системы u_{\max} . Значение жесткости системы постоянно пока величина смещения u меньше предела упругости $u_{\text{упр}}$. Когда предел упругости превышен, жесткость системы начинает линейно падать с увеличением значения максимального за историю смещения системы. Перемещение, соответствующее нулевой жесткости системы, названо условным перемещением разрушения $u_{\text{усл}}$. Перемещение, при котором происходит фактическое разрушение системы, считается перемещение $u_{\text{разр}}$. Это такое перемещение, при котором реакция системы достигает максимального значения. Зависимости $R(u)$ и $\gamma(u)$ показаны на рисунке 4.8. В виде уравнения зависимость жесткости можно представить следующим образом:

$$R(u) = \begin{cases} \frac{C(u^{\max})u}{1 + u^2 \kappa(u^{\max})}, & \text{при } u^{\max} > u^{\text{упр}} \\ C_0 u, & \text{при } u^{\max} \leq u^{\text{упр}} \end{cases} \quad (4.9)$$

Колебания системы с деградирующей жесткостью описываются уравнением:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{R}(\mathbf{U}) = -\mathbf{M}\ddot{y}_0(t), \quad (4.10)$$

где U, \dot{U}, \ddot{U} - соответственно перемещение, скорость и ускорение сооружения; \mathbf{M} - матрица инерции; \mathbf{B} - матрица демпфирования; \mathbf{R} - матрица жесткости; $\ddot{y}_0(t)$ - акселерограмма колебаний основания.

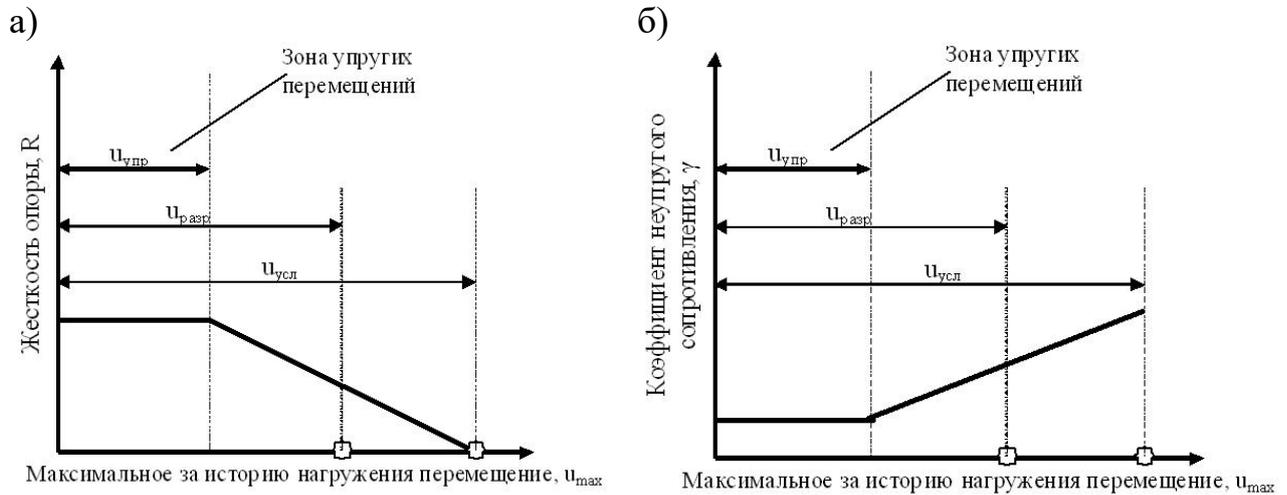


Рисунок 4.8. Зависимость жесткости сооружения (а) и коэффициента неупругого сопротивления сооружения (б) от максимального за историю нагружения перемещения опоры

Интегрирование уравнения движения осуществляется с использованием интеграла Дюамеля после разложения системы уравнений движения по формам колебаний. Данное разложение осуществляется на каждом шаге интегрирования. Если в пределах этого шага менялись характеристики системы, то параметры разложения по формам колебаний меняются в соответствии с изменением жесткости и демпфирования в системе. При этом существует точное и приближенное разложение уравнений движения, т.е. с учетом влияния демпфирования на формы колебаний и разложение по формам колебаний недемпфированной системы соответственно.

В качестве примера исследована работа сооружения с ДГК в системе с деградирующей жесткостью, схема которой представлена на рисунке 4.9. Исследуемая система представляет собой мостовую опору с пролетным строением, используемым в качестве ДГК.

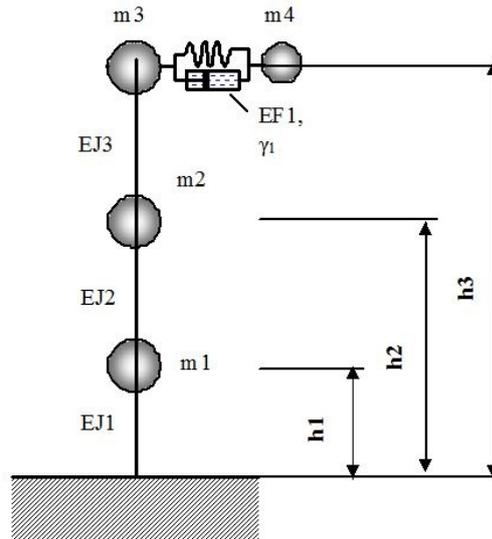


Рисунок 4.9. Расчетная схема для анализа работы системы с деградирующей жесткостью.

Образование необратимых деформаций для рассматриваемой системы определяется не максимальным за всю историю смещением масс опоры ($u_i^{(max)}$), а упругая составляющая этого смещения, т.е. без учета перемещения масс опоры как жесткого целого (рис. 4.10). Для рассматриваемого участка «i», расположенного между массами m_i и m_{i+1} , смещение массы m_{i+1} выражается формулой:

$$u_{i+1} = u_i + u_{i+1}^{упр} + \theta_i h_i \quad (4.11)$$

Перемещение данного участка как жесткого целого определяется смещением массы m_i и поворотом вокруг массы m_i на угол θ_i определяют.

Реакцию системы можно определить с помощью погонной жесткости EJ, которая будет меняться при перемещении i-го участка, удовлетворяющего условию $u_i > u_i^{упр}$. Величина изменения жесткости EJ учитывается с помощью вычисления момента инерции сечения i-го участка:

$$J_{new_i} = \frac{J_i \left[1 - \eta \left(1 - \frac{u_{usl_i} - u_{max_i}}{u_{usl_i} - u_{upr_i}} \right) \right]}{1 + \kappa_i u_i^2} \quad (4.12)$$

где J_i – момент инерции i -го участка опоры при упругой стадии работы;

$u_{usl\ i}$ – условное значение перемещения i -го участка, при котором восстанавливающая сила опоры равна нулю ($u_{usl\ i} = \mu_{usl\ i} * u_{upr\ i}$, где μ_{usl} – условный коэффициент пластичности);

$u_{upr\ i}$ – максимальное упругое перемещение i -го участка опоры;

$u_{max\ i}$ – максимальное перемещение i -го участка опоры за всю историю нагружения;

u_i – перемещение i -го участка на данном шаге интегрирования без учета «жесткой» составляющей (см. (4.22))

k_i – параметр нелинейности на данном шаге интегрирования для i -го участка опоры;

η – функция Хевисайда $\eta=0$ при упругой стадии работы, $\eta=1$ при неупругой стадии работы.

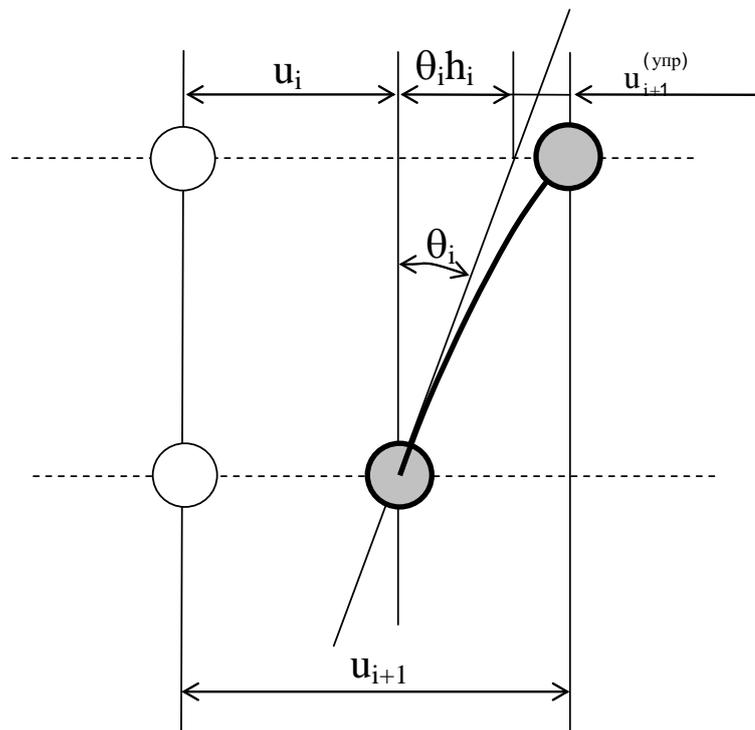


Рис.4.10 К определению перемещений U_{i+1} .

Результаты расчета системы приведены на рисунке 4.11, 4.12. Критерием эффективности гасителя в данном случае может выступать повреждаемость конструкции. Расчеты показывают, что использование гасителя может существенно снижать повреждаемость. На рисунке 4.11 приведен результат

расчета системы без гасителя и системы с гасителем на воздействие землетрясения, рекомендованного для использования нормами Туркменистана. На рисунке представлены исходная акселерограмма и развертки по времени накопления повреждений для опоры без гасителя и для опоры с гасителем. Начальный период колебаний рассматриваемого сооружения равен 1,19 с. Применение гасителя позволило снизить повреждаемость с 76% до 51%. На рисунке. 4.12 приведен результат аналогичного расчета системы на воздействие Бухарестского землетрясения 1978 года. За счет применения гасителя в этом случае повреждаемость снизилась с 82% до 36%.

