

На правах рукописи



Федотов Александр Васильевич

Гашение колебаний в распределенных упругих системах с использованием пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Беляев Александр Константинович,**
доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории мехатроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Мусалимов Виктор Михайлович,**
доктор технических наук, профессор факультета систем управления и робототехники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Горлатов Дмитрий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «9» июня 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.075.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой проспект, д. 61, аудитория 14.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН и на сайте института по адресу <http://www.ipme.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.075.02,
кандидат технических наук



А.Ю. Кучмин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа посвящена проблеме активного управления колебаниями распределенных механических систем. Данная проблема на протяжении последних десятилетий является одной из ключевых в технике. Вибрации в механических системах возникают повсеместно под воздействием как внутренних источников возбуждения, связанных с циклическим движением подвижных частей механизмов (например, турбины, двигатели машин), так и нагрузок, обусловленных воздействиями внешней среды (например, при движении автомобилей, летательных аппаратов, сейсмических колебаниях земной поверхности). Зачастую возникающие вибрации являются нежелательными и даже опасными для конструкций и машин, они могут вызывать погрешности в их работе, приводить к их износу и разрушению, а также создавать ненужный шум.

Для борьбы с нежелательными вибрациями могут быть использованы как пассивные элементы (демпферы), так и активные элементы управления, предполагающие управление с обратной связью. Активное управление колебаниями является одной из задач мехатроники – современной области науки, включающей в себя механику, электронику, информационные технологии и теорию управления. В круг перспективных задач мехатроники и активного гашения колебаний входит управление такими объектами, как:

- 1) Роботы и робототехнические системы
- 2) Медицинские приборы
- 3) Высокоточные обрабатывающие станки
- 4) Автомобили и летательные аппараты
- 5) Легкие конструкции (объекты «lightweight design»)
- 6) Здания, мосты и другие инженерные сооружения

Механические системы, включающие в себя элементы активного управления (сенсоры и актуаторы) и способные изменять свое поведение в зависимости от внешних условий с целью соответствия заданным требованиям, в литературе получили название «умных конструкций» (“smart structures”). Материалы, входящие в данные конструкции и обеспечивающие управление их поведением, по аналогии называются «умными материалами» (“smart materials”). В качестве «умных материалов» зачастую применяются пьезоэлектрики. Распространенность пьезоэлектрических элементов объясняется их высокими эксплуатационными характеристиками – легкий вес, простота в использовании, возможность придания им любой требуемой формы и широкий частотный диапазон их работы. В исследованиях, изложенных в настоящей работе, в качестве элементов управления используются именно пьезоэлектрические преобразователи.

Специфика управления системами с распределенными параметрами состоит в том, что такие системы имеют формально бесконечное число степеней

свободы, следовательно, они не являются полностью управляемыми и наблюдаемыми. Кроме того, распределенные системы имеют бесконечное число резонансов, причем именно резонансные колебания представляют для работы данных систем наибольшую опасность.

Среди общепринятых подходов к активному управлению колебаниями распределенных систем можно выделить локальный и модальный. Локальный, или децентрализованный, подход подразумевает, что управляющее воздействие, приложенное в некоторой точке системы, зависит исключительно от деформаций или смещений системы, измеренных в данной точке, таким образом, используются локальные связи сенсор-актуатор. Модальный же подход предполагает раздельное управление различными формами колебаний упругого объекта, при этом для управления каждой из форм используется весь массив имеющихся сенсоров и актуаторов. Указанные подходы к управлению принципиально различны, при этом каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Идеология модального подхода несколько сложнее, чем локального, поскольку он требует определенной настройки контуров для раздельного управления формами колебаний объекта.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное воплощение модального подхода к управлению, его сравнение с локальным и разработка эффективных методов управления распределенными упругими системами.

Степень разработанности темы исследования

Текущее состояние мехатроники характеризуется большим разнообразием используемых для целей управления материалов и систем. Детальный обзор функциональных материалов, среди которых пьезоэлектрические и магнитострикционные материалы, а также сплавы с памятью формы, можно найти в работах I. Chopra, J. Tani, T. Takagi и J. Qiu. В то же время широкое применение получили различные полуактивные и гибридные системы, содержащие как активные, так и пассивные элементы. Обзор таких систем, применяемых главным образом для управления вибрациями в зданиях и инженерных сооружениях, приведен в статьях N.R. Fisco и H. Adeli. Многочисленным теоретическим аспектам и практическим приложениям активного управления вибрациями посвящены работы таких авторов, как C.R. Fuller, S.J. Elliott, P.A. Nelson, C. Hansen, S. Snyder и A. Preumont. Особенно интенсивно в настоящее время развивается биомехатроника, объектом изучения которой является взаимодействие биологических организмов и мехатронных систем. Различным проблемам биомехатроники, в частности, работе интеллектуальных ортезов, посвящены работы В.М. Мусалимова с соавторами.

