

На правах рукописи



Гербер Юрий Андреевич

**НАДЕЖНОСТЬ ЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМЫХ СТЕРЖНЕВЫХ
СИСТЕМ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ**

2.1.9. Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» (ФГБОУ ВО «НГАСУ (Сибстрин)»)

Научный руководитель: **Себешев Владимир Григорьевич,**
кандидат технических наук, профессор, поч.
чл. РААСН, профессор кафедры строительной
механики ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)»

Официальные опоненты: **Шеин Александр Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Механика»
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства»

Нестерова Ольга Павловна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
строительной механики ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный архитектурно
-строительный университет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», г. Воронеж**

Защита состоится «3» марта 2023 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.414.01 при ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 2, ауд. 303.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, а также на сайте <http://www.tsuab.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Инженерные системы, в том числе строительные конструкции, здания и сооружения, могут испытывать различные динамические воздействия техногенного и природного характера, в частности, вибрационные (гармонического типа) – от установленного технологического оборудования, движения транспорта, а также циклические аэродинамические и гидравлические волновые нагрузки. Улучшение динамического состояния объекта возможно за счет применения различных приемов и технических решений. Значительное развитие получили теория и практика снижения вибрации за счет специальных устройств, встраиваемых в защищаемый объект, – гасителей колебаний, являющихся, по сути, регуляторами динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) системы. Применение динамических гасителей колебаний (ДГК) в практике строительства зданий и сооружений для борьбы с колебаниями в системе является эффективным средством гашения вибраций. Вместе с тем, возможно существенное увеличение значений амплитуд параметров НДС защищаемой конструкции и снижение ее надежности из-за случайных отклонений фактически реализуемых расчетных параметров системы, нагрузки и самого гасителя от проектных значений, вследствие их стохастической природы. В связи с этим проблема расчета надежности или вероятности отказа для строительных систем (сооружений и конструкций) с применением динамических гасителей колебаний является актуальной.

На данный момент проблема определения надежности сооружений сохраняет свою актуальность. Проф. В.Д. Райзер в монографии «Теория надежности в строительном проектировании» за 1998 г. писал, что к тому времени «Сложившуюся ситуацию в нормировании правил расчета строительных конструкций можно охарактеризовать следующим образом – проектировщик почти ничего не знает о том, насколько успешно он выполнил свою главную задачу – проектное обеспечение нормального функционирования конструкции». Это особенно важно для безопасного функционирования систем, в которых из-за случайных отклонений параметров от расчетных значений может произойти существенное ухудшение напряженно-деформированного состояния объекта. Это в полной мере относится к задачам динамики сооружений.

Создание алгоритмов расчета на надежность систем с ДГК позволит определять надежность системы и допустимые отклонения расчетных величин от их проектных значений, уменьшить материалоемкость при проектировании строительных объектов, прогнозировать долговечность конструкций, принимать технически обоснованные решения для обеспечения требуемой надежности.

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в теорию надежности, а также в разработку процедур нормирования и ранжирования расчетных параметров сооружений и конструкций на основе вероятностных методов внесли Б.И. Беляев, В.В. Болотин, Ю.А. Веселов, Г.А. Гениев, А.Я. Дривинг, Л.И. Иосилевский, В.А. Клевцов, Ю.В. Краснощеков, М.Б. Краковский, А.П. Кудзис, А.И. Лантух-Лященко, О.В. Лужин, А.С. Лычев, О.В. Мкртычев, А.В. Перельмутер, Ю.М. Почтман, А.П. Пшеничкин, В.А. Пшеничкина,

В.Д. Райзер, А.Р. Ржаницын, В.Г. Себешев, Н.Н. Складнев, Б.И. Снаркис, Н.С. Стрелецкий, К.Э. Таль, С.А. Тимашев, Н.Ф. Хоциалов, В.П. Чирков, Я.Б. Шор, G. Augusti, A. Baratta, M. Castanheta, C.A. Cornell, O. Ditlevsen, B.R. Ellingwood, J. Ferry-Borges, A.M. Freudenthal, M.H. Faber, A.M. Hasofer, A.I. Johnson, F. Kashmata, K.C. Kapur, L.R. Lamberson, M. Mayer, R. Rackwitz, J. Schneider, G. Spaethe, J.D. Sørensen, D. Venziano, T. Vrouwenvelder.

Гасители колебаний заняли свою нишу в инженерной практике и применяются в различных конструкциях, как правило, в высотных и большепролетных зданиях и сооружениях. Особенностью применения гасителей колебаний является возможность существенно изменять амплитудно-частотные характеристики защищаемого объекта и, как следствие, его НДС при частотах динамических воздействий в области частоты настройки гасителя, не изменяя конструкцию. В развитие теории динамического гашения колебаний основной вклад внесли А.М. Алексеев, И.В. Ананьев, Ю.А. Гопп, А.В. Дукарт, С.В. Елисеев, В.В. Карамышкин, Б.Г. Коренев, Н.А. Пикулев, Г.П. Нерубенко, А.И. Олейник, Б.В. Остроумов, Л.М. Резников, А.К. Сборовский, С.П. Тимошенко, А.М. Уздин, Г.М. Фишман, А.И. Шеин, J.E. Brock, J.P. Den-Garthog, F.M. Lewis, F.E. Reed, J.C. Snowdon, G.V. Warburton.

В целом в настоящее время можно констатировать наличие больших достижений как в области теории надежности и вероятностных методов расчета строительных конструкций, так и в вопросах борьбы с вибрациями в конструкциях с помощью гасителей колебаний. Но исследований надежности систем с динамическими гасителями колебаний недостаточно. Это направление требует развития – и в теоретическом плане, и для практической реализации результатов.

Цель работы – создание методики расчета надежности и долговечности по различным критериям безотказности стержневых систем с динамическими гасителями колебаний при гармонических воздействиях.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих методов вероятностных расчетов и теории надежности, с целью оценки возможности их использования для расчета надежности систем с конечным числом степеней свободы, защищенных от гармонических воздействий динамическими гасителями колебаний.

2. Разработать метод расчета параметров комплекса одномассовых динамических гасителей колебаний на основе решения задачи регулирования динамического НДС систем с ДГК, с определением оптимальных по надежности параметров гасителей.

3. Получить характеристики вероятностных свойств параметров НДС динамически нагруженных систем и численные оценки вероятности отказа и надежности по различным критериям безотказности для модельных задач – на примерах систем различных типов. Обосновать использование упрощенных обобщенных моделей для расчета надежности систем с гасителями колебаний.

4. Оценить влияние стохастической изменчивости параметров воздействий, защищаемых систем и динамических гасителей колебаний на надежность при гармонических нагрузках. Разработать расчетный аппарат и алгоритм определения долговечности конструкций с ДГК.

5. Выявить особенности расчетов надежности инженерных систем со сгущенным спектром собственных частот, защищенных динамическими гасителями колебаний. Рассмотреть возможность использования современных программных комплексов в вероятностных расчетах динамически деформируемых систем с ДГК.

Объект исследования – стержневые линейно деформируемые системы с конечным числом степеней свободы и динамическими гасителями колебаний.

Предмет исследования – вероятностные свойства параметров НДС и надежность динамически нагруженных линейно деформируемых систем с динамическими гасителями колебаний.

Методы исследования. Для решения задач расчета надежности линейно деформируемых систем с гасителями колебаний при динамических нагрузках используются аналитические и численные вероятностные методы определения стохастических параметров их НДС, понятийный аппарат и методы теории надежности инженерных систем в приложении к проблеме динамического гашения колебаний несущих строительных конструкций, методы и расчетный аппарат строительной механики дискретных (стержневых) систем, понятия, принципы и методы теории динамического гашения колебаний, понятийный аппарат и методы теории регулирования, теория оптимального проектирования конструкций.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод определения жесткостных и инерционных характеристик гасителей, обеспечивающих выполнение исходных требований к параметрам динамического НДС систем с конечным числом степеней свободы, защищаемых от вибрации при гармонических воздействиях группами из нескольких ДГК. Решение получено в аналитической форме в виде зависимостей между массами и жесткостями гасителей, удовлетворяющими заданным условиям регулирования.

2. Выявлены особенности и трансформации плотности вероятности динамического коэффициента для модельных систем с одной степенью свободы с учетом и без учета демпфирования, в зависимости от частоты гармонического воздействия и характеристик стохастических свойств расчетных параметров системы и воздействий. Получены оценки влияния уточненных вероятностных характеристик динамического коэффициента на надежность.

3. Осуществлено ранжирование случайных расчетных параметров защищаемой системы, воздействий и гасителей по их влиянию на показатели надежности. Установлено, что наиболее значимыми являются частота воздействия, масса и жесткость гасителя.

4. Получено решение задачи определения надежности и долговечности стержневых систем с конечным числом степеней свободы и одномассовыми динамическими гасителями колебаний при длительных гармонических воздействиях по критерию усталостной прочности материала и другим значимым условиям безотказности. Выявлен характер зависимости вероятности отказа от частоты внешнего воздействия или количества циклов нагружения.

Теоретическая и практическая значимость работы. В развитие теории динамического гашения колебаний разработан метод определения расчетных, в том числе оптимальных, параметров ДГК для систем, защищенных комплексами одномассовых ДГК, посредством которых осуществляется регулирование дина-

мического НДС системы. Разработан расчетный аппарат и алгоритмы расчета надежности и долговечности по различным условиям работоспособности. Показано влияние сильной нелинейности параметров АЧХ на показатели надежности гармонически нагруженных систем. Дана оценка чувствительности надежности к случайным отклонениям расчетных параметров для систем с ДГК.

Результаты научного исследования рекомендуются для определения надежности и долговечности при расчете и проектировании конструкций зданий и сооружений, защищаемых от вибрационных воздействий динамическими гасителями колебаний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения параметров комплекса ДГК для системы, защищенной от вибрации с помощью группы одномассовых динамических гасителей колебаний, позволяющий осуществлять требуемое регулирование динамического НДС системы.