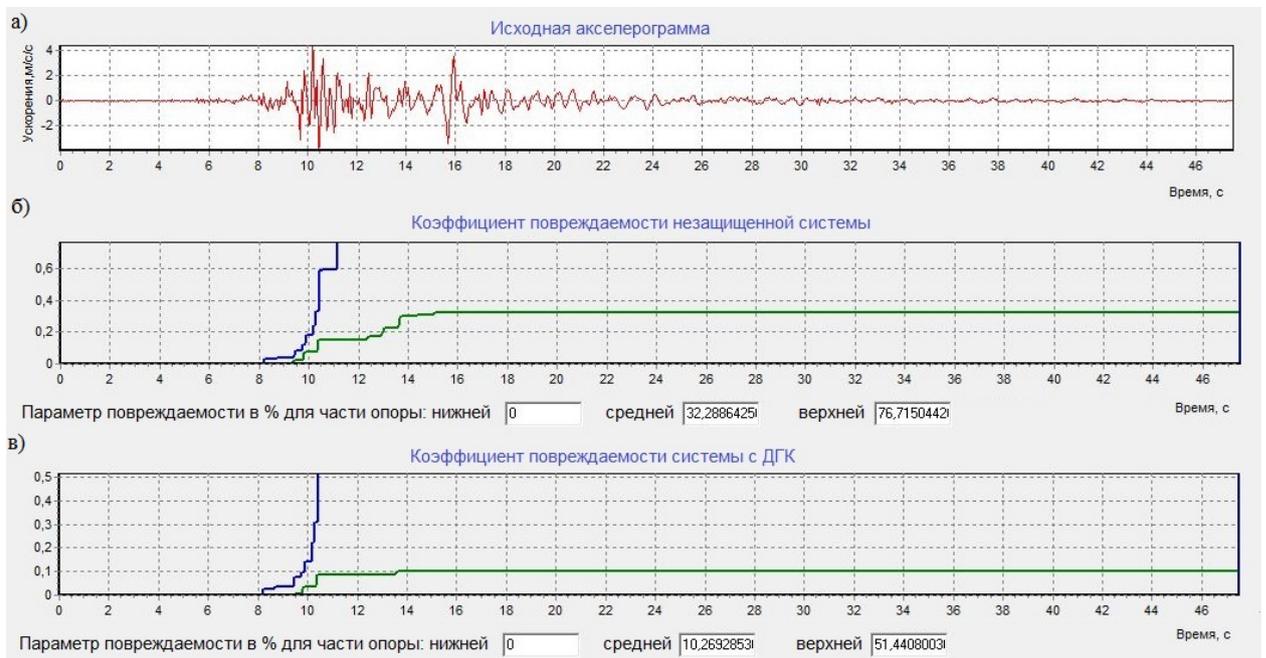


Рисунок 4.11. Результаты расчета сооружения без ДГК и с ДГК на воздействие землетрясения, рекомендованного для использования нормами Туркменистана.

а) – акселерограмма землетрясения, рекомендованного для использования нормами Туркменистана, б) – график изменения коэффициента повреждаемости для незащищенного сооружения, в) – график изменения коэффициента повреждаемости для сооружения, защищенного ДГК

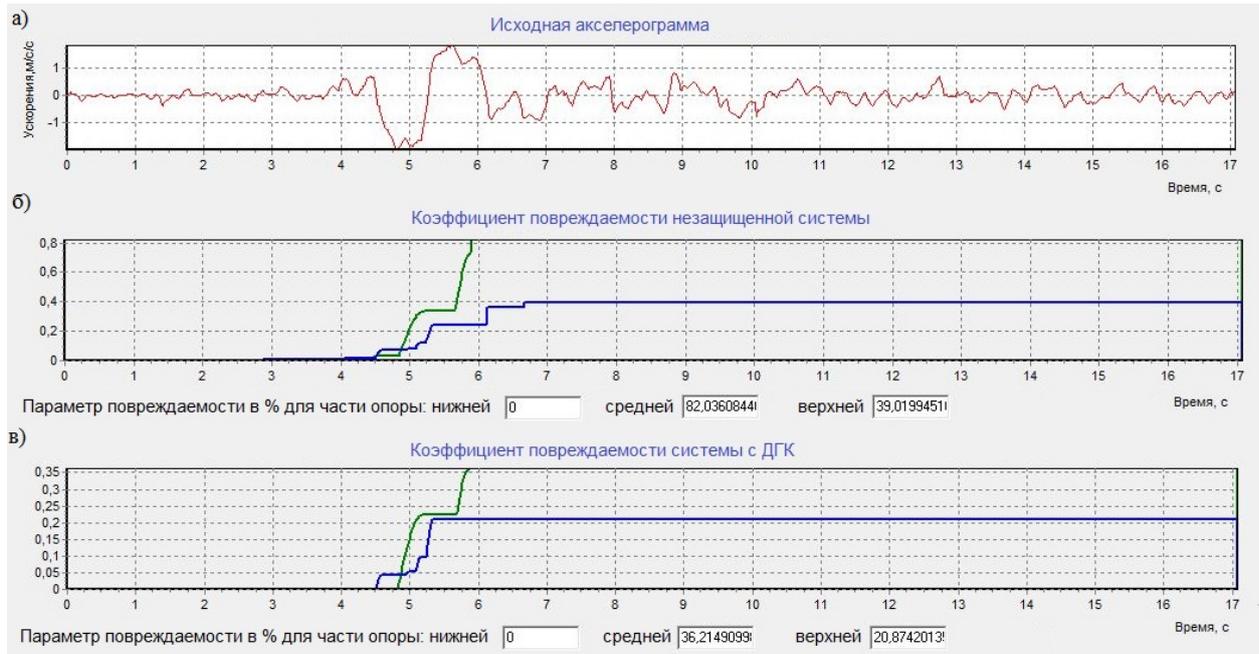


Рисунок 4.12. Результаты расчета сооружения без ДГК и с ДГК на воздействие землетрясения в Бухаресте.

а) – акселерограмма землетрясения в Бухаресте, б) – график изменения коэффициента повреждаемости для незащищенного сооружения, в) – график изменения коэффициента повреждаемости для сооружения, защищенного ДГК

Для оценки эффективности гасителя следует подбирать акселерограммы наихудшие для системы с гасителем и без ДГК. Для исследования работы системы были сгенерированы соответствующие акселерограммы по методике [76, 107] для сооружения в упругой стадии работы. На рисунке 4.13 приведен расчет системы без гасителя и с гасителем на воздействие, опасное для незащищенного сооружения. Как видно из рисунка незащищенная система при воздействии сгенерированного землетрясения полностью разрушилась. Установка гасителя снизила повреждения системы до 87%, т.е. спасла систему от разрушения. На рисунке. 4.14. представлены результаты расчета системы с гасителем на воздействия, опасные для защищенного сооружения по первым двум преобладающим формам. Как видно из рисунка, воздействие, сгенерированное опасным системы с ДГК по второй форме колебаний, оказалось более разрушительным, что подтверждает идею о проверке системы с ДГК на опасные

воздействия, сгенерированные по первому и второму преобладающему периоду защищенной системы. Однако оба этих воздействия оказались менее разрушительными по сравнению с воздействием, резонансным для сооружения без гасителя.

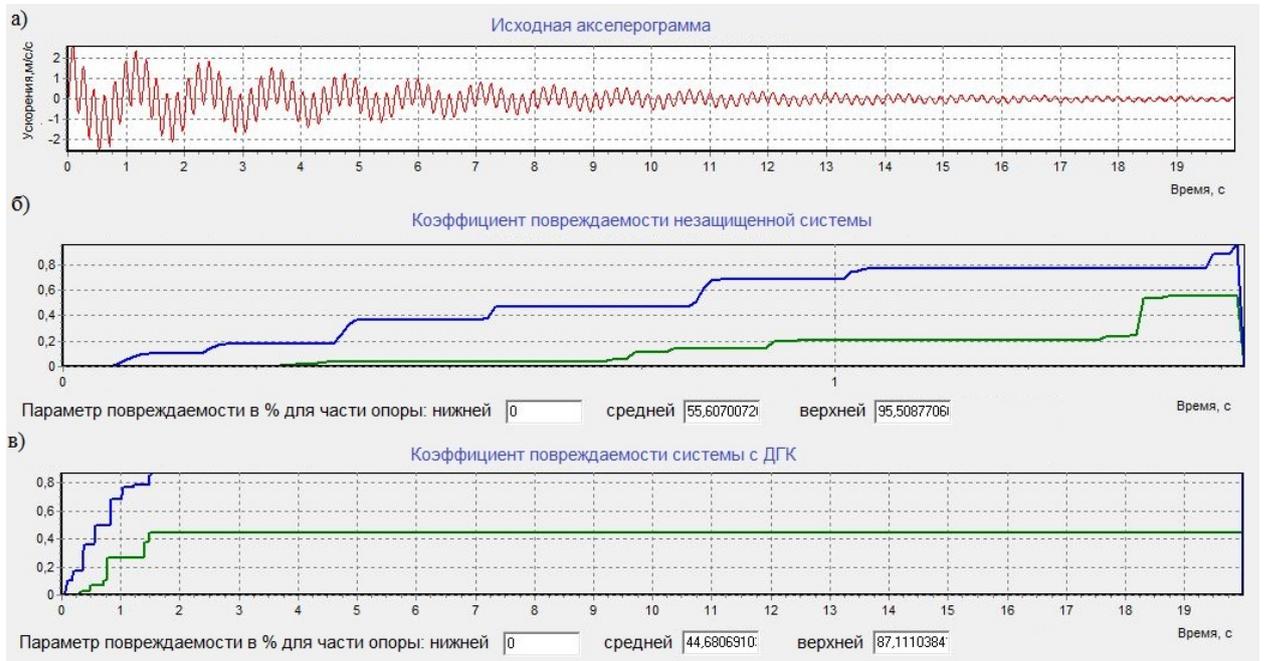


Рисунок 4.13. Результаты расчета сооружения без ДГК и с ДГК на воздействие землетрясения, сгенерированного опасным для незащищенной системы.

а) – акселерограмма землетрясения, сгенерированного опасным для незащищенной системы б) – график изменения коэффициента повреждаемости для незащищенного сооружения, в) – график изменения коэффициента повреждаемости для сооружения, защищенного ДГК

Системы с рассматриваемым типом нелинейности относятся к числу адаптивных систем, которые за счет возникновения повреждений отстраиваются от резонанса. Для таких систем Я.М. Айзенбергом введено понятие спектр состояний системы. Система приспособливается к программе нагружения, если спектр состояний пересечет спектр реакции. Теоретически, можно представить себе воздействие, которое меняет свой спектральный состав в процессе нагружения и после отстройки от первого резонанса возникает следующий

резонанс. Для этого в процессе, состоящем из нескольких затухающих синусоид, первая опасная гармоника должна затухнуть, а вторая остаться.