Большинство систем активного управления колебаниями распределенных объектов основано на одном из двух альтернативных подходов: локальном или модальном. Применение локального подхода к управлению к задачам виброизоляции освещается в статьях S.J. Elliott, M. Serrand и S.-M. Kim с соавторами. Главным недостатком локального подхода является проблема

взаимного влияния различных контуров управления, связанных через упругий объект, что осложняет задачу дизайна законов управления для каждого контура.

Модальный подход предполагает независимое управление различными формами колебаний упругого объекта. Изначально идея модального управления появилась в химической промышленности, а затем данный подход был сформулирован для задач механики L.A. Gould и M.A. Murray-Lasso и получил дальнейшее развитие в работах L. Meirovitch. Применение модального подхода к управлению колебаниями пластин и оболочек с использованием пьезоэлектрических преобразователей освещается в работах U. Stöbener, L. Gaul, G. Zenz и др. В статьях А.К. Беляева, Д.Г. Арсеньева, В.А. Полянского и В.В. Котова с соавторами предлагается развитие модального подхода – биоморфный подход, предполагающий динамическое изменение числа форм колебаний объекта, по которым ведется управление, в зависимости от требований точности рассматриваемой задачи.

Основной проблемой, возникающей при модальном управлении, является перетекание энергии с низших (управляемых) на высшие (неуправляемые) формы колебаний. В англоязычной литературе данная проблема носит название «spillover». Для борьбы со spillover-эффектом необходимо правильным образом формировать систему сенсоров и актуаторов, а также определенным образом задавать законы управления: в рабочей частотной области усиление для наибольшей эффективности управления должно быть максимальным, а в области высоких частот для сохранения устойчивости системы – наоборот, минимальным. В этом проявляется неизбежное противоречие между эффективностью управления и устойчивостью замкнутой системы, вызывающее необходимость поиска компромисса между двумя данными качествами. Проблема spillover-эффекта при модальном управлении распределенной системой подробно рассмотрена в работах M.J. Balas.

Для того, чтобы реализовать модальный подход к управлению, необходимо расположить на объекте сенсоры и актуаторы таким образом, чтобы они могли эффективно отслеживать и управлять конкретными формами колебаний объекта. Использование распределенных сенсоров и актуаторов в качестве модальных фильтров обсуждается в статьях А. Donoso и С.-К. Lee. Альтернатива распределенным элементам управления – массивы дискретных сенсоров и актуаторов. Применение массивов дискретных элементов управления рассматривается в работах M. Nader, D.W. Huber, С. Peukert и других исследователей. Проблеме оптимального расположения пьезоэлементов на распределенном упругом объекте посвящены работы Н.В. Севодиной, Н.А. Юрловой и Д.А. Ошмарина.

В настоящей работе теоретически и экспериментально изучаются локальные и модальные системы управления изгибными колебаниями балок, при этом за основу принимается теория работы пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов, изложенная в статьях Н. Irschik и М. Krommer, а также в работах А. Preumont.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является совершенствование методов синтеза систем управления колебаниями упругих тел с обратной связью, в том числе модальных систем, осуществляющих раздельное управление различными формами колебаний упругого объекта. В рамках достижения данной цели синтезируются различные локальные и модальные системы, и результаты их работы сравниваются между собой теоретически и экспериментально. При этом формулируются и решаются следующие задачи:

1) Экспериментальное воплощение локального и модального подходов к управлению колебаниями распределенной системы для модельной задачи, предполагающей управление изгибными колебаниями тонкой металлической балки с помощью пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов. Данная задача предполагает создание экспериментальной установки, идентификацию объекта управления, определение оптимальных мест расположения пьезоэлементов на объекте и синтез законов управления, определяющих работу контроллера.

2) Разработка и применение процедуры экспериментальной идентификации, позволяющей обеспечить раздельное управление различными формами колебаний балки при использовании модальной системы управления.

3) Сравнение эффективности работы созданных локальных и модальных систем управления в применении к задаче гашения вынужденных резонансных колебаний металлической балки, а также объяснение полученных результатов.

4) Проведение численного исследования работы локальных и модальных систем в применении к модельной задаче управления колебаниями шарнирно-опертой балки в разложении по собственным формам колебаний и определение влияния используемой при синтезе систем управления модели работы сенсоров и актуаторов на эффективность управления.

5) Численное воспроизведение результатов эксперимента по управлению изгибными колебаниями балки посредством создания конечно-элементной модели объекта управления.