2. Разработанный математический аппарат, алгоритмы и результаты расчетов надежности и долговечности по различным критериям безотказности гармонически нагруженных стержневых систем с динамическими гасителями колебаний.

3. Вероятностные динамические расчеты систем с конечным числом степеней свободы с использованием обобщенной модели с одной степенью свободы и характеристиками, полученными по различным комбинациям условий эквивалентности.

4. Сравнительные оценки результатов теоретических решений и их компьютерной реализации с использованием современных программных комплексов для модельных задач вероятностных расчетов стержневых систем с динамическими гасителями колебаний при гармонических воздействиях.

Степень достоверности результатов обеспечена корректным использованием общепринятых теорий и методов расчета, применением верифицированных и лицензированных программных продуктов, сопоставлением результатов численных и аналитических решений, полученных разными методами для модельных задач с системами разных типов, а также с результатами других авторов.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 3-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2014); на Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана» (Усть-Каменогорск, 2015); на Всероссийской НТК «Актуальные вопросы строительства» (Новосибирск, 2015, 2016); на I Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию д.т.н. профессора О.В. Кунцевича, «Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века» (Санкт-Петербург, 2016); на Международной НТК «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Новосибирск, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022); на VII международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering - APCSCE 2018)» (Новосибирск, 2018); на V международной конференции «Про-

блемы безопасности критичных инфраструктур (Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures)» (Екатеринбург, 2019); на международной научной конференции «Моделирование и методы расчета строительных конструкций» (The International Conference «Modelling and Methods of Structural Analysis» MMSA-2019) (Москва 2019).

Внедрение результатов работы. Полученные результаты (метод, методики, алгоритмы расчета и данные расчетов) используются в проектных организациях ООО «НО ЦНИИПРОЕКТЛЕГКОНСТРУКЦИЯ», ООО «Техпром-Инжиниринг» и в учебном процессе НГАСУ (Сибстрин) при подготовке студентов, обучающихся по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, и 3 статьи в изданиях, индексируемых международной базой данных Scopus.

Личный вклад автора состоит в анализе состояния проблемы, постановке задач исследования, выводе аналитических зависимостей, получении результатов численных и аналитических решений и их анализе, формулировке основных выводов диссертационного исследования, подготовке публикаций с основными результатами исследования совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации: 181 страница, в т.ч. 15 таблиц, 83 рисунка, 2 приложения и список литературы из 203 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, обозначены объект и предмет исследования, определена цель исследования и сформулированы основные задачи, указаны практическая и теоретическая значимость работы, научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, дается краткая характеристика работы.

Первая глава *«Проблема оценки надежности динамически нагруженных строительных конструкций, защищенных гасителями колебаний».*

Выполнен обзор литературных источников, отражающих основные этапы развития и современное состояние теории надежности строительных конструкций в нашей стране и за рубежом.

Обозначены основные этапы и направления развития теории динамического гашения колебаний. Гасителям колебаний как эффективному средству борьбы с вибрациями посвящено достаточно много исследований и научно-технических публикаций, нашедших свое отражение в справочниках, специальных пособиях и в современных нормативных документах.

Рассмотрены основные методы и алгоритмы решения задач теории надежности, приведены основные расчетные зависимости и формулы. Расчеты надежности основаны на общепризнанной концепции А.Р. Ржаницына, согласно которой вводится обобщенная характеристика – резерв прочности S по некоторому критерию или условию безотказности:

$$S = R - Q, \quad (1)$$

где R – обобщенная прочность (сопротивление – resistance); Q – обобщенная нагрузка (иначе – нагрузочный фактор, нагрузочный эффект – load factor, load effect).

В общем виде условие безотказности записывается как $Q_j < R_j$ или $S_j = R_j - Q_j > 0$, где j – номер условия. Под обобщенной нагрузкой и обобщенной прочностью, в зависимости от выбранного критерия безотказности, могут пониматься различные, как правило, случайные величины, определенные путем вероятностного расчета, или величины детерминированные.

Надежность в понимании вероятности отсутствия отказа определяется как

$$P_s = 1 - P_f, \quad (2)$$

где $P_f = \int_{-\infty}^0 p_s(S) dS$ – вероятность отказа по принятому критерию; $p_s(S)$ – плотность распределения вероятностей резерва прочности.

В работе отражены принципы формирования и ранжирования системы критериев безотказности с учетом исключения из рассмотрения заведомо несущественных рисков для строительных конструкций.

Вторая глава «Основные положения, методики и алгоритмы расчета надежности стержневых систем с конечным числом степеней свободы и динамическими гасителями колебаний».

Сформулированы критерии безотказности для динамически нагруженным систем с гасителями колебаний при оценке надежности:

- для гасителя: ограничения перемещения массы ДГК; максимальных усилий (или напряжений) в ДГК (зависит от типа ДГК и его инженерной реализации);
- для системы: ограничения перемещений характерных точек системы (мест крепления гасителей колебаний, точек с максимальными перемещениями и др.), усилий (M , N , Q) в характерных сечениях элементов системы, напряжений по условию усталостной прочности материала, динамических коэффициентов (ДК) по различным параметрам системы.

Для динамически нагруженной системы с одной степенью свободы, нагруженной гармонической сосредоточенной нагрузкой (рисунок 1), были оценены вероятностные свойства ДК (математическое ожидание (МО) $\bar{x}$ и стандарт $\hat{x}$) в области собственной частоты, характеризующейся большими градиентами амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Использовалось аналитическое (точное) решение и приближенные методы – статистической линеаризации (МСЛ) и статистических испытаний (МСИ).

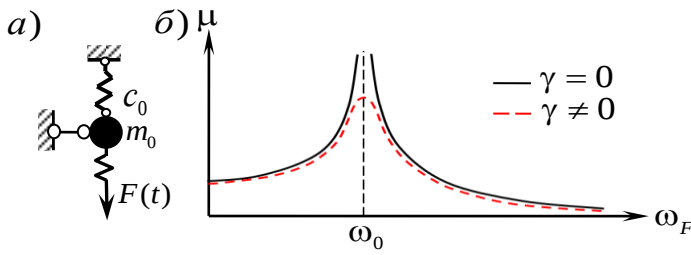


Рисунок 1 – Расчетная модель динамической системы (а) и график ее АЧХ (б)

Выражение ДК для системы с одной степенью свободы (рисунок 1, а) при установившихся вынужденных колебаниях от гармонической нагрузки с учетом демпфирования имеет следующий вид:

$$\mu = \left[\sqrt{(1 - k_{\omega}^2)^2 + (\gamma k_{\omega})^2} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $k_{\omega} = \omega_F / \omega_0$; ω_F – рабочая частота нагрузки; ω_0 – собственная частота системы; γ – коэффициент демпфирования (неупругого сопротивления).

Если считать γ условно детерминированным, то ДК будет являться функцией одной случайной переменной k_{ω} . Аналитическим решением были определены виды плотности распределения ДК при разных γ и k_{ω} и фиксированных коэффициентах вариации частот $A_{\omega_0} = 0,01$, $A_{\omega_F} = 0,01$ (рисунок 2).

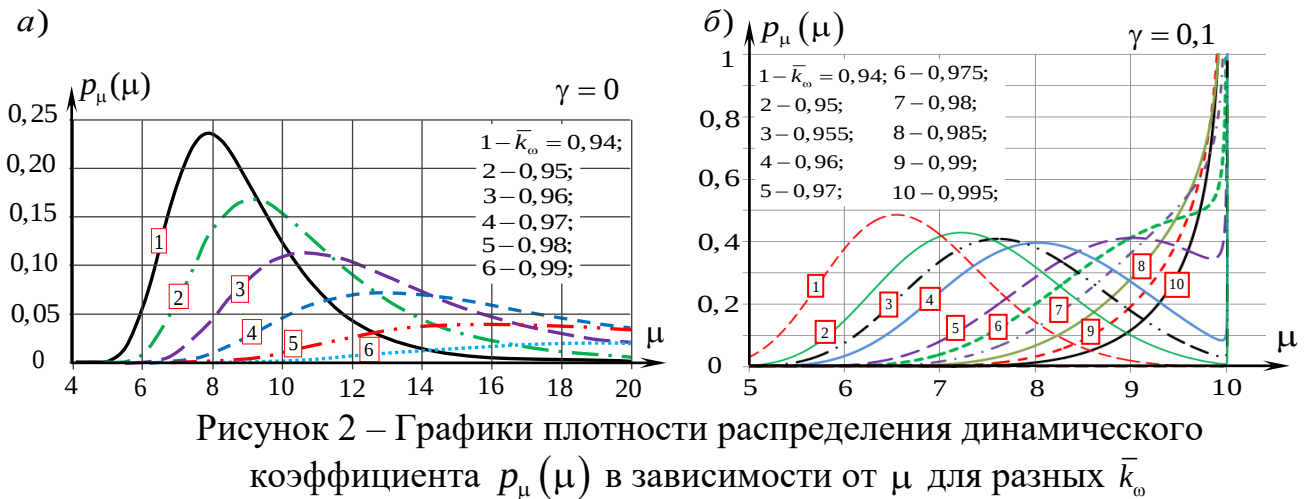


Рисунок 2 – Графики плотности распределения динамического коэффициента $p_{\mu}(\mu)$ в зависимости от μ для разных $\bar{k}_{\omega}$

Обнаружены принципиальные качественные и количественные трансформации кривых распределения ДК по мере приближения рабочей частоты вынуждающего воздействия к собственной частоте системы.