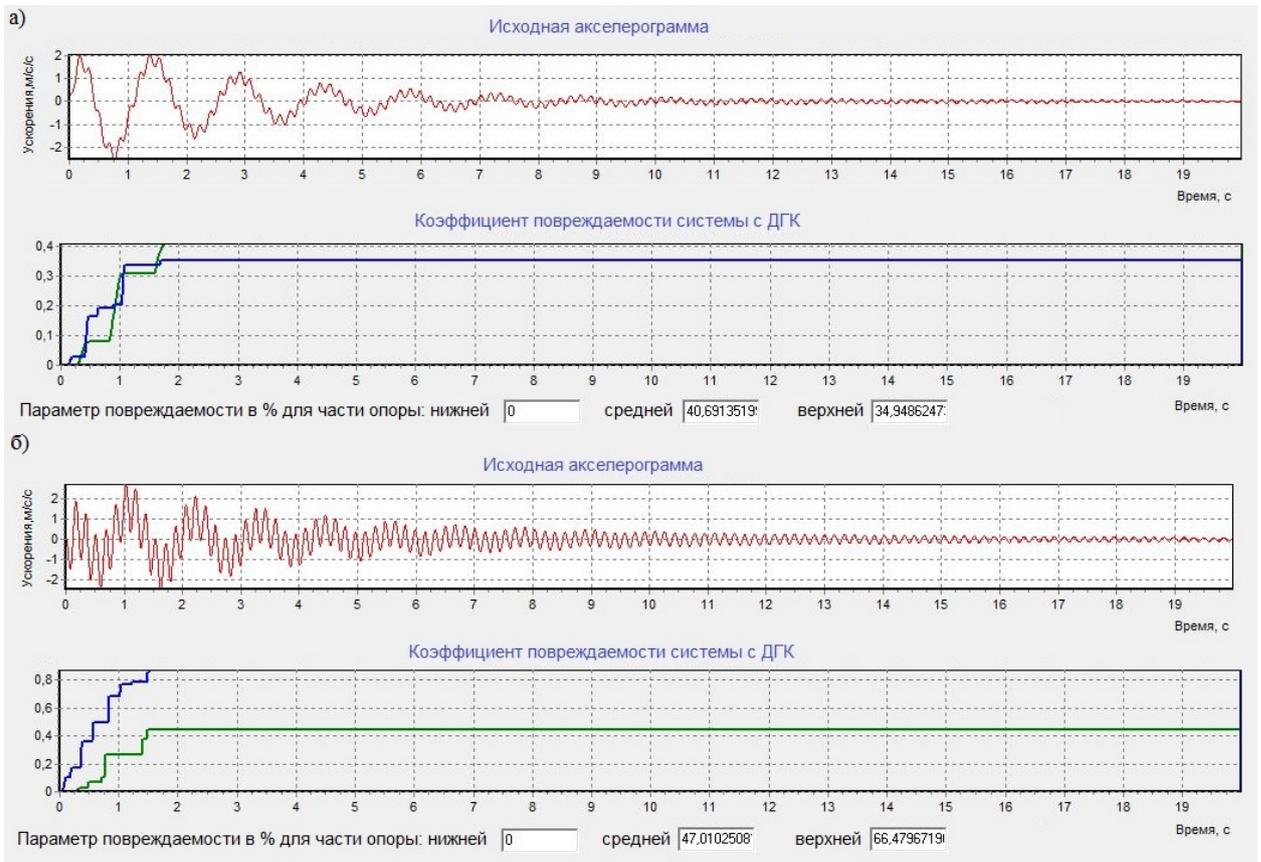


Рисунок 4.14. Результаты расчета сооружения с ДГК на воздействие, сгенерированного опасным для системы, защищенной гасителем.

а) – результаты расчета сооружения с ДГК на воздействие, сгенерированного опасным для системы, защищенной гасителем, по первой форме колебаний, б) – результаты расчета сооружения с ДГК на воздействие, сгенерированного опасным для системы, защищенной гасителем, по второй форме колебаний

В процессе исследования была сделана попытка сгенерировать такой процесс. Однако эта попытка оказалась не вполне успешной. При генерации воздействия использовались установленные требования к коэффициенту гармоничности и энергетическим характеристикам воздействия. Оказалось, что эти требования не позволяют реализоваться двум близким гармоникам. В качестве примера на рисунке. 4.15 приведено воздействие, смоделированное для

трех опасных частот. Первая частота является опасной для упругого сооружения с ДГК, вторая частота опасна для сооружения после накопления повреждения и отстройки от резонанса, и третья частота является второй по опасности для упругого сооружения и опасной частотой в момент близкий к разрушению. Спектры сгенерированного воздействия приведены на рисунке. 4.16 (спектр смещений и ускорений). Как видно из приведенного спектра доминирующей остается одна частота. Хотя другие частоты достаточно четко видны на спектре смещений. Результаты расчета приведены на рисунке. 4.17. Как видно из рисунка эта акселерограмма стала менее опасной. Это объясняется тем, что мы фиксируем значения энергетических параметров. Передавая часть энергии на гармонику, опасную для поврежденного сооружения, мы убираем часть энергии с гармоники, опасной для неповрежденного сооружения. В результате суммарный эффект воздействия снижается.

Исходя из сказанного выше, лучше всего сохранить настройку на упругую систему, в этом случае гаситель будет гасить резонансные колебания сооружения, которые возникают в течение 3-5 с интенсивного воздействия. Когда начинают возникать повреждения в системе, её собственный период начинает увеличиваться. Но время существования системы с фиксированным периодом оказывается малым для того, чтобы реализовались резонансные колебания.

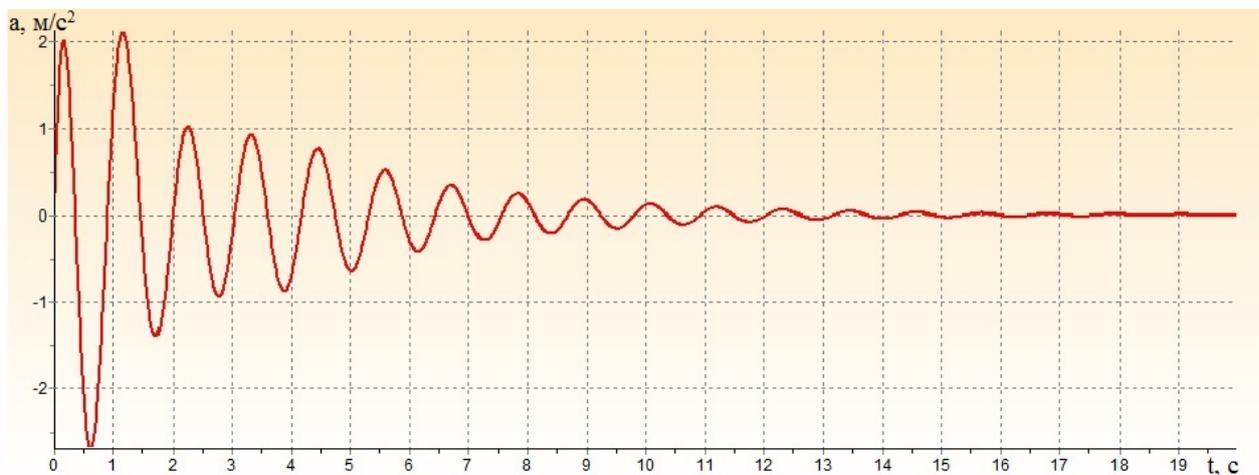


Рисунок 4.15. Воздействие, смоделированное для трех опасных частот

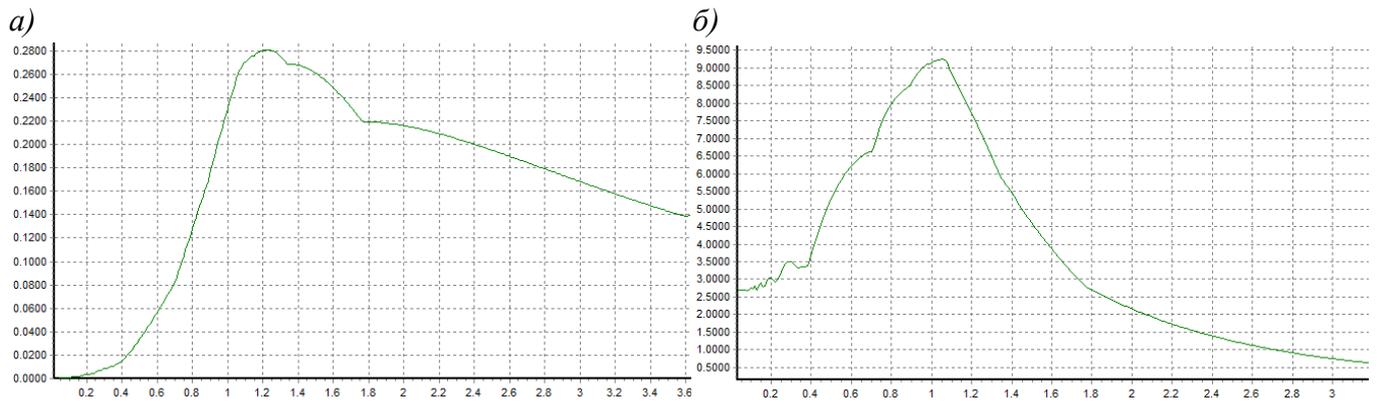


Рисунок 4.16. Спектры сгенерированного воздействия, смоделированного для трех опасных частот. а) спектр смещений, б) спектр ускорений