6) Синтез законов управления для модальной системы управления колебаниями балки на основе результатов конечно-элементного моделирования с использованием алгоритмов, позволяющих определять оптимальные параметры передаточных функций в контурах обратной связи, и сравнение полученных результатов управления с результатами систем, созданных в рамках экспериментального исследования.

Методика исследований

Настоящее исследование включает в себя как экспериментальную, так и теоретическую части. Методика численного исследования связана с представлением динамики системы в виде разложения по собственным формам колебаний. Для описания поведения объекта управления применяются методы теории стержней, при этом используется модель балки Бернулли-Эйлера. Для работы с декомпозиционной моделью балки в рамках численного исследования используется вычислительный пакет Matlab.

В рамках эксперимента создаются системы управления изгибными колебаниями тонкой металлической балки, закрепленной в одной точке, с обратной связью, включающие сенсоры, актуаторы и дискретный контроллер. Цель управления состоит в том, чтобы погасить вынужденные колебания балки, возникающие вследствие вибрации опоры. В процессе создания систем управления снимаются и анализируются амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) объекта управления, получаемые в результате воздействия на объект входного сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и применения к результатам измерения быстрого преобразования Фурье. Генерация и обработка сигналов производятся с помощью установки Polytec Scanning Vibrometer PSV-400.

Синтез законов управления осуществляется в вычислительном пакете Matlab с помощью частотных методов теории автоматического управления, исходя из цели обеспечения наиболее эффективного управления на тех резонансных частотах балки, вынужденные колебания на которых необходимо погасить. Генерация управляющих сигналов в цепи обратной связи выполняется дискретным контроллером dSPACE DS1103 PPC Controller Board в соответствии с заданными законами управления. Эффективность созданных систем определяется посредством сравнения АЧХ объекта при включенном и отключенном управлении.

Конечно-элементное моделирование объекта управления осуществляется в программном комплексе ANSYS, для получения АЧХ и ФЧХ проводится гармонический анализ системы с приложением внешнего воздействия в заданном частотном диапазоне.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о преимуществе модального подхода к управлению перед локальным в тех случаях, когда необходимо бороться с вынужденными колебаниями механической системы в диапазоне частот, содержащем несколько резонансных частот данной системы. В процессе исследования предложена методика идентификации объекта с целью разделения различных форм колебаний в системе управления, данная процедура является важным элементом при реализации модального подхода к управлению распределенными системами. Результаты исследования могут быть применены при создании активных систем управления распределенными упругими объектами в таких областях, как робототехника, строительство, автомобиле- и самолетостроение.

Научная новизна

1) Разработан и применен метод экспериментальной идентификации распределенного объекта, позволяющий определить оптимальные параметры линейного преобразования измеренных и управляющих сигналов, которое обеспечивает раздельное управление различными формами колебаний объекта в рамках модального подхода.

2) Проведено экспериментальное и численное сравнение эффективности локального и модального подходов к управлению в применении к задаче гашения вынужденных изгибных колебаний тонкой металлической балки. Продемонстрировано преимущество модального подхода перед локальным, выражающееся в том, что данный подход позволяет эффективно снижать амплитуду вынужденных колебаний балки на нескольких резонансных частотах.

3) Установлено, что при синтезе системы управления колебаниями распределенного объекта необходимо использовать полную модель работы сенсоров и актуаторов, учитывающую влияние данных элементов на собственные формы колебаний объекта, в противном случае эффективность управления значительно снижается.

4) Разработана методика проектирования модальных систем управления распределенным упругим объектом, осуществляющих гашение вынужденных резонансных колебаний данного объекта. Данная методика включает в себя определение матриц – синтезатора и анализатора форм, обеспечивающих раздельное управление различными формами колебаний объекта, а также синтез регуляторов для отдельных контуров управления, обеспечивающих эффективную работу системы управления на резонансных частотах, соответствующих указанным формам колебаний.

Положения, выносимые на защиту

1) Метод экспериментальной идентификации, позволяющий определить оптимальные параметры линейного преобразования измеренных и управляющих сигналов, которое обеспечивает раздельное управление различными формами колебаний распределенного объекта в рамках модального подхода.

2) Локальные и модальные системы управления, синтезированные в рамках экспериментального и численного сравнения эффективности двух альтернативных подходов к управлению в применении к задаче гашения вынужденных изгибных колебаний тонкой металлической балки. Продемонстрировано преимущество модального подхода, выражающееся в том, что он позволяет снижать амплитуду вынужденных колебаний балки на 16-18 дБ на нескольких резонансных частотах, в отличие от локального подхода, демонстрирующего подобную эффективность только на одном из резонансов.