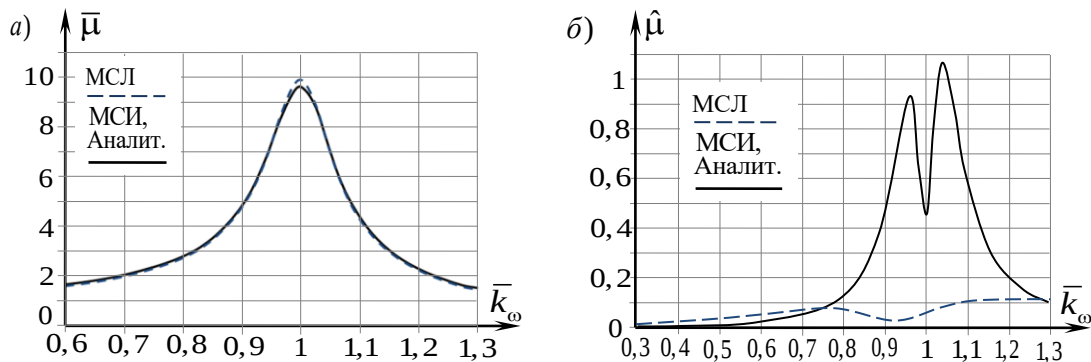


Рисунок 3 – Графики вероятностных характеристик

ДК с учетом демпфирования а) математическое ожидание; б) стандарт

Сравнение значений стохастических характеристик ДК, вычисленных по точным аналитическим выражениям и приближенными методами (рисунок 3), показало, что применение общепринятого в вероятностных расчетах МСЛ для опре-

деления дисперсии или стандарта ДК в резонансной частотной области дает большие погрешности в области резонанса. Однако МСЛ может использоваться для качественного приближенного описания вероятности отказа в предварительных расчетах. В свою очередь МСИ дает качественно и количественно верные результаты.

Оценка надежности выполнена согласно концепции проф. А.Р. Ржаницына. По ограничению для ДК в виде условия $\mu < [\mu]$ при $\gamma = 0,1$ получены графики зависимости вероятности отказа от $\bar{k}_\omega$ (рисунок 4).

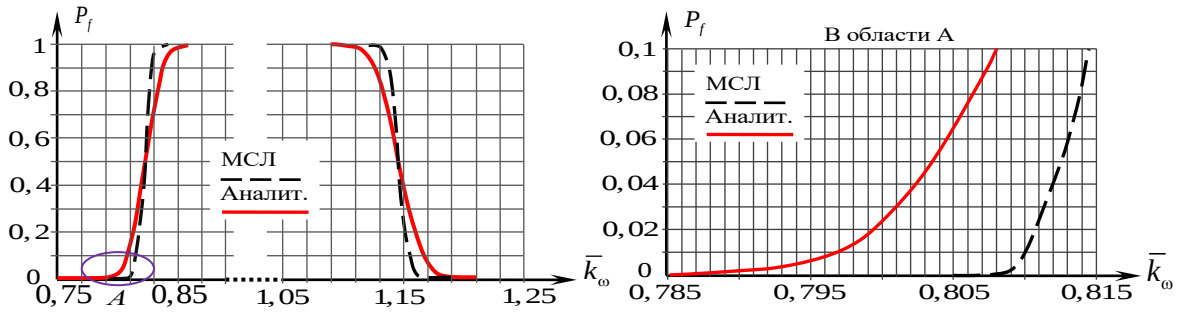


Рисунок 4 – График зависимости вероятности отказа P_f от $\bar{k}_\omega$ при $\gamma = 0,1$

Анализ графиков вероятности отказа для модельной системы с учетом демпфирования указывает на существенное влияние нелинейности АЧХ на показатели надежности гармонически нагруженных систем в рабочих режимах с частотами, приближающимися к резонансным.

Выполнены расчеты надежности плоских стержневых гармонически нагруженных систем (рам, балок) с одномассовыми гасителями колебаний по различным условиям безотказности.

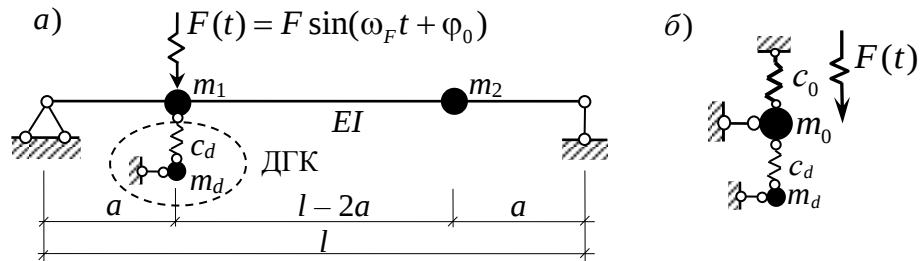


Рисунок 5 – Расчетная схема системы с ДГК (а); обобщенная модель с ДГК (б)

Для системы, показанной на рисунке 5, а, использовались условия ограничения динамического коэффициента по изгибающему моменту в месте крепления гасителя

$$\mu_{dyn} < [\mu_{dyn}] \quad (4)$$

и по усталостной прочности материала

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 < 1, \quad (5)$$

где σ_a – амплитуда цикла, получаемая из динамического расчета; σ_m – среднее напряжение цикла; σ_{-1} – предел выносливости материала; σ_u – предел прочности материала.

Количественные результаты расчета надежности в виде значений вероятности

сти отказа незащищенной (P_f^0) и защищенной (P_f) систем в зависимости от МО коэффициента частоты рабочей нагрузки, по вышеуказанным критериям, представленные графически на рисунке 6, получены при следующих вероятностных характеристиках основных расчетных параметров: $\bar{a} = 0,25\bar{l}$; $\bar{\omega}_F = 0,8\bar{\omega}_0$; $\bar{m}_1 = \bar{m}_2$; $\bar{m}_d = k_{md} \bar{m}_1$ ($k_{md} = 0,02$); $\bar{c}_d = \bar{\omega}_F^2 \bar{m}_d$; коэффициенты вариации – $A_m = 0,06$; $A_{md} = 0,04$; $A_{cd} = 0,02$; $A_{\omega_F} = 0,01$; $A_l = A_a = 0,001$; $A_{EI} = 0,02$. Демпфирование в системе и гасителе не учитывалось.

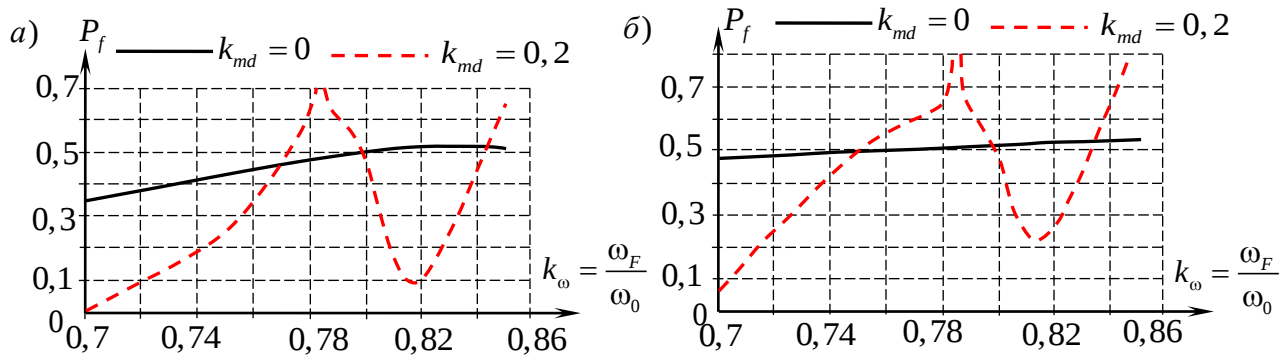


Рисунок 6 – Графики изменения вероятности отказа в зависимости от коэффициента рабочей частоты а) по условию (4); б) по условию (5)

Независимо от выбранного критерия безотказности, вероятность отказа незащищенной системы существенно увеличивается при приближении рабочей частоты нагрузки к частоте собственных колебаний, причем нарастание вероятности отказа происходит значительно быстрее роста МО динамического коэффициента. Графики вероятности отказа по различным критериям имеют качественно сходное очертание. Без учета демпфирования в гасителе и конструкции ДГК оказывает положительное влияние на надежность системы в достаточно узком диапазоне частот. Несмотря на то, что в детерминированной постановке применение гасителя (с заданными параметрами) позволяет полностью исключить вибрации в системе, уровень вероятности отказа, согласно графикам (рисунок 6) является недопустимым. Необходимо осуществлять подбор параметров гасителя с учетом вероятностных свойств системы, воздействия и самого гасителя.

Определение параметров ДГК (массы и жесткости), удовлетворяющих требуемому уровню надежности по принятым критериям безотказности, как правило, является итерационным процессом, требующим перерасчетов с использованием уравнений динамики. Чтобы избежать вычислительных проблем для сложных многоэлементных систем, целесообразным является предварительное определение параметров ДГК с учетом вероятностных свойств системы, гасителя и воздействия. Рациональный подход состоит в приведении исходной динамической системы к расчетной модели с меньшим числом степеней свободы и расчетных параметров, различными методами преобразований с учетом выбранных критериев.

Получены аналитические выражения для приведения исходной динамической системы с произвольным числом степеней свободы и одиночной гармонической нагрузкой к расчетной модели с одной степенью свободы (рисунок 1, а) с использованием различных комбинаций условий эквивалентности, а именно:

1) равенство некоторой собственной резонансной частоты ω_j исходной системы (близкой к ω_F) и резонансной частоты обобщенной модели ω_0 ;

2) равенство перемещения в точке приложения сосредоточенной вибронной нагрузки $F(t)$ в исходной системе ($y_{i(F)}$) и перемещения массы обобщенной модели (y_0);

3) равенство максимальных кинетических энергий исходной (T) и обобщенной (T_0) моделей.