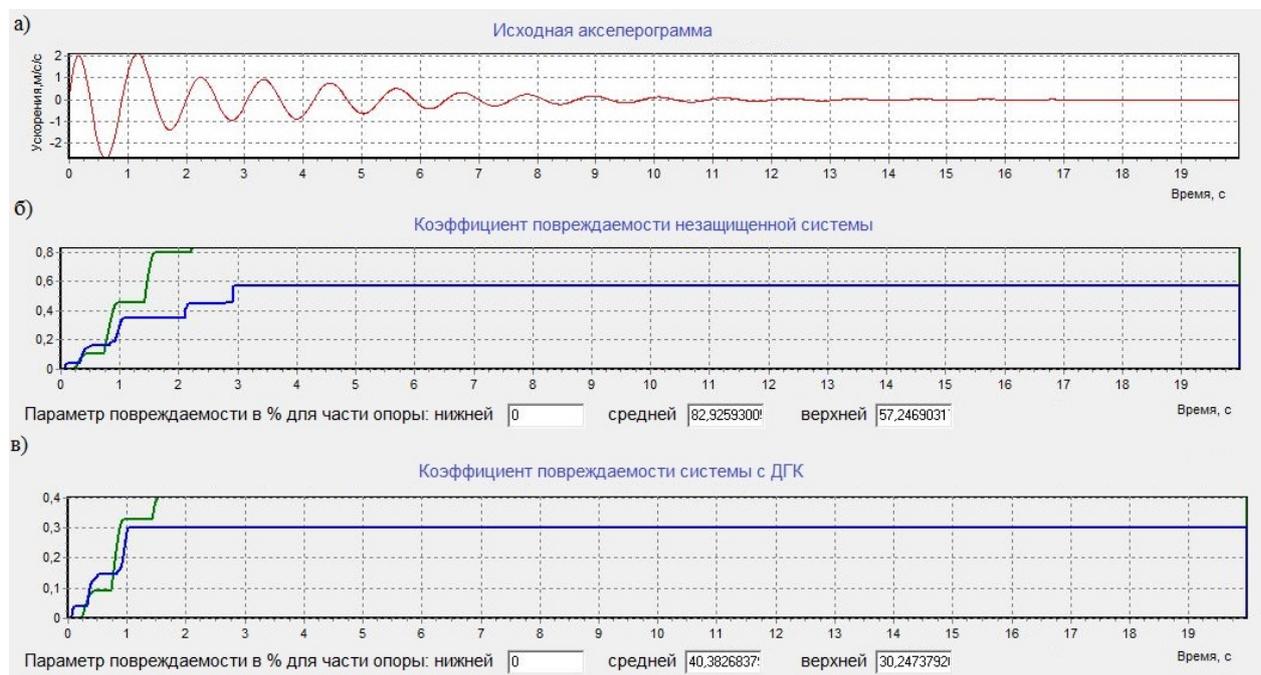


Рисунок 4.17. Результаты расчета сооружения без ДГК и с ДГК на воздействие, сгенерированное по трем опасным частотам.

- а) – акселерограмма землетрясения, сгенерированного по трем опасным частотам
 б) – график изменения коэффициента повреждаемости для незащищенного сооружения, в) – график изменения коэффициента повреждаемости для сооружения, защищенного ДГК

Также, исходя из того, что частота собственных колебаний сооружения меняется, целесообразно устанавливать два гасителя. Один должен снижать

колебания системы в упругой стадии работы, в этом случае ДГК может предотвратить переход в пластическую часть. Второй должен снижать колебания системы в пластической части. В этом случае ДГК начнет работать, когда частота колебаний сооружения совпадет с частотой, на которую настроен гаситель.

4.4. Выводы по главе 4.

1. Выполненные исследования показывают, что применение ДГК может быть весьма эффективно для снижения повреждаемости сооружения при разрушительных землетрясениях.

2. Для систем с деградирующей жесткостью показателем эффективности применения гасителя выступает коэффициент повреждаемости сооружения.

3. Для воздействий, вызывающих повреждение исходной системы без ее обрушения, применение ДГК снижает повреждаемость. При этом снижение повреждаемости особенно существенно для опасных воздействий. Так, например, для землетрясения, произошедшего в Бухаресте, повреждаемость снизилась с 82% до 36%, т.е. в 2.28 раза, а для землетрясения рекомендованного нормами Туркменистана в качестве расчетного, с 76% до 51%, т.е. в 1.5 раза.

4. Для сильных землетрясений, вызывающих обрушение исходной конструкции, применение ДГК может спасти конструкцию от разрушения. Например, землетрясение, сгенерированное резонансным для незащищенной системы, разрушает конструкцию без ДГК, а при наличии ДГК обрушения не просидит, хотя повреждаемость достигает 87%.

5. Сгенерированы воздействия, опасные для защищенного сооружения по первым двум преобладающим формам. Как показал расчет, воздействие, сгенерированное опасным для системы с ДГК по второй форме колебаний, оказалось более разрушительным, что подтверждает идею о проверке системы с ДГК на опасные воздействия, сгенерированные по первому и второму преобладающему периоду защищенной системы.

6. Сгенерировано воздействие по трем опасным частотам: первая частота является опасной для упругого сооружения с ДГК, вторая частота опасна

для сооружения после накопления повреждения и отстройки от резонанса, и третья частота является второй по опасности для упругого сооружения и опасной частотой в момент близкий к разрушению.

Сгенерированное воздействие оказалось менее опасным, т.к. часть энергии переходит на гармонику, опасную для поврежденного сооружения, следовательно, часть энергии уходит от гармоники, опасной для неповрежденного сооружения. В результате суммарный эффект воздействия снижается.

7. Для упругопластических систем критерием эффективности ДГК является время нахождения в пластическом состоянии и амплитуда пластических деформаций. Эти параметры, в конечном счете, определяют работу сил пластического деформирования, которая определяет возможность прогрессивного обрушения или малоциклового усталости конструкции.

8. Для выбора опасной акселерограммы необходимо строить спектр работ сил пластического деформирования для рассматриваемых записей.

9. Рассмотрена работа упругопластической системы без ДГК и с ДГК под воздействием резонансной гармоники, для незащищенного сооружения. По результатам расчета видно, что гаситель уменьшает время нахождения системы в пластическом состоянии.

10. Так как система в пластическом состоянии имеет другой преобладающий период, рассмотрен случай настройка ДГК на резонансную частоту сооружения, работающего нелинейно. В таком случае гаситель работает хуже, чем ДГК, подобранный по преобладающему периоду колебаний упругой системы. Это объясняется тем, что при воздействии нагрузки система не сразу переходит в пластическую стадию, и, как следствие, гаситель, настроенный на пластическую работу системы, хуже работает в упругой стадии работы системы. Тем не менее, такой ДГК уменьшает время нахождения системы в пластическом состоянии, хотя и меньше, чем гаситель, настроенный на упругую стадию.

11. Рассмотрена работа системы с гасителем при воздействии гармоники, опасной для защищенного сооружения. В таком случае время нахождения в пластическом состоянии увеличивается по сравнению со случаем работы гасителя

при воздействии на воздействие, опасное для незащищенной системы. Но это время меньше, чем время нахождения в пластическом состоянии для незащищенной системы при воздействии резонансной гармонике.

12. Поскольку частота собственных колебаний сооружения меняется, целесообразно устанавливать два гасителя. Один должен снижать колебания системы в упругой стадии работы, в этом случае ДГК может предотвратить переход в пластическую часть. Второй должен снижать колебания системы в пластической части. В этом случае ДГК начнет работать, когда частота колебаний сооружения совпадет с частотой, на которую настроен гаситель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы

1. ДГК могут эффективно использоваться для снижения сейсмических нагрузок. Однако уровень исследований по подбору параметров и оценке эффективности ДГК недостаточен для их широкого внедрения в практику сейсмостойкого строительства. Остаются неясными модели сейсмических воздействий и регламентация предельных состояний, не определена целевая функция для оптимизации ДГК при возникновении повреждений в конструкции, отсутствуют данные по оценке эффективности ДГК и его настройке при значительном демпфировании в сооружении. Все это сдерживает применение ДГК в сейсмостойком строительстве.

2. ДГК могут быть весьма эффективными для гашения сейсмических колебаний, однако при настройке их параметров необходимо учитывать рассеяние энергии в материале защищаемого сооружения.

3. Демпфирование в материале сооружения не позволяет использовать для оптимизации ДГК традиционно используемый для этой цели метод инвариантных точек. В работе оптимизация параметров проводилась путем их прямого варьирования на сетке возможных значений. В результате установлены зависимости настройки и демпфирования ДГК от показателя затухания в сооружении.

4. С увеличением гасящей массы в системе с кинематическим возмущением возникает ситуация, когда эффект гашения исчезает. Массу, при которой прекращается гашение, в литературе называют критической. Считалось, что эта масса в два раза больше массы защищаемого объекта. В работе уточнено понятие критической массы. Показано, что на зависимости эффективности гасителя E от его относительной массы ν существует точка, в которой $\frac{dE}{d\nu} = 0$.

Соответствующую массу предложено называть в работе критической. Выполненные исследования показали, что при отсутствии затухания в сооружении $\nu_{кр} \approx 1.9$, а с ростом затухания в сооружении величина $\nu_{кр}$ снижается

до 1. Этот результат представляется важным при использовании в качестве ДГК части самого сооружения, например, пролетного строения для гашения колебаний мостовых опор, жидкости для гашения колебаний резервуаров и т.п.

5. Для инженерных расчетов весьма важно иметь возможность оценки сейсмостойкости сооружения по линейно-спектральной методике (ЛСМ). Такой расчет можно проводить, не имея расчетных акселерограмм для площадки строительства. Однако действующий вариант ЛСМ не позволяет учесть фактическое демпфирование в сооружении и связи ДГК. В работе предложен вариант ЛСМ для систем с неоднородным демпфированием, основанный на точном разложении демпфированной системы по комплексным формам колебаний. Методика доведена до расчетных формул, аналогичных нормативным. При этом помимо спектра частот определяется спектр демпфирования системы $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$ – коэффициенты неупругого сопротивления по формам колебаний.

Далее в формулы для сейсмических сил вводится поправка $K_{\Psi, j} = \sqrt{\frac{\gamma_{эт}}{\gamma_j}}$, где $\gamma_{эт}$ – эталонное значение γ , характерное для объектов массового строительства. Для сильно демпфированных систем с непропорциональным демпфированием, в отличие от классического случая, исходная система уравнений распадается на n независимых пар уравнений и строится двойное количество сейсмических сил. В работе получены коэффициенты корреляции для рассматриваемого разложения уравнений движения.

6. Показано, что ЛСМ позволяет оптимизировать параметры гасителя и оценивать его эффект. При этом нормативный вариант ЛСМ допустимо использовать только для подбора жесткости ДГК при затухании в системе не более 15% от критического значения.

7. Расчет систем с ДГК по акселерограммам землетрясений требует более внимательного подхода, чем расчет обычных сооружений. Для проведения расчетов необходимо задавать акселерограммы, опасные для рассматриваемой системы. При оценке эффективности ДГК для сооружения без ДГК и с ДГК эти

акселерограммы различны. Для сооружения с ДГК приходится использовать две расчетные акселерограммы (или два набора акселерограмм). Одна акселерограмма определяет усилия в защищаемом сооружении и является резонансной для первой формы колебаний системы. Вторая акселерограмма определяет усилия в пружине гасителя и является резонансной для второй формы колебаний системы. Формальный подбор расчетных акселерограмм под площадку строительства может привести к неверному выводу о неэффективности, или даже опасности устройства ДГК.