3) Конечно-элементные модели металлической балки, упруго заземленной в промежуточном сечении, с закрепленными на ней пьезоэлементами, как объекта управления, верифицированные по экспериментальным частотным характеристикам.

4) Методика проектирования модальных систем управления распределенным упругим объектом, осуществляющих гашение вынужденных резонансных колебаний данного объекта. Данная методика включает в себя определение матриц – синтезатора и анализатора форм, обеспечивающих раздельное управление различными формами колебаний объекта, а также синтез регуляторов для отдельных контуров управления. Эффективность указанной методики продемонстрирована численно на примере гашения колебаний тонкой

металлической балки, закрепленной в одной точке, с помощью двух пьезоэлектрических сенсоров и двух актуаторов: снижение амплитуды вынужденных колебаний балки на первом и втором резонансах составило 29 дБ.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается строгостью используемых методов математики, механики и автоматического управления, применением теоретически обоснованного метода конечных элементов, а также сравнением результатов моделирования вынужденных изгибных колебаний балок с управлением и без, полученных экспериментально и численно.

Личный вклад автора

Все приведенные в работе результаты получены автором лично. Автор лично занимался как проведением экспериментальных исследований, так и аналитическим и численным моделированием рассматриваемых механических систем в программных комплексах Matlab и ANSYS, а также подготовкой материалов для публикаций.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертации докладывались на трех российских и двух международных конференциях (7-я и 9-я Российские мультikonференции по проблемам управления: конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах», УМАС-2014 и УМАС-2016; XVIII Конференция молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением»; XLIV Международная летняя школа – конференция «Advanced Problems in Mechanics», АРМ-2016; IV Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов АО «КБСМ» «Старт в будущее – 2017»), научном форуме с международным участием XLIII «Неделя науки СПбПУ», международном симпозиуме Automated Systems and Technologies (AST-2015), а также на семинарах в Институте проблем машиноведения РАН и Университете информационных технологий, механики и оптики.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 191 странице и содержит 108 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 68 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении к диссертации дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи исследования, а также приводится краткий обзор литературы.

Первая глава посвящена изложению теоретических основ проведенных исследований. Рассмотрена работа локальных и модальных систем управления,

критерии устойчивости системы управления с двумя обратными связями, а также работа прямоугольных пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов при управлении изгибными колебаниями балки Бернулли-Эйлера.

Схемы локальной и модальной систем управления с двумя обратными связями приведены на Рисунке 1. Здесь y_1 и y_2 – измеренные сигналы, u_1 и u_2 – управляющие воздействия, $R_1(s)$ и $R_2(s)$ – передаточные функции контроллера в первом и втором контурах управления.

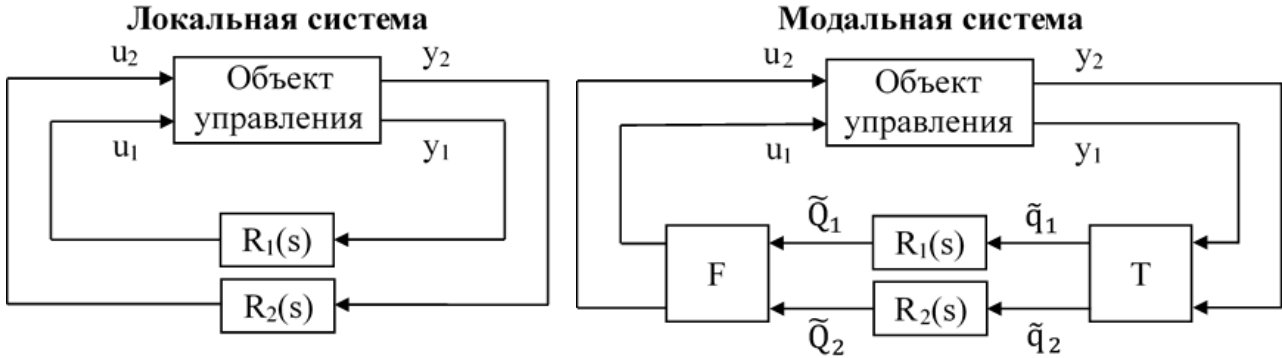


Рисунок 1. Схемы локальной и модальной систем управления

В локальной системе каждый контур включает в себя один сенсор и один актуатор, расположенные в одной и той же области на упругом объекте. В модальной же системе как измеренные, так и управляющие сигналы подвергаются линейному преобразованию, заданному с помощью матриц T и F : матрица – анализатор форм T преобразует сигналы сенсоров в оценки интенсивности возбуждения двух форм колебаний системы \tilde{q}_1 и \tilde{q}_2 , а матрица – синтезатор форм F преобразует управляющие воздействия на данные формы колебаний \tilde{Q}_1 и \tilde{Q}_2 в управляющие сигналы, подаваемые на актуаторы. Таким образом, каждый контур управления соответствует своей форме колебаний объекта, что позволяет управлять различными формами колебаний независимо друг от друга.