Используя условия равенства частот и равенства перемещений, получаем выражения для определения параметров обобщенной модели, массы

$$m_{0(\omega,y)} = m_{0(\omega)} \cdot k_F, \quad (6)$$

где $m_{0(\omega,y)}$ – приведенная масса из условия равенства частот и равенства перемещения в точке приложения нагрузки исходной и расчетной модели;

$m_{0(\omega)} = \frac{1}{\delta_{ii}} \sum_{k=1}^n m_k \delta_{ik} \beta_{yk}$ – приведенная масса из условия равенства частот исходной

и расчетной моделей; $k_F = (1 - k_\omega^2 \cdot k_\beta) \cdot (1 - k_\omega^2)^{-1}$ – поправочный коэффициент,

учитывающий равенство перемещений; $k_\beta = \sum_{k=1}^n a_{m_k} \beta_{\delta_k} \beta_{y_k(F)} \cdot \left(\sum_{k=1}^n a_{m_k} \beta_{\delta_k} \beta_{y_k} \right)^{-1}$;

$k_\omega = \frac{\omega_F}{\omega_0}$; $\beta_{\delta_k} = \frac{1}{\delta_{ii}} \begin{bmatrix} \delta_{11} \dots \delta_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ \delta_{n1} \dots \delta_{nn} \end{bmatrix}$ – матрица относительных единичных перемещений;

$a_{m_k} = m_i^{-1} \{m_1 m_2 \dots m_n\}$ – вектор относительных масс.

Для приведенной жесткости имеем:

$$c_{0(\omega,y)} = c_{0(\omega)} \cdot k_F, \quad (7)$$

где $c_{0(\omega,y)}$ – приведенная жесткость из условия равенства частот и перемещения в точке приложения нагрузки исходной и расчетной модели; $c_{0(\omega)} = \delta_{ii}^{-1}$ – приведенная жесткость из условия равенства частот исходной и расчетной модели.

Используя условия равенства собственных частот и максимальных кинетических энергий соответственно получаем

$$m_{0(\omega,T)} = \left\{ \left[\sum_{j=1}^n \frac{m_j \delta_{ji}^2}{\left(\sum_{k=1}^n \delta_{ik} m_k \beta_{y_k} - k_{\omega F}^2 \sum_{k=1}^n \delta_{jk} m_k \beta_{y_k(F)}^{(j)} \right)^2} \right] \cdot [1 - k_{\omega F}^2]^2 \right\}^{-1}; \quad (8)$$

$$c_{0(\omega,T)} = \left\{ \left[\sum_{j=1}^n \frac{m_j \delta_{ji}^2}{\left(\sum_{k=1}^n \delta_{ik} m_k \beta_{y_k} - k_{\omega F}^2 \sum_{k=1}^n \delta_{jk} m_k \beta_{y_k(F)}^{(j)} \right)^2} \right] \cdot \left[\sum_{k=1}^n \delta_{ik} m_k \beta_{y_k} \right] [1 - k_{\omega F}^2]^2 \right\}^{-1}, \quad (9)$$

где j – номер массы системы ($j = 1, \dots, n$); i – номер массы в месте приложения сосредоточенной нагрузки; $\beta_{yk(F)}^{(j)} = y_k / y_j$ – ($k = 1, 2, \dots, n$) – элементы вектора относительных перемещений при вынужденных колебаниях с частотой ω_F , верхний индекс (j) указывает на соотношение элементов вектора; $C_{0(\omega, T)}$ – обобщенная жесткость расчетной модели из условий равенства частоты и кинетической энергии.

Обобщенная модель, подобранная по (6), (7) или (8), (9) при расчетных значениях параметров, полностью удовлетворяет предъявляемым условиям, а при отклонении в зоне рабочей частоты имеет незначительные погрешности по сравнению с исходной моделью. С учетом вероятностных свойств исходной системы, по предлагаемым формулам определяются характеристики вероятностных свойств обобщенной модели для дальнейших расчетов.

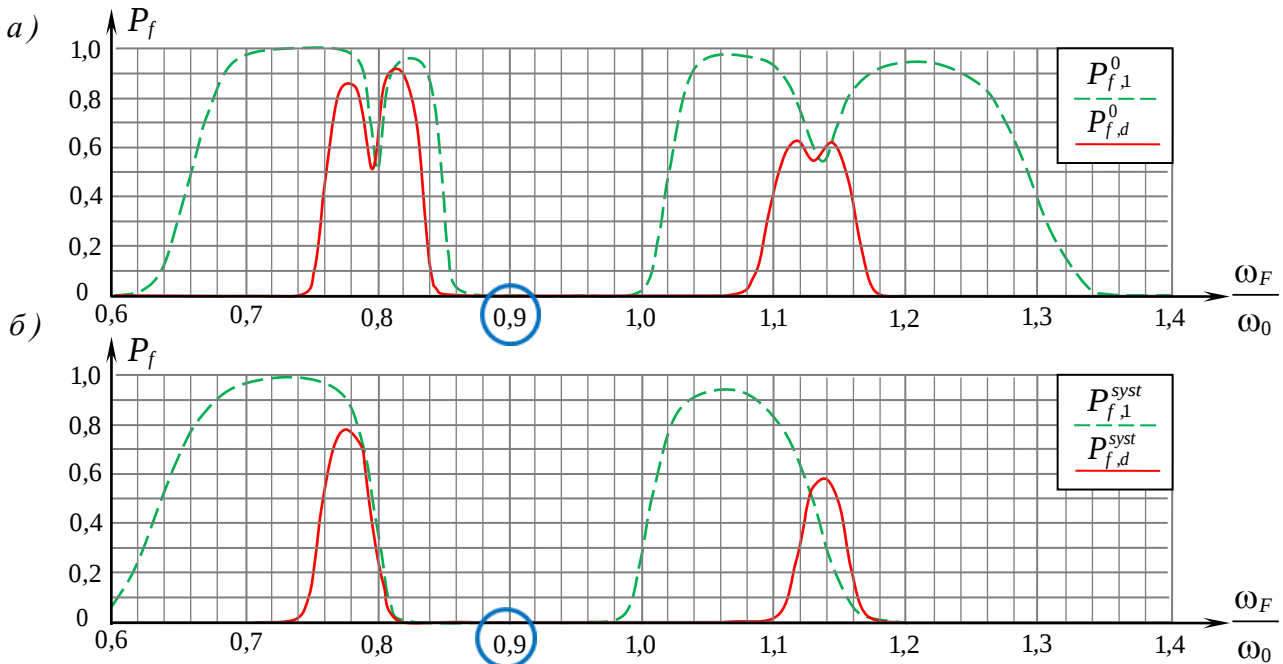


Рисунок 7 – График зависимости вероятности отказа от рабочей частоты (а) – для обобщенной модели с гасителем; (б) – для исходной системы с гасителем

Результаты расчета надежности по критерию ограничения перемещений в месте приложения нагрузки $y_1 < [y_1]$ и массы гасителя $y_d < [y_d]$, для исходной системы (рисунок 5, а) и обобщенной модели (по (6), (7)) с гасителем (рисунок 5, б) показаны на рисунке 7. Графики имеют качественно сходное очертание, но количественно вероятность отказа для обобщенной модели с гасителем больше по всему диапазону. Для частоты, на которую настраивается гаситель ($\omega_F = 0,9\omega_0$), результаты фактически не отличаются.

Предложенный алгоритм с использованием обобщенной модели можно использовать для подбора одномассового ДГК с учетом вероятностных свойств и требуемой надежности, что упрощает процесс подбора гасителя для многоэлементных систем.

На основе анализа литературных источников дана качественная и принципиальная количественная оценка влияния демпфирования в системе и гасителе на надежность системы – учет демпфирования приводит к повышению надежности.

Третья глава «Регулирование динамического напряженно-деформированного состояния и надежности систем с динамическими гасителями колебаний».

В случае, когда динамическое воздействие не является точечным, постановки одного одномассового ДГК может быть недостаточно для того, чтобы существенно снизить уровень перемещений в системе. При постановке нескольких гасителей становится возможным значительное улучшение динамического НДС. При этом актуальной становится задача расчета характеристик каждого гасителя колебаний с учетом свойств системы, нагрузки и других ДГК.

Рассматривается линейно деформируемая система с сосредоточенными массами при установившихся вынужденных колебаниях от гармонических воздействий, произвольных по виду и расположению мест приложения (рисунок 8). Для противодействия вибрации используется комплекс (группа) из n_d одномассовых ДГК с заданной схемой их размещения. Определению подлежат массы и жесткости упругих элементов всех гасителей, обеспечивающие получение требуемых значений характерных, заранее выбранных, параметров НДС системы.

Задача решена с применением теории регулирования. Регулируемыми параметрами в явном виде являются перемещения точек в местах крепления ДГК, а через них – любой из параметров динамического НДС системы. Количество условий регулирования равно числу регуляторов – гасителей колебаний. Конкретное назначение мест установки ДГК зависит от конструктивных особенностей системы и формы ее колебаний при заданной нагрузке. Качественный прогноз влияния гасителей приводит к заключению о целесообразности их установки в местах, где динамические перемещения незащищенной конструкции наибольшие.

Используем уравнения динамического состояния системы с комплексом ДГК в амплитудах инерционных сил, с матрицей динамической податливости, для вынужденных установившихся колебаний

$$[\delta^*] \cdot [J] + [\Delta_F] = 0, \quad (10)$$

где $[\delta^*]$ – матрица динамической податливости системы размером $(n + n_d) \times (n + n_d)$; $[J]$ – вектор амплитуд сил инерции; $[\Delta_F]$ – вектор амплитуд перемещений от заданных воздействий.

Первые n уравнений (10) характеризуют амплитудное состояние самой системы, а последующие n_d уравнений – гасителей.