8. При генерации акселерограмм для расчета ДГК необходимо учитывать помимо спектрального состава основные кинематические и энергетические характеристики реальных воздействий. К числу кинематических характеристик, кроме пиковых ускорений (PGA) и скоростей необходимо учитывать коэффициент гармоничности воздействия k

$$k = \frac{\ddot{y}_0^{(\max)} \cdot y_0^{(\max)}}{(\dot{y}_0^{(\max)})^2}$$

Для синтетических акселерограмм параметр k должен находиться в диапазоне от 2 до 10 в зависимости от преобладающей частоты акселерограммы. Занижение величины k приводит к завышению эффективности ДГК. Однако именно такие воздействия, с малым значением k , являются наиболее опасными для сооружения.

К энергетическим характеристикам воздействия относятся интенсивность по Ариасу (I_A), кумулятивная абсолютная скорость (CAV) и плотность сейсмической энергии (SED).

9. Кроме указанных выше энергетических характеристик автором введена новая энергетическая характеристика воздействия, основанная на понятии спектра работы сил пластического деформирования. В отличие от традиционного спектра акселерограмма пропускается через осциллятор с диаграммой деформирования Прандтля. При этом получается система спектров

работы сил пластического деформирования в зависимости от предела упругости системы.

10. Проведенные исследования позволяют заключить, что ДГК повышают сейсмостойкость сооружений при разрушительных землетрясениях. ДГК снижают развитие трещинообразования (максимальное за историю нагружения смещение) для систем с деградирующей жесткостью и работу сил пластического деформирования для упругопластических систем

11. Для систем с деградирующей жесткостью целесообразна настройка гасителя на собственную частоту колебаний неповрежденной системы

12. Для упругопластических систем вопрос настройки оказался более сложным. Эти системы имеют АЧХ, и представляется очевидным, что следует настраивать ДГК на опасную частоту по АЧХ системы или на максимум на спектре работы сил пластического деформирования. Однако выполненные исследования показали, что это не всегда так. При настройке ДГК на частоту упругих колебаний неповрежденного сооружения можно вообще исключить его переход в пластическую область. По-видимому, настройка по АЧХ предполагает значительное время колебаний, за которое процесс становится стационарным. В нашем случае значительная часть энергии уходит на раскачку упругого сооружения. Если сохранять энергию расчетной акселерограммы, то на вторую частоту воздействия не хватает энергии для реализации установившегося процесса и эффект гашения не реализуется (нечего гасить). Поэтому настройка ДГК на частоту упругой системы представляется более эффективной.

13. Представляется полезным для повышения сейсмостойкости сооружений, подверженных сильным землетрясениям использование двух ДГК, один из которых настроен на частоту неповрежденной системы, а другой – на частоту системы с повреждениями

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакаров, А. Д. Исследование оптимальных параметров системы сейсмозащиты с выключающимися связями и ограничителем перемещений по критерию надежности на ЭВМ методом Монте-Карло / А. Д. Абакаров // Расчет и проектирование зданий для сейсмостойких районов. - М.: Наука. - 1988. - С.108-114.
2. Авидон, Г. Э. Анализ работы сейсмоизолирующих фундаментов на опорных элементах с отрицательной жесткостью / Г. Э. Авидон, Г. В. Давыдова, Ф. А. Доронин, Е. А. Карлина, А. М. Уздин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2009. - № 3. - С. 15-21
3. Айзенберг, Я. М. Исследования адаптивных систем сейсмозащиты и методов сейсмоизоляции / Я. М. Айзенберг // Сейсмостойкое строительство. – 1980. - № 1. - С. 32-34.
4. Айзенберг, Я. М. Спектры состояния систем с деградирующей жесткостью и их применение для оценки сейсмической реакции сооружений / Я. М. Айзенберг // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. -1981. - Вып. 6. - С. 24-29.
5. Айзенберг, Я. М. Генерирование расчетного ансамбля синтетических акселерограмм и исследование влияния их параметров на сейсмическую реакцию сооружения / Я. М. Айзенберг, К. Ю. Залилов // Расчет и проектирование зданий для сейсмоопасных районов: на основе оценок оптим. надежности и сейсм. риска : сб. ст. / АН СССР, Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву при Президиуме АН СССР ; отв. ред. Я. М. Айзенберг. - Москва : Наука, 1988. - С. 5-14.
6. Айзенберг, Я. М. О критериях предельных состояний и диаграммах "восстанавливающая сила-перемещения" при расчетах на сейсмические воздействия / Я. М. Айзенберг, Л. Ш. Килимник // Сейсмостойкость зданий и инженерных сооружений : сб. ст. / Под ред. д-ра техн. наук проф. И. И. Гольденבלата. - М. : Стройиздат, 1972. - С. 46-61.

7. Айзенберг, Я. М. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружения / Я. М. Айзенберг, А. И. Нейман, А. Д. Абакаров, М. М. Деглина, Т. Л. Чачуа; М. : Наука, 1978. - 246 с.
8. Айзенберг, Я. М. Эффективные системы сейсмоизоляции. Исследования, проектирование, строительство / Я. М. Айзенберг, В. И. Смирнов, С. И. Бычков, Ю. А. Сутырин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. - №1. - С. 31-37.
9. Альберт, И. У. Сейсмоащитные фундаменты реакторных отделений АЭС / И. У. Альберт, О. А. Савинов, Б. Д. Кауфман, А. М. Уздин; М.: Информэнерго, 1988. - 64 с.
10. Аманкулов, Т. Исследование поведения одномассовой системы с нелинейностью гистерезисного типа при сейсмическом воздействии / Т. Аманкулов, Б. А. Кириков // Сейсмостойкое строительство. - 1980.- № 8. - С.16-23.
11. Ананьев, И. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем / И. В. Ананьев. - М., Л. : Гостехиздат, 1946 – 223 с.
12. Аптикаев, Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф. Ф. Аптикаев – М.: ООО «Наука и образование», 2012. – 176 с.
13. Аптикаев, Ф. Ф. Прогноз параметров сейсмических колебаний, построение локального спектра и синтетической акселерограммы / Ф. Ф. Аптикаев // В сб. Сейсмостойкое строительство в эпоху могущества и счастья. – Ашхабад: Ылым, 2013. - С. 285-304
14. Аубакиров, А. Т. Особенности задания сейсмического воздействия для обоснования проекта сейсмоизолирующих фундаментов / А. Т. Аубакиров // Известия ВНИИГ. – 1989. - Т. 212. - С. 102-109.
15. Белаш, Т. А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений: монография / Т. А. Белаш. – М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017 – 175 с.
16. Бенин, А. В. Оценка коэффициента редукции сейсмической нагрузки с позиций предельных перемещений сооружения / А. В. Бенин, О. П. Нестерова, Г.

- А. Сибуль, А. М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2018. - №4 (42). - С. 18-20.
17. Бенин, А. В. Численная оценка влияния параметров настройки динамического гасителя колебаний на эффективность его работы при сейсмических воздействиях / А. В. Бенин, Г. А. Богданова // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2000. - № 2. - С. 11-13.
18. Бирбраер, А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – СПб. : Наука, 1998. - 254 с.
19. Богданова М.А. Числовые характеристики сейсмических воздействий / 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.
20. Богданова, Г. А. Применение динамических гасителей колебаний с демпферами сухого трения в системах сейсмозащиты эксплуатируемых зданий. автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Г. А. Богданова ; ПГУПС. – СПб, 2000. – 24 с.
21. Болотин, В. В. Статистические методы в строительной механике / Болотин, В. В. - М. : Госстройиздат, 1961. - 202 с.
22. Бородин, Н. А. Учет пластической энергоемкости элементов жесткости (связей, диафрагм) при расчете каркасов зданий на сейсмическую нагрузку / Н. А. Бородин // Сейсмостойкое строительство.-1980. - № 2. - С.1-5.
23. Вахрина, Г. Н. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий / Г. Н. Вахрина, В. И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. - № 1. - С.29-39.
24. Ветошкин, В. А. Вопросы практического использования современных методов расчетов энергооборудования на сейсмостойкость / В. А. Ветошкин, В. В. Костарев, А. Ю. Щукин // Труды ЦКТИ. – 1984. - Вып. 212. - С. 3-13.
25. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. - 4-е изд., доп. - М. : Наука, 1988. - 548 с.

26. Гиман, Л. Н. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете многоопорных конструкций / Л. Н. Гиман, А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. - № 2. - С. 22-25.
27. Гольденблат, И. И. Модели сейсмостойкости сооружений / И. И. Гольденблат, Н. А. Николаенко, С. В. Поляков, С. В. Ульянов ; Отв. ред. В.Я. Иванин. - Москва : Наука, 1979. - 252 с.
28. ГОСТ 6249-52. Шкала для определения силы землетрясений в пределах от 6 до 9 баллов. Взамен ОСТ 4537 ; введ. С 01.01.1953. – М., 1959. – 3 с.
29. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. введ. С 01.09.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
30. Ден-Гартог, Дж. П. Механические колебания / Пер. с 4-го америк. изд. А. Н. Обморшева. – М. : Физматгиз, 1960. - 580 с.
31. Долгая, А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом / А. А. Долгая // Э-И. ВНИИНТПИ. Сер. «Сейсмостойкое строительство». – 1994. - Вып. 5-6. - С. 56-63.
32. Долгая, А. А. Статистический анализ интенсивности по Ариасу и скорости для реальных землетрясений / А. А. Долгая, А. В. Индейкин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. - № 2. - С.32-33
33. Долгая, А. А. Теория диссипативных систем : Учеб. пособие / А. А. Долгая, А. В. Индейкин, А. М. Уздин; М-во путей сообщ. Рос. Федерации. Петерб. гос. ун-т сообщ. - СПб. : Петерб. гос. ун-т путей сообщ., 1999. - 99 с.
34. Елисеев, О. Н. Сейсмостойкое строительство : учебник / О. Н. Елисеев, А. М. Уздин. - СПб. : Изд. ПВВИСУ, 1997. - 371с.
35. Завриев, К. С. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений / К. С. Завриев, А. Г. Назаров, Я. М. Айзенберг и др. ; Под общ. ред. акад. К. С. Завриева [и др.]. – М. : Стройиздат, 1970. - 224 с.
36. Зеленков, Ф. Д. Предохранение зданий и сооружений от разрушения с помощью сейсмоамортизатора / Ф. Д. Зеленков. - М. : Наука, 1979. - 49 с.