Для того, чтобы обеспечить соответствие между контурами управления и различными формами колебаний объекта при модальном управлении, необходимо задавать матрицы T и F следующим образом:

$$\begin{cases} F = \Theta^{aT} (\Theta^a \Theta^{aT})^{-1} \\ T = (\Theta^{sT} \Theta^s)^{-1} \Theta^{sT} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь Θ^a – матрица коэффициентов влияния, показывающая, в каких пропорциях каждый из актуаторов возбуждает каждую из собственных форм объекта, которыми необходимо управлять; Θ^s – весовая матрица, показывающая, в каких пропорциях каждый из сенсоров измеряет каждую из собственных форм.

В экспериментальной части работы для целей управления используются прямоугольные пьезоэлектрические сенсоры и актуаторы, представляющие собой тонкие пластинки из пьезоматериала, покрытые с обеих сторон электродами. Они расположены попарно по обеим сторонам балки, как показано

на Рисунке 2. Здесь ось балки совпадает с осью x , и балка может испытывать изгиб в плоскости xz .

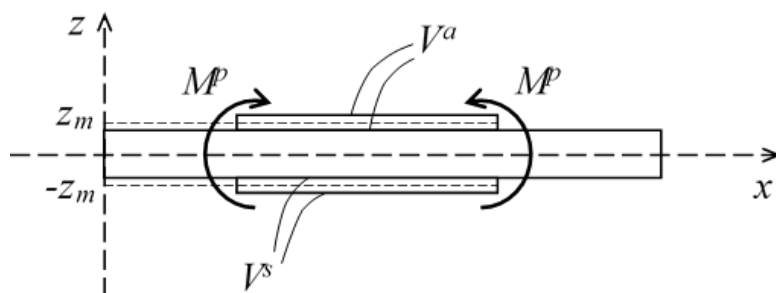


Рисунок 2. Действие прямоугольных пьезоэлементов на балку (вид сбоку)

Как сенсор, так и актуатор при наличии на их электродах разности потенциалов воздействуют на балку, вызывая ее деформацию. Данное воздействие эквивалентно приложению к балке на концевых сечениях пьезоэлементов пары изгибающих моментов, величина которых пропорциональна напряжению на электродах сенсора и актуатора. Сигнал сенсора пропорционален продольной деформации пьезоматериала, которая при изгибе балки выражается через разность углов поворота сечений, соответствующих концам сенсора.

Во второй главе диссертации излагается постановка экспериментального исследования по управлению вынужденными изгибными колебаниями металлической балки, упруго заземленной в промежуточном сечении. В рамках данной главы анализируются собственные формы колебаний балки, определяются места установки на балке сенсоров и актуаторов, снимаются амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) объекта управления, а также применяется процедура экспериментальной идентификации объекта, позволяющая настроить контуры модальной системы управления таким образом, чтобы отдельно управлять различными формами колебаний балки.

Схема экспериментальной установки вместе с фотографией представлена на Рисунке 3. В качестве объекта управления выступает алюминиевая балка 1 длиной 70 см с сечением 3×35 мм, закрепленная в вертикальном положении в одной точке на расстоянии 10 см от нижнего конца. Балка испытывает вынужденные изгибные колебания, вызванные продольной вибрацией пьезоэлектрического стержня-толкателя 2, входящего в состав конструкции закрепления, соединяющей балку с неподвижным основанием 3. Для управления колебаниями балки используются пьезоэлектрические сенсоры и актуаторы PI Ceramic DuraAct P-876.A15 (4 и 5), расположенные парами сенсор-актуатор на двух участках балки. Сенсоры и актуаторы связаны через дискретный контроллер dSPACE DS1103 PPC Controller Board (6). Для отслеживания уровня колебаний используется лазерный виброметр Polytec Scanning Vibrometer PSV-400 (7), измеряющий амплитуду колебаний точки на верхнем конце балки.

Цель создания данной экспериментальной установки состоит в том, чтобы протестировать и сравнить между собой локальный и модальный подходы к

управлению. Поскольку для управления используются две пары сенсор-актуатор, данная установка позволяет создать локальную систему управления с двумя контурами и модальную систему, работающую по двум формам колебаний балки. Задача указанных систем – гашение вынужденных изгибных колебаний балки в диапазоне частот, включающем две низшие резонансные частоты, которые соответствуют первой и второй формам изгибных колебаний балки. Данные формы изображены пунктиром на Рисунке 3.