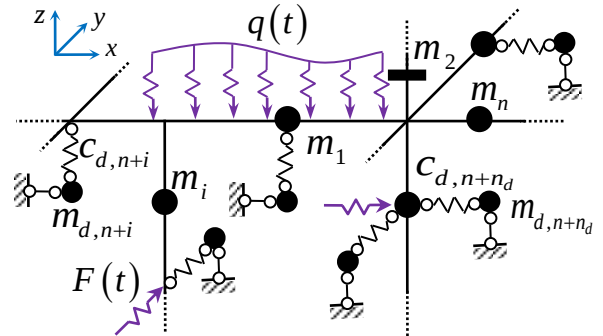


Рисунок 8 – Система с $n+n_d$ степенями свободы

В качестве условий регулирования используем ограничения перемещений:

$$\left[\Delta_{n+n_d+1}^r \dots \Delta_{n+2n_d}^r \right]^T = \left[\langle \Delta_{n+n_d+1}^r \rangle \dots \langle \Delta_{n+2n_d}^r \rangle \right]^T \quad \text{или} \quad \left[\Delta^r \right] = \left[\langle \Delta^r \rangle \right], \quad (11)$$

где Δ_k^r ($k = n + n_d + 1, \dots, n + 2n_d$) – перемещения точек системы в местах креплений ДГК; $\langle \Delta_k^r \rangle$ ($k = n + n_d + 1, \dots, n + 2n_d$) – требуемые (регламентируемые) перемещения в местах крепления динамических гасителей колебаний.

Если $\left[\Delta^r \right]$ выразить через $\left[\delta^r \right]$, $[J]$ и $\left[\Delta_F^r \right]$ из (10), то получим следующую матричную запись уравнений регулирования:

$$\left[\delta^r \right] \cdot \left[J \right] + \left[\Delta_F^r \right] = \left[\langle \Delta^r \rangle \right]. \quad (12)$$

В результате математических преобразований (10) и (12) получено выражение связи между искомыми параметрами для каждого гасителя ($m_{d,n+i}$ и $c_{d,n+i}$):

$$G_{d,n+i} = \frac{1}{c_{d,n+i}} - \frac{1}{m_{d,n+i} \omega_F^2} = \frac{-\sum_{j=1}^{n+i-1} \delta_{n+i,j} |D_j| - \sum_{j=n+i+1}^{n+n_d} \delta_{n+i,j} |D_j| - \Delta_{n+i,F}}{|D_{n+1}|} - \delta_{k+n,n+i}, \quad (13)$$

где n – число степеней свободы незащищенной системы; n_d – число степеней свободы гасителей колебаний; $c_{d,n+i}$ – жесткость гасителя; $m_{d,n+i}$ – масса гасителя; $\delta_{n+i,j}$ – элементы матрицы упругой податливости; где $i = 1, \dots, n_d$; $k = n + n_d + 1, \dots, n + 2n_d$, k – номер точки крепления i -го гасителя; $|D_j|$ – определитель матрицы коэффициентов при основных неизвестных в уравнениях регулирования j -м столбцом, замененным на вектор свободных членов.

В матричной форме уравнения динамического состояния системы с комплексом ДГК в амплитудах перемещений, с матрицей динамической жесткости, для вынужденных установившихся колебаний записывается как

$$\left[r^* \right] \cdot \left[Z \right] + \left[R_F \right] = 0, \quad (14)$$

где $[Z]$ – вектор амплитуд динамических перемещений расчетных точек системы (в том числе в местах расположения масс) и масс гасителей; $[r^*]$ – матрица динамической жесткости системы (матрица реакций) по направлениям перемещений Z (рисунок 9); $[R_F]$ – вектор амплитуд реакций, соответствующих перемещениям Z , от заданных воздействий.

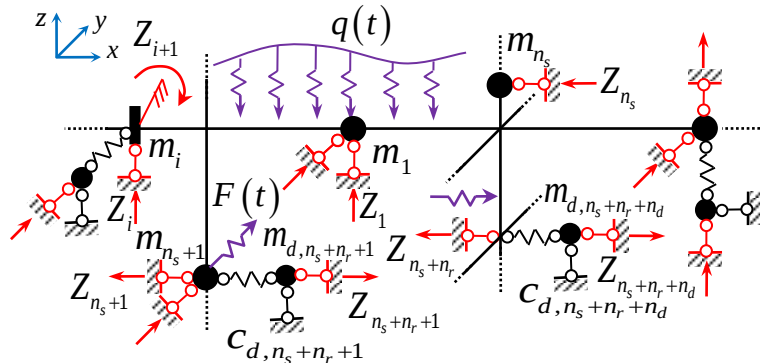


Рисунок 9 – Расчетная схема к определению матрицы жесткости

В системе уравнений (14) выделяем три группы:

- 1) n_s уравнений, описывающих амплитудное состояние самой системы (по точкам, где есть массы, перемещения которых не регулируются);
- 2) n_r уравнений, относящихся к местам постановки гасителей, где необходимо отрегулировать перемещения;
- 3) n_d уравнений, характеризующих состояние самих гасителей.

Нумерация – сквозная для всех групп уравнений. В качестве условий регулирования используем ограничения перемещений в местах и по направлению установки гасителей, аналогично (11):

$$\left[Z_{n_s+1} \dots Z_{n_s+n_r} \right]^T = \left[\langle y_{n_s+1}^r \rangle \dots \langle y_{n_s+n_r}^r \rangle \right]^T \quad \text{или} \quad [Z_r]^T = [\langle y^r \rangle]^T. \quad (15)$$

После подстановки условий регулирования (15) в систему уравнений (14) и математических преобразований, используя более удобное обозначение номеров гасителей, получим:

$$m_{d,j} = \frac{c_{d,j}}{\omega_F^2} \cdot B(c_{d,j}), \quad j = 1, \dots, n_d, \quad (16)$$

где $m_{d,j} = m_{d,n_s+n_r+i}$; $c_{d,j} = c_{d,n_s+n_r+i}$;

$$B(c_{d,j}) = \left[1 + \frac{c_{d,j} \langle y_{n_s+i}^r \rangle}{\sum_{j=1}^{n_s} r_{n_s+i,j} Z_j + \sum_{j=n_s+1}^{n_s+i-1} r_{n_s+i,j} \langle y_j^r \rangle + (r_{n_s+i,n_s+i}^s - m_{n_s+i} \omega_F^2) \langle y_{n_s+i}^r \rangle + \sum_{j=n_s+i+1}^{n_s+n_r} r_{n_s+i,j} \langle y_j^r \rangle + R_{F,n_s+i}} \right]^{-1}.$$

Задавая один из параметров гасителя, по (13) или (16) определяем значение другого. Таким образом, предлагаемый метод позволяет легко рассчитать характеристики для всего комплекса гасителей, которые удовлетворяют исходным требованиям регулирования. Результаты решений, полученные по (13) или (16), совпадают.

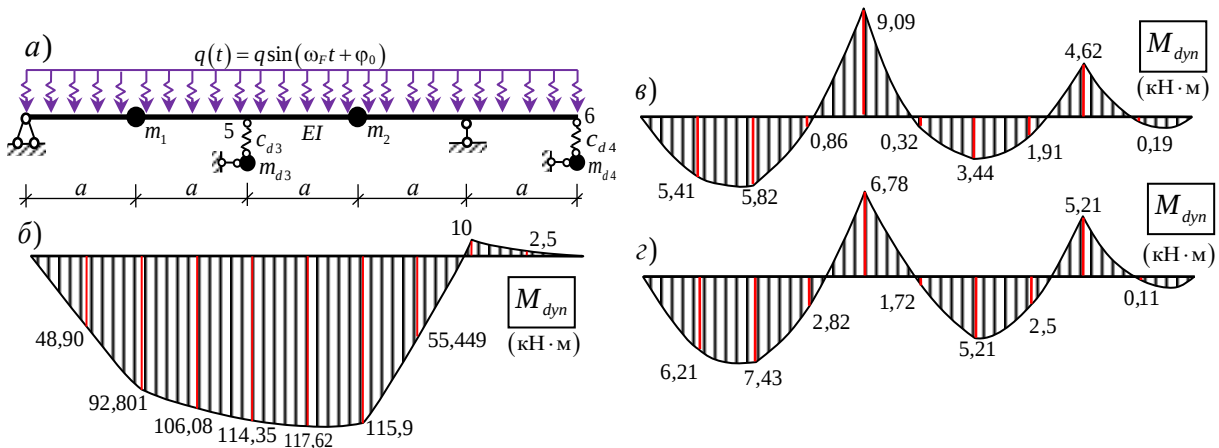


Рисунок 10 – Расчетная модель (а); амплитуды динамических изгибающих моментов незащищенной системы (б); динамические эпюры моментов при $\langle \Delta_5^r \rangle = 0$; $\langle \Delta_6^r \rangle = 0$ (в); $\langle \Delta_5^r \rangle = 0,1588$ мм; $\langle \Delta_6^r \rangle = -0,1076$ мм (г)