37. Ильина, Д. А. Один аспект проблемы задания расчетных акселерограмм / Д. А. Ильина, А. М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2017. - № 1. - С. 40-43.
38. Ильичев, В. А. Динамическое взаимодействие сооружений с основанием и передача колебаний через грунт / В. А. Ильичев // Динамический расчет сооружений на специальные воздействия : справочник / М. Ф. Барштейн, Н. М. Бородачев, Л. Х. Блюмина и др.; Под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. - М. : Стройиздат, 1981. - С. 114-128.
39. Ильясов, Б. И. Простая модель сейсмического воздействия для динамического расчета сооружений / Б. И. Ильясов, Г. Аннаев, Т. В. Жгутова, О. А. Сахаров, А. М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2014. - № 1. - С. 24-27.
40. Инструкция по оценке сейсмостойкости эксплуатируемых мостов на сети железных и автомобильных дорог (на территории Туркменской ССР). – Ашхабад : Ылым, Госстрой Туркменской ССР, 1988. - 106 с.
41. Килимник, Л. Ш. Методы целенаправленного проектирования в сейсмостойком строительстве / Л. Ш. Килимник. - М. : Наука, 1985. – 155 с.
42. Килимник, Л. Ш. Анализ работы зданий со скользящим поясом с использованием многомассовой расчетной модели / Л. Ш. Килимник, Л. Л. Солдатова, Л. И. Ляхина. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. - № 6. - С. 96-73.
43. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. / Пер. с англ. Л. Ш. Килимника, А.В. Швецово́й. - М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.
44. Клячко, М. А. Землетрясение и мы / М. А. Клячко. – СПб. : РИФ «Интеграф», 1999. - 236 с.
45. Коловский, М. З. Нелинейная теория виброзащитных систем / М. З. Коловский. - М. : Наука, 1966. - 317 с.
46. Коренев, Б. Г. Оптимальные параметры динамического гасителя колебаний при воздействиях типа сейсмического / Б. Г. Коренев, В. С. Поляков // Научн.

техн. Реф. Сб. ЦНИИС Госстроя СССР. Серия 14: Сейсмостойкое строительство. - 1997. - Вып.3. - С. 37-44.

47. Коренев, Б. Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения / Б. Г. Коренев, Л. М. Резников. - М. : Наука, 1988. - 304 с.

48. Корчинский, И. Л. Кардинальные вопросы сейсмостойкого строительства / И. Л. Корчинский, Т. Ж. Жунусов. - Алма-Ата : Казпромстройниипроект, 1988. -131 с.

49. Корчинский, И. Л. Расчет сооружений на сейсмические воздействия / И. Л. Корчинский, проф. д-р техн. наук. – М. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954. - 76 с.

50. Корчинский, И. Л. Совершенствование метода расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия / И. Л. Корчинский, М. Ф. Барштейн // Снижение стоимости и улучшение качества сейсмостойкого строительства : Материалы совещания / Науч. ред. д-р техн. наук проф. И. И. Гольденблат и канд. техн. наук В. А. Быховский ; Акад. строительства и архитектуры Акад. наук Груз. ССР. – М. : Госстройиздат, 1961. - С. 30-37.

51. Крендалл, С. Роль демпфирования в теории колебаний / С. Крендалл // Периодический сборник переводов иностранных статей. Механика. – 1971. - № 5 (129). - С.3-22.

52. Кузнецова, И. О. Сейсмоизоляция – способ проектирования сооружений с заданными параметрами предельных состояний и сценариев накопления повреждений / И. О. Кузнецова, Хайбинь Ван, А. М. Уздин, С. А. Шульман // Избранные статьи профессора О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на шестые савиновские чтения : сб. ст. – СПб, 2010. - С. 105-120

53. Макаров, С. О. Разбор элементов, составляющих боевую силу судов / С. О. Макаров // Мор. Сб. – 1894. - № 6. – С. 33–106

54. Мелкумян, М. Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях / М. Г. Мелкумян // Инженерно-Строительный журнал. - 2012. - № 5. – С. 23-29.

55. Медведев С. В. Инженерная сейсмология / С. В. Медведев, д-р техн. наук проф. ; Акад. наук СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М. : Госстройиздат, 1962. - 284 с.
56. Мкртычев, О. В. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения) : монография / О. В. Мкртычев, Г. А. Джинчвелашвили ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Московский гос. строит. ун-т". - 2-е изд. - Москва : МГСУ, 2014. - 190 с.
57. Москвитин, В. В. Циклические нагружения элементов конструкций / В. В. Москвитин. - М. : Наука, 1981. - 344 с.
58. Назин, В. В. Индустриализация строительства сооружений сейсмостойкой конструкции / В. В. Назин. – Киев : Будивельник, 1977. – 92 с.
59. Немчинов, Ю. И. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, А. К. Хавкин, К. Н. Бабик. - Киев, 2012. - 384 с.
60. Нестерова, О.П. Отклик на статью А. Г. Тяпина «Неклассическое демпфирование в системе «основание-сооружение» и вопрос о применимости спектрального метода расчета усилий» / О. П. Нестерова, К. В. Воробьева, А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений – 2017. - № 2. - с. 60-63.
61. Нестерова, О. П. К вопросу о задании уровня сейсмического воздействия в шкалах балльности и нормах проектирования / О. П. Нестерова, А. С. Ткаченко, А. М. Уздин, А. А. Долгая, Л. Н. Смирнова, Ю. Гуань // Вопросы инженерной сейсмологии - 2018. - Т. 45, № 1. - с. 73–80.
62. Нестерова, О. П. Универсальная энергетическая характеристика землетрясения / О. П. Нестерова, А. М. Уздин, Г. А. Сибуль, А. А. Долгая, Ю. Гуань // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2018. - №3 (41). - с. 23-26.
63. Никитин, А. А. Динамический гаситель колебаний для мостовых опор / А. А. Никитин // Сейсмостойкое строительство. - 1982. - № 4. - С. 5-7.

64. Никитин, А. А. Применение динамических гасителей колебаний для сейсмозащиты мостов / А. А. Никитин, А. М. Уздин // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. -1986. - Вып.9. - С. 20-24.
65. Никонова, Н. В. Особенности задания воздействия и расчета нелинейных систем сейсмоизоляции / Н. В. Никонова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 430-438.
66. Ньюмарк, Н. М. Основы сейсмостойкого строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблюэт; Сокр. пер. с англ. Г. Ш.Подольского. - М. : Стройиздат, 1980. - 344 с.
67. Ойзерман, В. И. Расчет конструкций на сейсмические воздействия по методу предельных состояний. Реферативная информация / В. И. Ойзерман // ЦИНИС. Сер. XIV. Сейсмостойкое строительство. – 1978. - Вып. 9. - С. 4-7.
68. Пейчев, М. М. К вопросу учета демпфирования в рамках СНиП «Строительство в сейсмических районах» / М. М. Пейчев, А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2001. - № 3. - С. 37-39.
69. Петров, А. А. Оценка сейсмостойкости конструкций на основе использования энергетической меры воздействия / А. А. Петров // ЭИ «Строительство и архитектура. Сейсмостойкое строительство», ВНИИТПИ. – 1993. - Вып. 6. - С. 2-7.
70. Петров, А. А. Влияние взаимной корреляции между обобщенными координатами при случайных колебаниях линейных систем / А. А. Петров, С. В. Базилевский // Строительная механика и расчет сооружений. - 1979. - № 4. - С. 52-56.
71. Поляков, В. С. К вопросу об эффективности динамического гасителя колебаний при сейсмических воздействиях / В. С Поляков. // Строительная механика и расчет сооружений. - 1980. - № 5. - С. 49-53.
72. Поляков, С. В. Проектирование сейсмостойких зданий / С. В. Поляков, Ф. В. Бобров, Ю. Д. Быченков и др. ; Под общ. ред. проф. С. В. Полякова. – М. : Стройиздат, 1971. - 256 с.

73. Поляков, В. С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В. С. Поляков, Л. Ш. Килимник, А. В. Черкашин. - М. : Стройиздат, 1988. - 318 с.
74. Поляков, С. В. Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом в фундаменте / С. В. Поляков, Л. Ш. Килимник, Л. А. Солдатова. - М. : Стройиздат, 1984. – 32.
75. Резников, А. М. Эквивалентная модель многомассовой системы с вязким и частотно-независимым внутренним трением / А. М. Резников // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. - № 4. - С. 44-48.
76. Рекомендации по заданию сейсмических воздействий для расчета зданий разной степени ответственности. – СПб. : Петропавловск-Камчатский, КамЦентр, 1996. – 12 с.
77. Рекомендации по проектированию гасителей колебаний для защиты зданий и сооружений, подверженных горизонтальным динамическим воздействиям от технологического оборудования и ветра. -М. : ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко, 1978. - 68 с.
78. Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками. - М. : Стройиздат, 1982. – 207 с.
79. Рутман, Ю. Л. Анализ нагруженности сооружения на основе величины энергетического критерия интенсивности землетрясения / Ю. Л. Рутман // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 2. - С. 61 –63.
80. Рутман, Ю. Л. Анализ возможностей применения энергетического критерия САУ для расчета сейсмостойкости сооружения / Ю. Л. Рутман, Э. Симборт. IX Всеукраинская научно-техническая конференция «Строительство в сейсмических районах Украины». Будівельні конструкції: зб. Наук. Пр. – К.: ДП НДІБК. 2012. – Вип. 76. – С. 618-625.
81. Савинов, О. А. О применении динамического гасителя колебаний / О. А. Савинов // Труды научно-исслед. сектора Ленинградского отделения треста глубинных работ. - Л: Стройиздат Наркомстроя. – 1940. – Вып. 1. – С.30-35.
82. Савинов, О. А. Сейсмоизоляция сооружений (концепция, принципы устройства, особенности расчета) / О. А. Савинов // Динамические проблемы

строительной техники : Избр. ст. и докл. / О. А. Савинов. - СПб. : Изд-во ВНИИГ, 1993. - С. 155-178.

83. Савинов, О. А. Оптимизация параметров сейсмоизолирующего фундамента с демпфером сухого трения и упругопластическим ограничителем перемещений / О. А. Савинов, В. В. Сахарова // Сейсмостойкое строительство. – 1985. - № 1. - С. 1-7.