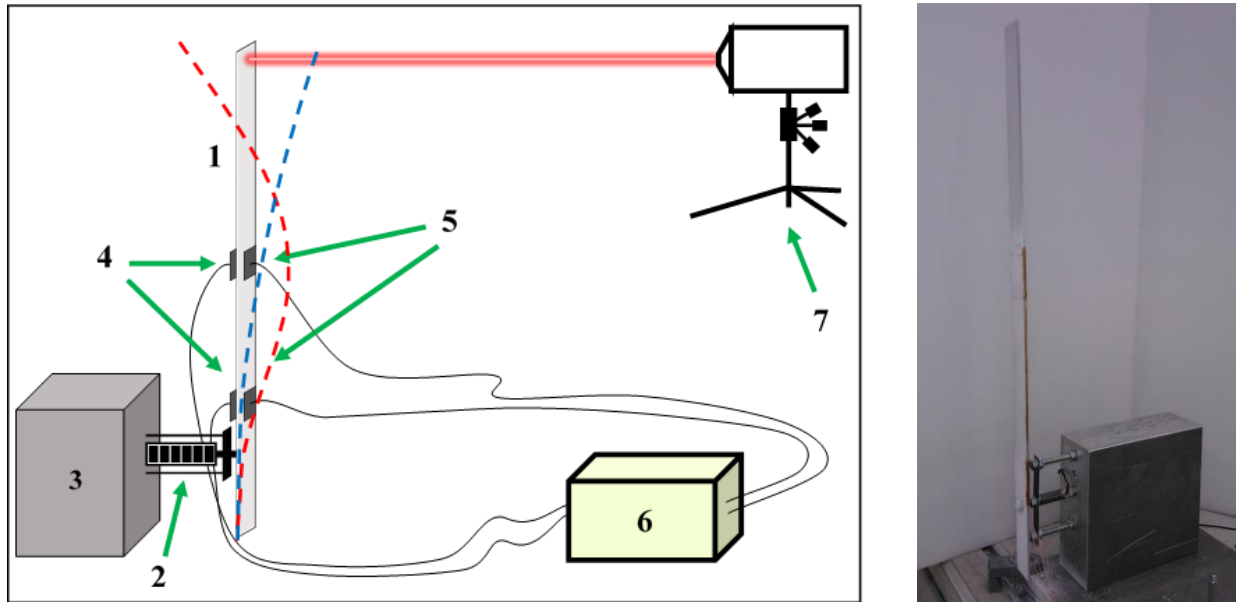


Рисунок 3. Экспериментальная установка (схема и фотография)

Сенсоры и актуаторы наклеиваются на балку один раз и остаются на одних и тех же местах для всех тестируемых систем управления. В связи с этим на первом этапе создания указанных систем необходимо выбрать оптимальные места расположения на балке пьезоэлементов. Для этого собственные формы изгибных колебаний балки анализируются экспериментально и численно, и пьезоэлементы наклеиваются в те места, где первая и вторая формы имеют максимальную кривизну. Данный выбор обусловлен тем, что в указанных местах сенсоры смогут максимально эффективно отслеживать данные формы, а актуаторы – возбуждать их.

Далее излагается процедура экспериментальной идентификации, позволяющая определить матрицы T и F , задающие линейные преобразования измеренных и управляющих сигналов с целью разделения первой и второй форм колебаний балки в модальной системе управления (см. Рисунок 1). Матрица – анализатор форм T задается таким образом, чтобы первый контур управления не реагировал на вторую форму, а второй – на первую; матрица – синтезатор форм F задается таким образом, чтобы первый контур управления не возбуждал вторую форму, а второй – первую. Указанная процедура состоит из трех этапов.

На первом этапе формируются оценки матриц T и F по формулам (1), вычисленные с использованием значений матриц Θ^a и Θ^s , полученных из снятых

экспериментально АЧХ пьезотолкатель-сенсоры и актуаторы-виброметр методом анализа высоты первого и второго резонансных пиков.

На втором этапе определяется уточненная оценка матрицы T . Для этого на первом и втором резонансных режимах, вызванных гармоническим воздействием на пьезотолкатель, измеряются пропорции сигналов первого и второго сенсора. Далее строки матрицы T выбираются таким образом, чтобы первый контур не активизировался во втором резонансном режиме, а второй – в первом.

На третьем этапе определяется уточненная оценка матрицы F . Для этого первый и второй резонансные режимы создаются воздействием одновременно на оба актуатора, при этом подбираются такие пропорции подаваемых на актуаторы сигналов, чтобы они компенсировали друг друга (то есть амплитуда колебаний точки на верхнем конце балки была равна нулю). Далее столбцы матрицы F выбираются с использованием полученных пропорций таким образом, чтобы первый контур не возбуждал вторую форму колебаний, а второй – первую.