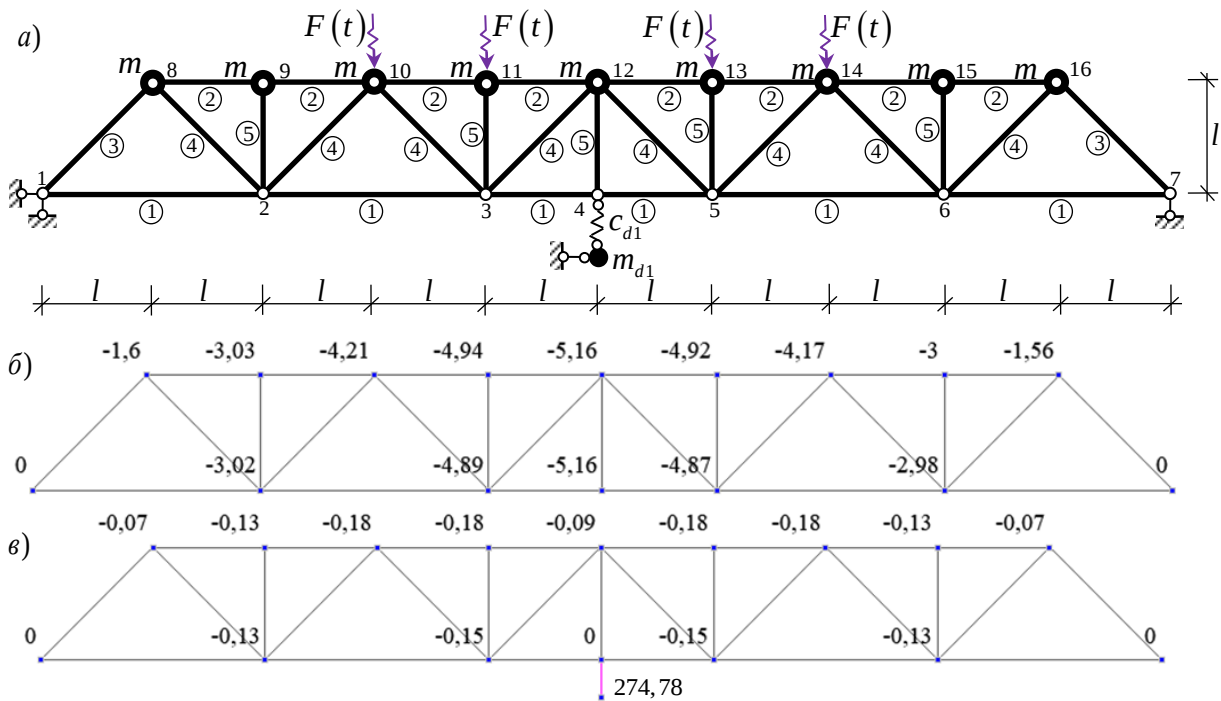


Рисунок 11 – Расчетная модель (а); вертикальные перемещения узлов (мм) от динамического воздействия: для фермы без гасителя (б), для фермы с гасителем (в)

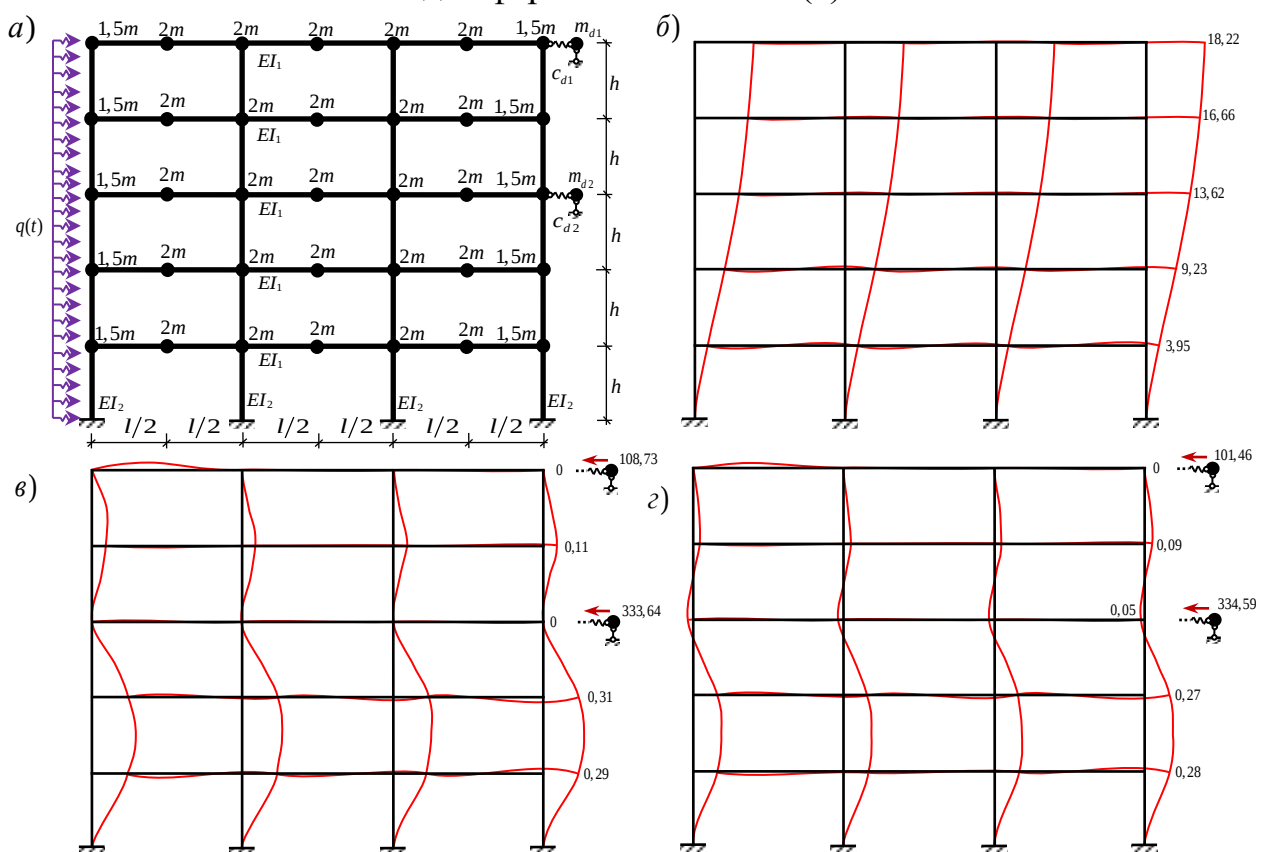


Рисунок 12 – Расчетная модель рамы (а); горизонтальные перемещения (мм) рамы без ДГК (б); рамы с ДГК при разных условиях регулирования (в), (г)

Представлены качественные и количественные результаты расчета динамически нагруженных систем (балок, ферм, рам), где регулирование динамического

состояния осуществляется по предложенной методике (рисунки 10 – 12). Отмечено существенное положительное влияние группы ДГК на надежность системы.

С использованием предложенного метода разработаны алгоритмы оптимизации параметров комплекса ДГК по надежности для различных вариантов регулирования НДС сооружений с помощью комплекса ДГК:

1. Регулирование динамического НДС системы с помощью комплекса ДГК осуществляется на стадии проектирования сооружения (допускается изменение собственных характеристик системы, возможно снижение материалоемкости);

2. Рассматривается задача регулирования динамического НДС системы с помощью комплекса ДГК для уже существующего сооружения (изменение собственных характеристик системы не допускается, но имеется возможность снижения уровня значений параметров динамического НДС системы и повышения ее надежности за счет регулирования).

В зависимости от постановки задачи, при поиске оптимальных значений параметров рассматриваемой системы могут применяться различные варианты целевых функций (ЦФ), критериев оптимальности и ограничений. При оптимизации по надежности возможны два варианта постановки задачи оптимизации:

1. В качестве ЦФ $f(X)$ принимается вероятность отказа системы $f = P_f$ и тогда отыскивается минимум ЦФ $f(X) \rightarrow \min_X$ или в качестве ЦФ принимается надежность $f = P_s$ системы и тогда отыскивается максимум ЦФ $f(X) \rightarrow \max_X$.

2. Требования по необходимому уровню надежности (или допустимой вероятности отказа) входят в ограничения $g(X_0) \leq 0$, а ЦФ – ресурсоемкость (расход материала (объем), стоимость и т.п.).

Варьируемыми параметрами $X\{X_1 X_2 \dots X_n\}$ в задаче оптимизации по надежности могут являться: геометрические характеристики системы (жесткости элементов, их длины и т.д.), массы системы, нагрузки и параметры комплекса ДГК (число гасителей, масса и жесткость каждого гасителя, места их расположения, параметры регулирования). Варьируемым параметром, наиболее сильно влияющим на результаты оптимизации, является количество ДГК.

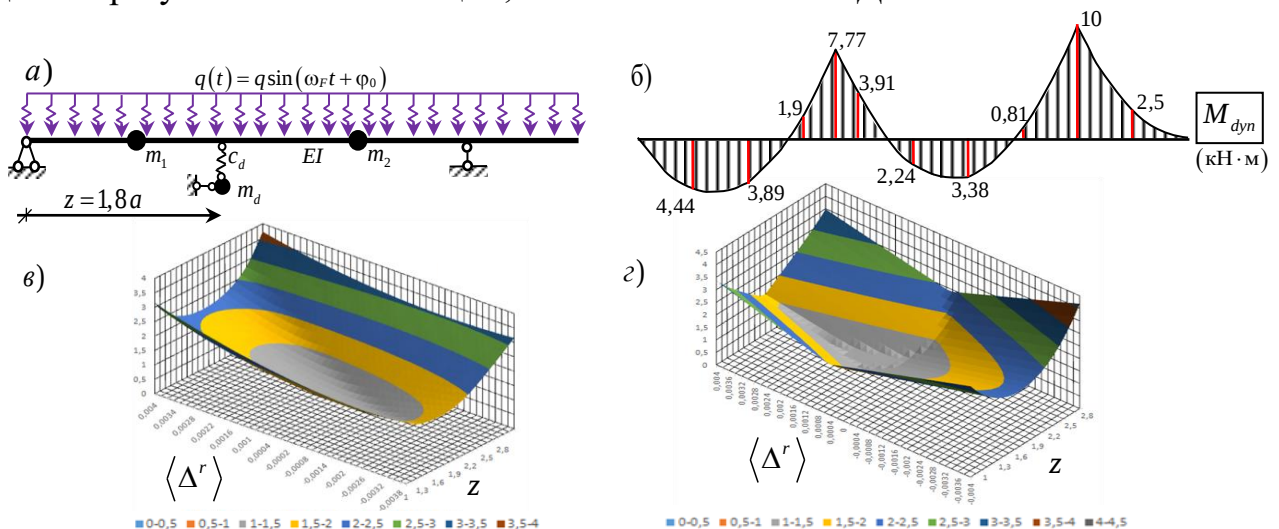


Рисунок 13 – Расчетная модель (а); амплитуды динамических моментов (б); поверхности $|M_{max}| / \min |M_{max}|$ (в), $\Sigma |M| / \min \Sigma |M|$ (г)

Перед решением задачи оптимизации предлагается предварительно выявить рациональную область параметров регулирования, при которых усилия и перемещения в системе будут снижены, так как уменьшение в среднем усилий в системе, как правило, приводит к повышению ее надежности. Для модельной задачи (рисунок 13) реализован поиск оптимальных значений МО параметров регулирования с использованием различных целевых функций. При решении задачи использовался метод сканирования по сетке.