84. Савинов, О. А. Многокаскадное демпфирование сейсмоизолирующих фундаментов АЭС / О. А. Савинов, В. В. Сахарова, А. М. Уздин // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. -1989.- Т. 212. - С. 115-121.

85. Савинов, О. А. Об одной форме линейно-спектральной теории сейсмостойкости для расчета мостов / О. А. Савинов, А. М. Уздин // Сейсмостойкость транспортных сооружений : сб. ст. / Отв. ред. Ш. Г. Напетваридзе - М. : Наука, 1980. - С. 10-27.

86. Савинов, О. А. О системе расчетных коэффициентов для определения сейсмических нагрузок на большие плотины / О. А. Савинов, А. М. Уздин, С. Г. Шульман // IV Всесоюзная школа семинар «Методы количественной оценки сейсмических воздействий и применение спектрального анализа в сейсмологии. Тезисы лекций. 20-25 октября 1980 г., г.Сигнахи». – Тбилиси : Мецниерба, 1980. - С. 168-182.

87. Салганик, М. П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения / М. П. Салганик // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1967. - Вып. 2. - С. 157-153.

88. Сахаров, О. А. К вопросу задания сейсмического воздействия при многоуровневом проектировании сейсмостойких конструкций / О. А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2004. - № 4. - С. 7-9.

89. Сахаров, О. А. Назначение расчетного ускорения с учетом новых карт сейсмического районирования / О. А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. - № 2. - С. 48-49.

90. Сахарова, В. В. Использование пролетного строения для гашения сейсмических колебаний опор мостов / В. В. Сахарова, А. А. Симкин, А. А.

- Никитин, А. М. Уздин // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. - 1982. - Вып. 4. - С. 14-18.
91. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1968. - 463 с.
92. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Ю.В. Ризниченко, С.С. Сейдузова, Р.С. Пронишин и др. ; Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. – М. : Наука, 1979. - 192 с.
93. Сейсмический риск и инженерные решения : пер. с англ. / под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. - М. : Недра, 1981. – 375 с.
94. СН 8-57. Нормы и правила строительства в сейсмических районах. Утв. 9/VIII 1957 г. / Гос. ком-т Совета Министров СССР по делам строительства. - Москва : Госстройиздат, 1957. - 103 с.
95. Солдатов, А. Ю. Учет демпфирования при расчетах сооружений на кинематические воздействия / А. Ю. Солдатов, В. Л. Лебедев, В. А. Семенов // VII Савиновские чтения : тезисы докладов. – СПб. : ПГУПС, 2014. - С. 21-22.
96. Сорокин, Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е. С. Сорокин, д-р техн. наук ; Акад. строительства и архитектуры СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций. - Москва : Госстройиздат, 1960. - 131 с.
97. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* ; введ. с 25.11.2018. – М. : Минстрой России, 2018. – 116 с.
98. Сюэхиро К. Инженерная сейсмология. Экономическая жизнь / К. Сюэхиро. - М., 1935. - с. 167
99. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. - М. : Наука, 1976.- с.209-216.
100. Тяпин, А. Г. Учет взаимодействия сооружения с основанием при расчетах на сейсмическое воздействие / А. Г. Тяпин. - М. : Издательство АСВ, 2014. - 136 с.
101. Уздин, А. М. Задание сейсмического воздействия. Взгляд инженера-строителя / А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. - № 1. - С. 27-31.

102. Уздин, А. М. К вопросу о возможном усилении сейсмических колебаний наземных сооружений и оценке этого усиления по действующим нормам / А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. - № 5. - С. 50-54.
103. Уздин, А. М. Метод определения спектральных характеристик сооружений с неоднородным демпфированием для оценки их сейсмостойкости / А. М. Уздин // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. - 1986. - Вып. 2. - С. 2-6.
104. Уздин, А. М. Учет демпфирования колебаний в рамках линейно-спектральной теории сейсмостойкости / А. М. Уздин // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике «Методы исследований и расчетов сейсмостойкости гидротехнических и энергетических сооружений». - Л.: ВНИИГ им. Б. Е.Веденеева, 1982. - С. 29-34.
105. Уздин, А. М. Что скрывается за линейно-спектральной теорией сейсмостойкости / А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2009. - № 2. - С. 18-23.
106. Уздин, А. М. Расчет элементов и оптимизация параметров сейсмоизолирующих фундаментов / А. М. Уздин, А. А. Долгая. - М. : ВНИИНТПИ, 1997. - 76 с.
107. Уздин, А. М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / А. М. Уздин, С. В. Елизаров, Т. А. Белаш. - Москва : ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2012. - 501 с.
108. Уздин, А. М. Методика расчета кусочно-линейных систем на сейсмические воздействия. / А. М. Уздин, И. О. Ирзахметова // Э-И. ВНИИНТПИ. Сер. “Сейсмостойкое строительство”. – 1994. - Вып. 5-6. - С.63-69.
109. Уздин, А. М. Сейсмостойкость мостов / А. М. Уздин, И. О. Кузнецова. - Саарбрюкен (Германия) : Palmarium, 2014. - 450 с.

110. Уздин А.М. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений / А.М. Уздин, О.П. Нестерова, С.В.Прокопович, А.А. Долгая, Ю. Чанг, Ю. Гуань, Х. Ван // Российско-китайский научный журнал «Содружество» Ежемесячный научный журнал научно-практической конференции – 2017. - № 20 1 часть. – С. 59-66.
111. Уздин, А. М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А. М. Уздин, Т. А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. - СПб. : Изд-во ВНИИГ, 1993. – 175 с.
112. Уздин, А. М. Оценка сейсмостойкости специальных демпфированных систем / А. М. Уздин, М. Ю. Федорова, Н. В. Дурсенева // VI Поляховские чтения. Международная конференция по механике, посвященная 95-летию со дня рождения С.В. Валландера. Избранные труды. – СПб, 2012. – С. 52-53.
113. Уздин, А. М. Об одном способе задания сил сопротивления в системах с неоднородным демпфированием / А. М. Уздин, Д. В. Щелкунов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2011. - № 2. - С. 47-50.
114. Уломов, В. И. Новый комплекс карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) / В. И. Уломов, М. И. Богданов // Инженерные изыскания. – 2013. - № 8. - С. 30-39.
115. Уломов, В. И. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской федерации / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина // Сейсмостойкое строительство. – 1998. - №4. - С. 30-34.
116. Цейтлин, А. И. Об учете внутреннего трения в нормативных документах по динамическому расчету сооружений / А. И. Цейтлин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. - № 4. - С. 33-38.
117. Цейтлин, А. И. Сейсмические колебания многоэтажного здания с "гибким" верхним этажом / А. И. Цейтлин, Л. И. Ким // Снижение материалоемкости и трудоемкости сейсмостойкого строительства : Тез. докл. всесоюз. совещ. (Алма-Ата, окт. 1982 г.). - М. : Стройиздат, 1982.-85 с.
118. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция жилых зданий / Ю.Д. Черепинский. – Алма-Аты, 2003. – 157 с.

119. Шульман, С. Г. Методы оценки надёжности систем сейсмоизоляции зданий и сооружений / С. Г. Шульман, И. У. Альберт. - СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2014. - 432 с.
120. Эртелева, О. О. Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий / О. О. Эртелева, Ф. Ф. Аптикаев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. - № 1. - С. 43-45.
121. Abdulsalam, I. Optimum design of tuned mass damper systems for seismic structures / I. Abdulsalam, M. Al-Janabi & M. G. Al-Taweel // WIT Transactions on The Built Environment. – 2009. – Vol. 104. – P. 175-184.
122. Akiyama, H. State-of-the-art in the world on seismic isolation of buildings based on the results of the international workshop held in Tokyo in April 1992 most recent developments for buildings and bridges in Japan / H. Akiyama // Isolation, energy dissipation and control of vibrations of structures. Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar Capri (Napoli), Italy, august 23 to 25. - 1993. - P. 3-26.
123. Asl, A. K. Performance of Tuned Mass Dampers in Vibration Response Control of Base-Excited Structures / A. K. Asl, A. Farzampour // Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering. – 2017. – Vol. 2(3). - P. 87-94.
124. Arias, A. A measure of earthquake intensity. Seismic Design for Nuclear Power Plants (R. J. Hansen, ed.) / A. Arias // MIT Press, Cambridge, 1970. – P. 438–483.
125. Blakeley, R. W. G. Recommendations for the design and construction of base isolated structures / R. W. G. Blakeley, Charleson A. W. ets. // Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. – 1979. - Vol. 12, № 2. - P.136-157.
126. Bomhard, H. LNG storage tanks for seismically highly affected sites / H. Bomhard, L. Stempniewski // Isolation, energy dissipation and control of vibrations of structures. Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar Capri (Napoli), Italy, august 23 to 25. - 1993. - P. 377-388.
127. Bonacina, G. Seismic isolation of non-nuclear power plants in Italy / G. Bonacina, M. Forni, ets. // Isolation, energy dissipation and control of vibrations of structures.

Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar Capri (Napoli), Italy, august 23 to 25. - 1993. - P. 389-400.

128. Chandrasekaran, A. R. Seismic behavior of multistoried buildings of medium height with flexible first storey / A. R. Chandrasekaran, S. P. Gupta, R. Khetarpol // Journal of Structural Engineering. - 1979. - Vol. 6. - № 4. - P. 200-205.

129. Chopra, A. K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering / A. K. Chopra. - Second edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995. - 794 p.

130. Christopoulos, C. Semi-active tuned mass damper for seismic protection of MDOF structures: Controlling the damping / C. Christopoulos, M. Rotunno, R. A. de Callafon // 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 2002. - № 178.

131. Connor, J. J. Introduction to Structural Motion Control / J. J. Connor. - Prentice Hall, 2002. - 736 p.

132. Divja, Brahmavathan Evaluation of response reduction factor of irregular reinforced concrete frame structures / Brahmavathan Divja, C. Arcumar // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9(23). - P. 2-8.

133. 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, Balkema, Rotterdam. – 1996. – P. 143-147.

134. Dowric, D.J. Earthquake resistant Design for Engineers and architects / D.J. Dowric. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 540 p.

135. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. prEN 1998. – 1:2003 (E). – Part 2. – 15 p.

136. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. prEN 1998. – 2:200X. – Part 2. – 23 p.

137. Faccioli, E. Displacement spectra for long periods / E. Faccioli, R. Paolucci, Ju. Rey // Earthquake Spectra. – 2004. - Vol.20(2). - P. 347-376.