Результаты разделения первой и второй форм колебаний балки, обеспечиваемые указанным выбором матриц T и F , изображены на Рисунке 4. Слева показаны АЧХ, соответствующие различным актуаторам и сенсорам, в диапазоне частот, включающем две первых резонансных частоты системы. Видно, что на каждой из четырех АЧХ присутствуют оба резонансных пика, поскольку каждый актуатор возбуждает и каждый сенсор реагирует на обе формы изгибных колебаний балки. Справа на Рисунке 4 показаны АЧХ, соответствующие различным контурам модальной системы управления. Видно, что на АЧХ, соответствующем первому контуру, присутствует только первый резонансный пик, второму контуру – только второй, а перекрестное влияние контуров невелико во всем частотном диапазоне, в том числе вблизи резонансов. Таким образом, первая и вторая формы колебаний эффективно разделяются в системе управления.

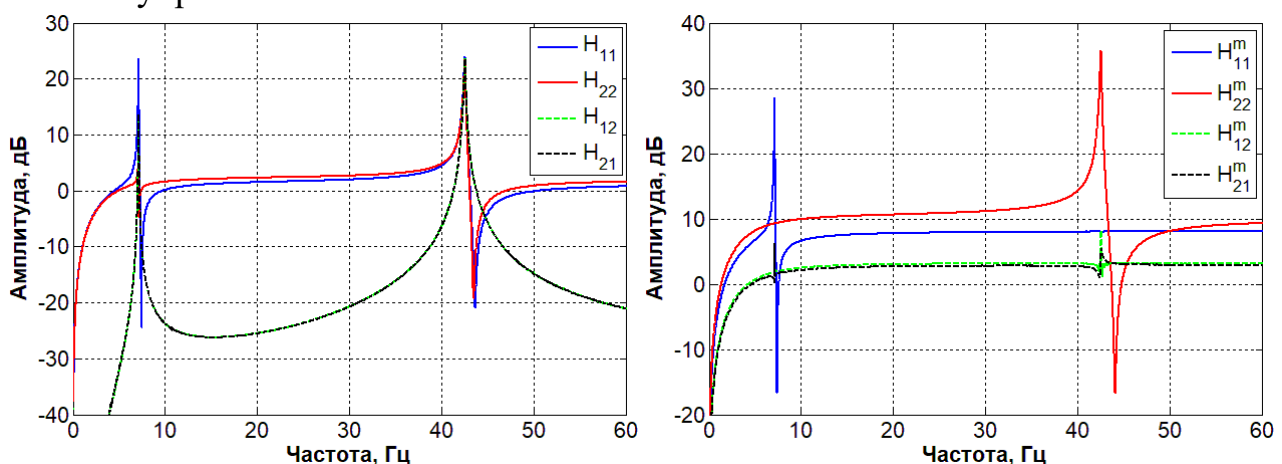


Рисунок 4. АЧХ, соответствующие различным актуаторам и сенсорам (слева) и различным контурам модальной системы управления (справа)

В третьей главе диссертации синтезируются различные законы управления для локальных и модальных систем, используемых для гашения

вынужденных изгибных колебаний тонкой металлической балки, рассмотренной во второй главе. Полученные системы тестируются экспериментально и сравниваются между собой.

Синтез передаточных функций для контуров различных систем управления осуществляется методом логарифмических амплитудных характеристик разомкнутой системы (метод ЛАХ). Для этого используются АЧХ и ФЧХ балки, снятые экспериментально во второй главе диссертации. При решении указанной задачи необходимо искать компромисс между эффективностью управления в рабочей частотной области и устойчивостью замкнутой системы. Неустойчивость на высших резонансных частотах возникает по той причине, что из-за запаздывания в канале управления фаза управляющего сигнала с ростом частоты стремится вниз и рано или поздно уходит ниже значения -180° , таким образом, в некотором частотном диапазоне колебания не гасятся, а усиливаются.

Передаточные функции конструируются из нескольких типов стандартных звеньев, или фильтров. Среди них есть как фильтры, улучшающие устойчивость системы на высших частотах (фильтры нижних частот первого и второго порядка, полосно-заграждающий фильтр), так и фильтры, поднимающие фазу управляющего сигнала в рабочей частотной области, что позволяет увеличить демпфирование в системе (lead-фильтр, полосно-пропускающий фильтр). Эффективность создаваемых систем управления проверяется экспериментально, при этом осуществляется экспериментальный подбор оптимальных параметров фильтров и коэффициентов усиления.