Четвертая глава «Приложения к решению инженерных задач расчета надежности конструкций с гасителями колебаний».

Оценено влияние стохастической изменчивости параметров системы, гасителя и внешнего воздействия на надежность системы. На примере балочной системы с гасителем, аналогичной изображенной на рисунке 5, а, показано, что в расчетах надежности сооружений и конструкций, оснащенных динамическими гасителями колебаний, при вибрационных воздействиях наиболее значимыми являются частота ω_F и амплитуда F нагрузки, а также масса гасителя m_d и жесткость c_d его упругого элемента. Изменчивостью характеристик глобальной геометрии системы можно, как правило, пренебрегать, рассматривая их как квазидетерминированные. Вариативность параметров жесткости и масс защищаемой конструкции следует учитывать лишь при плохих показателях их стохастических свойств.

Разработана методика определения надежности и долговечности гармонически нагруженных систем с конечным числом степеней свободы по условию усталостной прочности в области большого количества циклов. Требование обеспечения усталостной прочности актуально для сооружений и конструкций подверженных длительным циклически переменным воздействиям – опорных конструкций турбоагрегатов и длительно непрерывно функционирующего технологического оборудования, высотных и большепролетных сооружений при аэродинамических воздействиях, и т.д.

Предложены варианты аппроксимаций кривых усталости, аналогичных кривым Веллера при ненулевом среднем напряжении для большого количества циклов:

$$1) \quad \sigma_a^*(n_c) = (\sigma_u - \sigma_m - \sigma_d)e^{-\beta n_c} + \sigma_d, \quad (17)$$

$$2) \quad \sigma_a^*(n_c) = \begin{cases} \sigma_{a,l}^* - (\sigma_{a,l}^* - \sigma_{a,\infty}^*)(\lg n_c - 4)/2, & 10^3 < n_c < 10^6, \\ \sigma_{a,\infty}^* \left[1 - \varepsilon + \frac{2\varepsilon^2}{(n_c - 10^6)(\sigma_{a,l}^*/\sigma_{a,\infty}^* - 1)\lg e + 2\varepsilon} \right], & n_c \geq 10^6, \end{cases} \quad (18)$$

где $\sigma_a^*(n_c)$ – амплитуда напряжения, при которой материал выдержит n_c циклов; $\sigma_d = \sigma_{a,\infty}^*(1 - \varepsilon)$ – асимптота функции; $\varepsilon = 0,001 \dots 0,1$; $\sigma_{a,\infty}^*$ – амплитуда, при которой материал выдержит неограниченно большое число циклов;

$$\beta = -10^{-6} \ln \left(\frac{\varepsilon \sigma_{a,\infty}^*}{\sigma_u - \sigma_m - \sigma_d} \right).$$

Принципиальный вид кривой усталости материала с учетом вероятностных свойств показан на рисунке 14. Надежность определялась по условию усталостной прочности материала $\sigma_a(n_c) < \sigma_a^*(n_c)$, где $\sigma_a(n_c)$ – амплитуда напряжений, полученная в результате вероятностного динамического расчета.

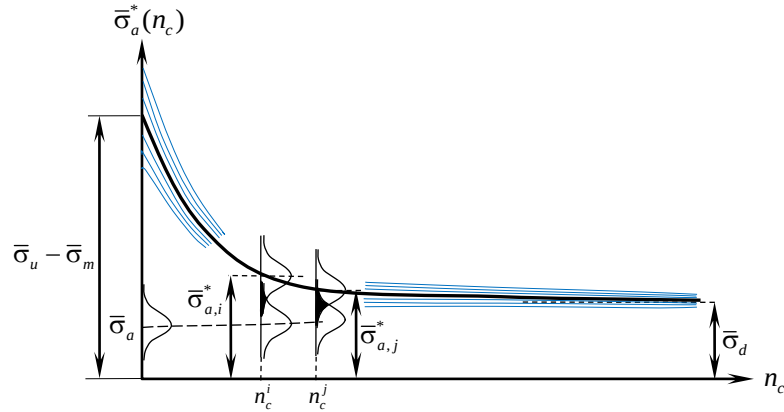


Рисунок 14 – Кривая усталости материала с учетом стохастических свойств расчетных параметров и ее использование для оценки вероятности отказа

Предложенная методика и алгоритм расчета надежности и долговечности на основе аппроксимаций кривых усталости материала позволяет определять вероятность отказа, соответствующую определенному числу циклов нагружения, и наоборот. Зависимости вероятности отказа от количества циклов показаны на рисунке 15 (для различных расчетных стержневых систем).

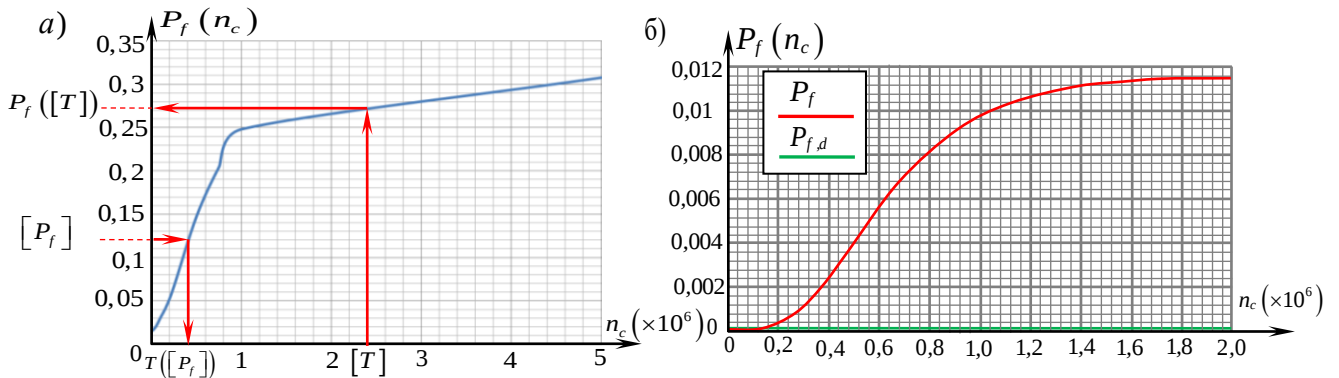


Рисунок 15 – График изменения вероятности отказа в зависимости от количества циклов по модели (17) при $\varepsilon = 0,1$ для балки с ДГК (рисунок 5,а) и фермы с ДГК и без (рисунок 11)

Оценена эффективность гасителя с точки зрения надежности для систем, характеризующихся сгущенным спектром собственных частот. На примере расчета статически неопределимой рамы со специально подобранными параметрами показано, что область эффективной работы гасителя в таких системах характеризуется достаточно малым диапазоном. Отмечено, что с увеличением массы ГК диапазон допустимых рабочих частот расширяется, при этом надежность системы возрастает (рисунок 16).

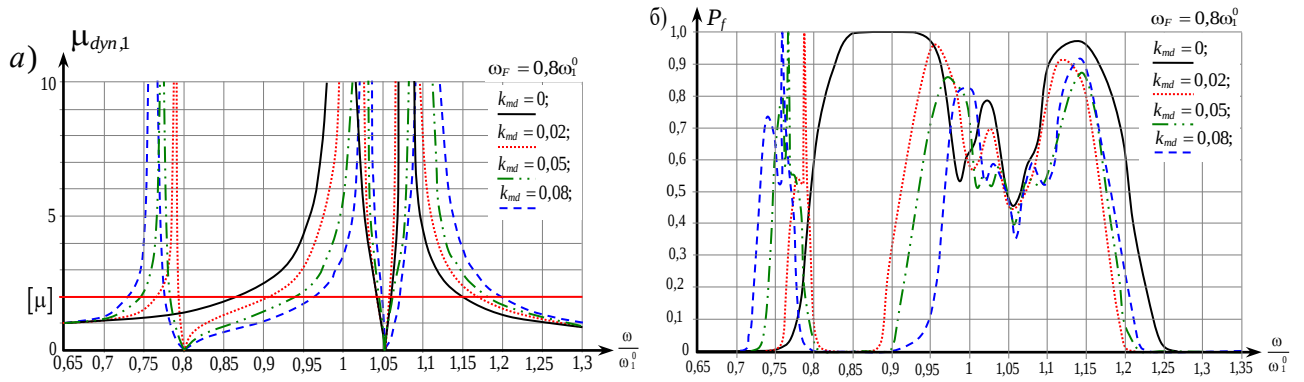


Рисунок 16 – Динамический коэффициент по изгибающему моменту в расчетном сечении в зависимости от рабочей частоты при разных массах ДГК (а); соответствующие вероятности отказа (б)

Выполнена оценка возможности применения ПК ANSYS в вероятностных динамических расчетах систем с ДГК. На примере тестовых задач изучены особенности и проблемы использования специализированного модуля Design Exploration (приложение Six Sigma Analysis), основанного на аппарате построения метамоделей. Проведено сравнение результатов вычисления вероятностных свойств различных параметров, определенных в ПК ANSYS и в специализированной программе (рисунок 17).