138. Fajfar, P. Equivalent ductility factors, taking into account Low-Cycle Fatigue / P. Fajfar // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. – 1992. – Vol. 21. – P. 837-848.
139. Fardis, M. N. Code developments in earthquake engineering / M. N. Fardis // Published by Elsevier Science Ltd. 12th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 845. – 2002.
140. Foss, K. A. Coordinates which uncouple the equations of motion of damped linear dynamic system / K. A. Foss // *J. Appl. Mech.* – 1958. – 25. – P. 361-364.
141. Frahm, H. U.S. Patent no. 0989958. Germany, serial no. 525,455 Device for damping vibrations of bodies. Frahm H. Application filed 30.10.1909. Patented 18.04.1911
142. Frahm, H. Schlingertanks zur Abdämpfung von Schiffsrollbewegungen / H. Frahm. - *Jahrbuch d. Schiffbautechnik Ges.*, 1911. - Bd. 12. – P. 283-284.
143. Francesco Ricciardelli On the amount of tuned mass to be added for the reduction of the shedding-induced response of chimneys / Francesco Ricciardelli // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* – 2001. – 89. – P. 1539–1551.
144. Grünthal, G. (ed) European Macroseismic Scale. EMS-98. - ESC, Luxemburg, 1998. - 101 p.
145. Gupta, A. K. A Simple Method of Combining Modal Responses / A. K. Gupta, D. C. Chen // *Proc., 7 Int. Conf. Struct. Mech. In Reactor Technol, Chicago, 1983.* - Paper No. K3/10
146. Igusta, T. Modal decomposition method for stationary response of non-classically damped systems / T. Igusta, A. Kiureghian., C.A. Sackman // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. – 1984. – Vol. 12. – P. 121-136.
147. Inaude, J. A. A friction mass damper for vibration control / J.A. Inaude, J.M.Kelly // Report No UCB/EERC 92/15. by. Earthquake Engineering Research Center. University of California. Berkley. California, 1992. - 62 p.
148. Jonson, G.R. Short duration Analytic Earthquake / G.R. Jonson, H.R. Epstein // *Proc. of the ASCE*. – 1976. – Vol.102. – № ST5. – P.993-1001.

149. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber / J.M. Kelly. – London: Springer-Verl., 1997. – 243 p.
150. Kenneth W. Campbell Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER-NGA Database / Campbell W. Kenneth, Yosef Bozorgnia. // Earthquake Spectra. - 2012. - Vol. 28(2). – P. 457-485.
151. Kiureghian, A. CQC modal combination rule for high-frequency modes / A. Kiureghian, Y. Nakamuro // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1993. – Vol. 22. – P. 943-956.
152. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) : Decreto ministeriale 17 gennaio 2018. – Roma : Poligrafico e Zecca Dello Stato S.p.A., 2018. – 368 p.
153. Makino, A. Seismic vibration control of a high-rise r.c. building by a large tuned mass damper utilizing whole weight of the top floor / A. Makino, J. Imamiya, N. Sahashi // The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China, 2008. – Paper No. 02-003.
154. Marianieta, Gutierrez Soto Tuned Mass Dampers / Marianieta Gutierrez Soto, Hojjat Adeli // Archives of Computational Methods in Engineering - 2013. – Vol. 20. – Issue 4. – P. 419–431.
155. Marianieta, Gutierrez Soto Optimum tuning parameters of tuned mass dampers for vibration control of irregular highrise building structures / Marianieta Gutierrez Soto, Hojjat Adeli // Journal Of Civil Engineering And Management. – 2014. – Vol. 20(5). – P. 609–620.
156. Mazzolani, F. M. Most recent developments and applications of seismic isolation of civil buildings in Italy / F. M. Mazzolani, G. Serino // Isolation, energy dissipation and control of vibrations of structures. Proceedings of the International Post-SMiRT Conference Seminar Capri (Napoli), Italy, august 23 to 25, 1993. - P. 71-110.
157. Melkumyan, M. G. New Solutions in Seismic Isolation / M. G. Melkumyan. - Yerevan: LUSABATS, 2011. - 264 p.
158. Nesterova, O.P. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability / O. P. Nesterova, A. M. Uzdin, N. V. Nikonova, M. Yu. Fedorova, K. V. Vorobyova // Materials Physics and Mechanics. - 2016. - 26 - P.57-60.

159. Omori, F. Seismic Experiments on the Fracturing and Overturning of Columns / F. Omori // Tokyo : Publ. Earthquake Invest. Comm. in foreign Languages, 1900. - № 4.
160. Park, R. Reinforced Concrete Structures / R. Park, T. Paulay. - New York : John Wiley & Sons, 1975. – 769 p.
161. Patil, S. S. Effectiveness of Multiple Tuned Mass Dampers / S. S. Patil, S. B. Javheri, C. G. Konapure // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2012. – Vol. 1. - Issue 6 .- P. 78-83.
162. Renault, J. Premiere application des appuis antiseismiques a friction, la centrale nucleaire de Kolberg / J. Renault, M. Richle, B. Pavot // Annales de l'institut technique du batiment et des travaux publics, 1979. – №371. – 74 p.
163. Reza RoshanMehr Investigation of tuned mass damper efficiency in controlling nonlinear behavior of structure models subjected to near fault earthquakes / Reza RoshanMehr // International Journal of Engineering and Technology (IJET). – 2018. - Vol 10. - No 4. – P. 1018-1037
164. Riddell, R. Response modification factor for earthquake resistant design of short period buildings / R. Riddell, P. Hidalgo, E. Cruz // Earthquake Spectra. – 1989. - Vol.5. - No.3. - P. 571-590.
165. Shamja, P. P1. Vibration Control of High -Rise Reinforced Concrete Building Due To Seismic Excitations by Using Tuned Mass Damper / P. P1. Shamja, V.N. Krishnachandran // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2018. – Vol. 5. - Issue 4. – P. 4406-4409.
166. Shayeghi, A. Application of PSO Technique for Seismic Control of Tall Building / A. Shayeghi, H. Shayeghi , H. Eimani Kalasar // International Journal of Intelligent Systems and Technologies. – 2009. – Vol. 4. – Issue 1. – P. 28-35.
167. Skiner, R.I. An introduction to seismic isolation / R.I. Skiner, W.H. Robinson, G.H. McVerry. – New Zealand: John Wiley & Sons, 1993. – 353 p.
168. Soroka, W. W. Notes on the relations between Viscous and Structural Damping Coefficients / W. W. Soroka // Journal of the Aeronautical Sciences. – 1949. - Vol. 16. - P. 409-410.

169. Uzdin, A. M. Why the overdamped isolation is better than the underdamped one / A. M. Uzdin, G. V. Davidova // 10-th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey. – 2007. – CD – Paper No GA15.
170. Uzdin, A. M., Dmitrovskaya L. N. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales / A. M. Uzdin, L. N. Dmitrovskaya // First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology Geneva, Switzerland, 3-8 September, 2006. - Paper No 32.
171. Warburton, G. V. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters / G. V. Warburton // Earthquake engineering and structure dynamics. – 1982. -Vol. 10. - № 3. - P. 381-401.
172. Watts, P. On a method of reducing the rolling of ships at sea / P. Watts // Transactions of the Institution of Naval Architects. – 1883. – Vol. 24. – P. 65-90.
173. Yusuke Hori. Development of Large Tuned Mass Damper with Stroke Control System for Seismic Upgrading of Existing High-Rise Building / Yusuke Hori, Haruhiko Kurino, and Yasushi Kurokawa // International Journal of High-Rise Buildings. – 2016. – Vol. 5. - No 3. – P. 167-176.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1



Дальневосточный проектный институт «Востокпроектверфь»
 ООО ДПИ «Востокпроектверфь» 690091 г. Владивосток, ул. Светланская, д. 72
Far Eastern Design Institute "Vostokproektverf"
 FEDI "Vostokproektverf" LLC 72 Svetlanskaya St., Vladivostok, 690091
 Tel. +7 423 230 23 27 E-mail: vpv@vpv.su

**Акт о внедрении
 результатов диссертационной работы Нестеровой О.П. на тему
 «Подбор параметров и оценка эффективности динамических гасителей колебаний (ДГК) сильно демпфированных систем»**

Автор: Нестерова Ольга Павловна

Научный руководитель: д.т.н., проф. Уздин Александр Моисеевич

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Подбор параметров и оценка эффективности динамических гасителей колебаний (ДГК) сильно демпфированных систем» Нестеровой О.П. использованы в ООО «Дальневосточный проектный институт «Востокпроектверфь» при разработке проекта «Реконструкция и техническое перевооружение АО «СВРЦ» для обеспечения ремонта (сервисного обслуживания) кораблей (судов) Камчатского региона» для подбора параметров динамических гасителей колебаний для сейсмозащиты причалов в г. Вилючинск.

Использование предлагаемых О.П. Нестеровой решений позволяет обеспечить безопасность ценного оборудования на причалах при землетрясениях силой 9 баллов и приемлемые затраты на антисейсмическое усиление причального сооружения.

Технический директор

К.А. Жуков



192171, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, дом 36, к. 1, лит. В, ИНН/КПП 7811300512/781101001, Расчетный счет 40702810748000001895 в ПАО «Банк «Санкт-Петербург»; корр. сч. №30101810900000000790; БИК 044030790. ОКВЭД 28.11; 28.51; 25.23; 51.70 ОКПО 73336203; тел./факс (812)-560-71-69, E-mail: info@sc-5.ru <http://www.stroycomplex-5.ru>

СК СТРОЙКОМПЛЕКС-5
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

№078/17-07-М/01 «28» апреля 2017 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «СК Стройкомплекс-5»



С.А. Шульман

«28» апреля 2017 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Нестеровой О. П. на тему
«Подбор параметров и оценка эффективности динамических гасителей колебаний (ДГК) сильно демпфированных систем»

Автор: Нестерова Ольга Павловна

Научный руководитель: д.т.н., проф. Уздин Александр Моисеевич

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Подбор параметров и оценка эффективности динамических гасителей колебаний (ДГК) сильно демпфированных систем» Нестеровой О. П. использованы в ООО «Стройкомплекс-5» при разработке технических решений сейсмозащиты мечети в г. Махачкала.

Использование предлагаемых О. П. Нестеровой решений позволяет обеспечить безопасность посетителей мечети при землетрясениях силой 9 баллов и приемлемые затраты на антисейсмическое усиление мечети.

Дата внедрения: 28.04.2017

Главный инженер

А.И. Муромов