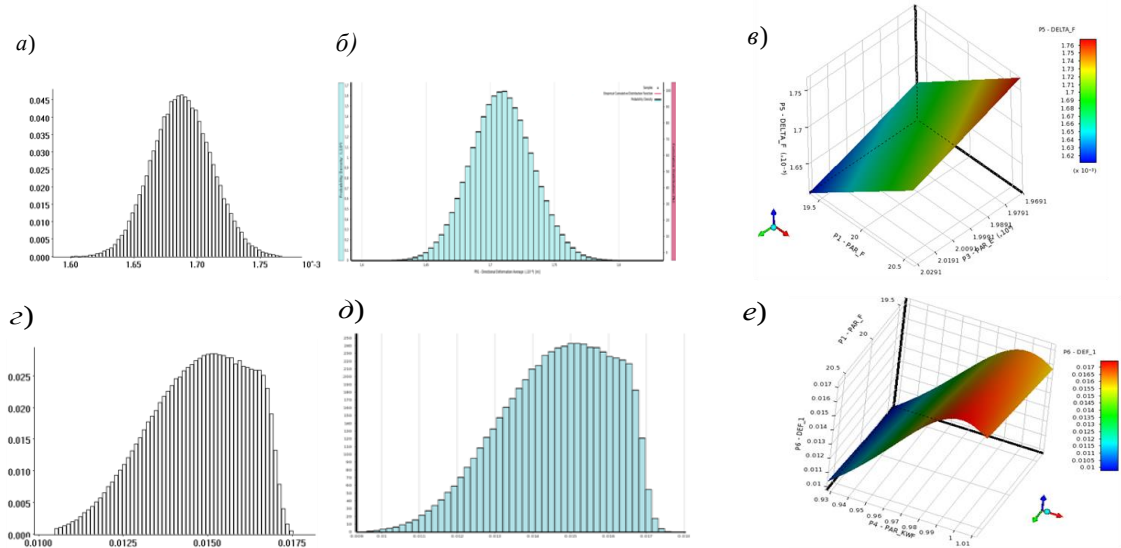


Рисунок 17 – Гистограммы статического перемещения $y_{st} = Fl^3/(48EI)$, полученные по VaP (а); по ANSYS Mechanical APDL (б); метамодель зависимости перемещения от F и E (в); гистограммы перемещений $y_{dyn} = y_{st} \mu$ (μ – по (3)) при $\gamma = 0,1$ по VaP (г); ANSYS Mechanical APDL (д); метамодель $\tilde{y}_{dyn}(\gamma, F, k_{\omega})$

Результаты расчетов хорошо согласуются с аналитическими решениями для параметров НДС, характеризующихся слабо нелинейной зависимостью от входных варьируемых параметров в рассматриваемом диапазоне. Для функций, имеющих разрывы в рассматриваемой области, ПК ANSYS дает некорректный результат, а для систем, параметры состояния которых характеризуются сильно нелинейной зависимостью от входных параметров (что характерно для систем с

ДГК) требуется большое число перерасчетов, что сопоставимо с выполнением расчетов по методу Монте-Карло с применением МКЭ.

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ

1. Анализ литературных данных показал, что проблема определения надежности гармонически нагруженных систем с динамическими гасителями колебаний на данный момент является недостаточно изученной, хотя в детерминированных постановках вопросы динамического гашения колебаний исследованы достаточно подробно и на высоком уровне, но возможно развитие теории гашения колебаний с позиций теории регулирования НДС. Определена возможность использования известных методов вероятностных расчетов для определения надежности систем с ДГК.

2. Разработан метод для определения характеристик ДГК при использовании комплекса одномассовых динамических гасителей, как регуляторов динамического НДС деформируемой системы с конечным числом степеней свободы при вибрационных нагрузках. Получены в аналитической форме, в удобном для практического использования виде, зависимости для вычисления значений масс и жесткостей гасителей, обеспечивающих выполнение изначально формулируемых требований к перемещениям системы.

3. Количественные значения вероятности отказа / надежности по различным критериям безотказности при варьировании вероятностных характеристик основных расчетных параметров системы, нагрузки и гасителя, свидетельствуют о резком падении надежности до неприемлемых уровней за пределами достаточно узких интервалов рабочих частот, что следует из вероятностных динамических расчетов модельных стержневых систем (незащищенных и с одномассовыми ДГК), выполненные по специально составленным алгоритмам. На основании предложенной обобщенной модели с одной степенью свободы предложен алгоритм упрощенного определения надежности для больших многопараметрических систем с ДГК.

4. На основе анализа влияния стохастической изменчивости параметров конструкций с ДГК на надежность при гармонических нагрузках, определены параметры, отклонения которых имеют наибольшее влияние на надежность системы, – масса и жесткость гасителя, рабочая частота воздействия. Сформулированы предложения о возможных путях и способах повышения надежности конструкций с динамическими гасителями колебаний (повышение качества контроля за параметрами системы, нагрузки и гасителей; выбор количества и оптимальных параметров гасителей и др.). С помощью разработанного алгоритма определения надежности и долговечности по условию усталостной прочности, с учетом предложенных аппроксимаций кривых усталости материала, выявлены зависимости вероятности отказа от количества циклов для стержневых систем с динамическими гасителями колебаний при гармонических воздействиях.

5. Дана оценка влияния ДГК на надежность систем со сгущенным спектром собственных частот. Выявлена зависимость надежности систем с ДГК от массы гасителя, а именно: с увеличением массы гасителя диапазон рабочих частот, до-

пустимый по требуемой надежности, расширяется. Оценена возможность использования ПК ANSYS в вероятностных расчетах динамически деформируемых систем с ДГК. Определены условия применимости указанного ПК и возможные риски получения некорректных результатов при вычислениях надежности систем с динамическими гасителями колебаний.

Перспективой дальнейшей разработки темы является рассмотрение вопросов расчета надежности систем с различными видами гасителей колебаний (многомассовыми ДГК, ударными и т.д.), учете различных видов динамических воздействий, а также развитие направления регулирования динамического НДС систем с помощью гасителей колебаний и их оптимизации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Себешев В.Г., **Гербер Ю.А.** Анализ влияния стохастической изменчивости параметров конструкций с динамическими гасителями колебаний на надежность при гармонических нагрузках // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4. С. 93 – 105.
2. **Гербер Ю.А.**, Себешев В.Г. Особенности расчета надежности динамически нагруженных систем с учетом эффекта нелинейности амплитудно-частотных характеристик в резонансных зонах // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 5. С. 5 – 16.
3. Себешев В.Г., **Гербер Ю.А.** Регулирование динамическими гасителями колебаний напряженно-деформированного состояния и надежности систем с сосредоточенными массами при гармонических воздействиях // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 9. С. 5 – 18.
4. Себешев В.Г., **Гербер Ю.А.** Регулирование с помощью динамических гасителей колебаний напряженно-деформированного состояния систем с конечным числом степеней свободы при гармонических воздействиях (решение в перемещениях масс с матрицей жесткости) // Изв. вузов. Строительство. 2021. № 6. С. 5 – 19.

Статьи в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и WoS

5. **Gerber Yu.A.**, Danilov M.N., Sebeshev V.G. Probabilistic analysis and reliability evaluation of the harmonically loaded rod systems with dynamic vibration dampers, based on the use of modern software complexes // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 456 (2018) 012042. pp. 1 – 8.
6. **Gerber Yu.A.**, Sebeshev V.G. The use of reduced models in the reliability analysis of deformable systems with dynamic vibration dampers // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 1425 (2020) 012038. pp. 1 – 11.
7. **Gerber Yu.A.**, Sebeshev V.G. Regulation of dynamic stress-strain state and reliability of deformable systems with vibration dampers under harmonic loads // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 972 (2020) 012013. pp. 1 – 9.

Статьи в других печатных изданиях

8. Себешев В.Г., **Гербер Ю.А.** Оценка надежности и долговечности по условию усталостной прочности стержневых систем с динамическим гасителем колебаний при гармонических воздействиях // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 3-й Всероссийской конференции, Новосибирск, 15–17 апреля, 2014 г. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2014. С. 367 – 380.

9. **Гербер Ю.А.** О влиянии динамического гасителя колебаний на надежность стержневых систем при гармонических воздействиях по различным критериям безотказности // Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана : Материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых 9 – 10 апреля 2015 г. Усть-Каменогорск : ВКГТУ, 2015. Ч. I. С. 89 – 94.

10. Sebeshev V.G., **Gerber Y.A.** Structural analysis of random parameters under harmonic loads // Vestnik TSUAB English version appendix to № 4, 2013, № 2 – 6, 2014. pp. 42 – 51.

11. **Гербер Ю.А.,** Себешев В.Г. Надежность стержневых систем с динамическим гашением колебаний в областях сгущения спектра собственных частот // Труды НГАСУ. 2018. Т. 21, №1(67). С. 59 – 74.

12. **Гербер Ю.А.,** Себешев В.Г. Расчеты надежности стержневых конструкций с динамическими гасителями колебаний с учетом сильной нелинейности амплитудно-частотных характеристик // Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века. Сборник научных статей I Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию доктора технических наук, профессора О.В. Кунцевича. 22-25 ноября 2016 г., Санкт-Петербург / Под ред. Т.М. Петровой. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. С. 158 – 169.

13. **Гербер Ю.А.,** Данилов М.Н., Себешев В.Г. Вероятностные расчеты и оценка надежности стержневых гармонически нагруженных систем с динамическими гасителями колебаний с применением современных программных комплексов // VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSE 2018)»: программа и тезисы докладов (Новосибирск, 1-8 июля 2018 г.). Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2018. С. 44.

Подписано в печать _____ 2022. Формат 60x84.

Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.-изл. 1,15.

Тираж 100 экз. Заказ No _____.

Изд-во ФГБОУ ВО «ТГАСУ», 643003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ФГБОУ ВО «ТГАСУ».

634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.