В результате данной работы были созданы две локальных и одна модальная система управления. Первая из локальных систем синтезирована таким образом, чтобы максимально эффективно работать на первой резонансной частоте, а вторая – на второй. Для определения эффективности полученных систем были сняты АЧХ балки при воздействии с помощью пьезотолкателя и измерении амплитуды колебаний точки на верхнем конце балки с помощью вибрметра, данные АЧХ вблизи первого и второго резонансов приведены на Рисунке 5.

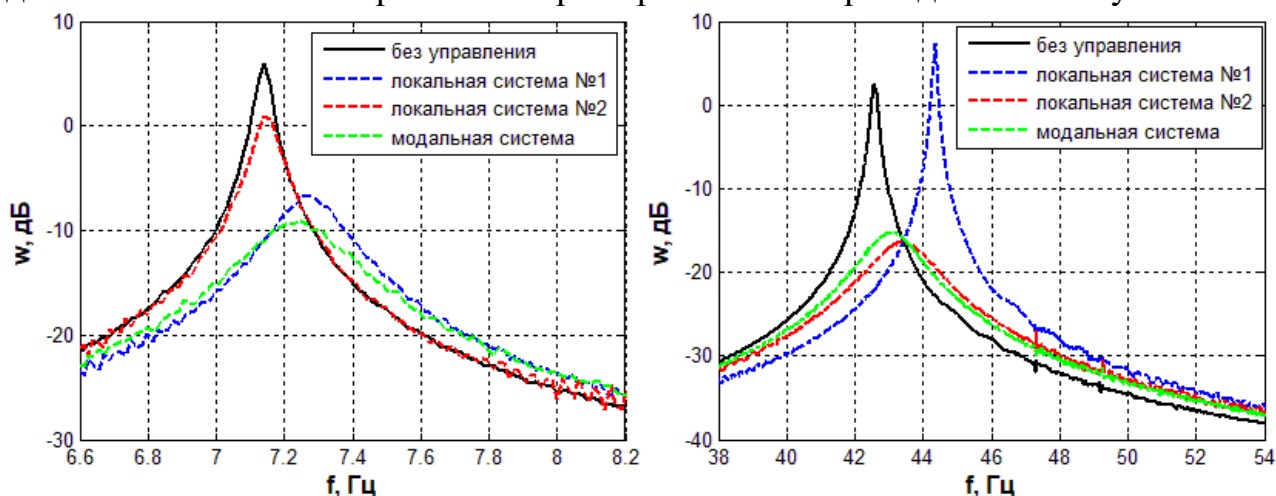


Рисунок 5. АЧХ упруго защемленной балки с управлением и без для разных систем управления вблизи первого (слева) и второго (справа) резонансов (эксперимент)

Локальная система №1 позволяет снизить амплитуду колебаний на первом резонансе на 12.7 дБ, однако на втором резонансе она, наоборот, увеличивает амплитуду колебаний на 4.8 дБ. Локальная система №2 эффективно работает на втором резонансе, снижая амплитуду резонансных колебаний на 18.9 дБ, однако менее эффективна на первом резонансе (снижение 5.2 дБ). Модальная система эффективна на обоих резонансах: снижение амплитуды колебаний составляет соответственно 15.7 дБ и 17.9 дБ. Таким образом, продемонстрировано преимущество модального подхода перед локальным в случае, если необходимо бороться с вынужденными колебаниями объекта на нескольких резонансных частотах. Данный результат объясняется тем, что в модальной системе управления, в отличие от локальной, каждый контур настраивается на эффективную работу на своей резонансной частоте и использует для этого все имеющиеся сенсоры и актуаторы.

В четвертой главе проводится численное исследование работы локальных и модальных систем управления в применении к задаче о гашении вынужденных изгибных колебаний тонкой металлической балки. Отличие от постановки задачи, рассмотренной в главах 2 и 3, состоит в том, что здесь рассматривается не упруго заземленная в промежуточном сечении, а шарнирно-опертая балка, в связи с этим сенсоры и актуаторы расположены на балке на других позициях. Задача об управлении решается численно в разложении по собственным формам изгибных колебаний балки в комплексе Matlab, используемая декомпозиционная модель объекта верифицируется сравнением с конечно-элементным решением, полученным в комплексе ANSYS. Кроме сравнения эффективности локальных и модальных систем управления, в данной главе исследуется возможность использования при синтезе системы управления упрощенной модели работы сенсоров и актуаторов, не учитывающей их влияние на собственные формы колебаний балки.

Рассматриваемый объект представляет собой шарнирно-опертую балку Бернулли-Эйлера длиной 1 м с сечением 3×35 мм (Рисунок 6). Изгибные колебания балки вызываются гармонически изменяющимся внешним моментом, приложенным к балке в сечении с координатой $x_0 = 0.4$ м. Для управления используются две пары сенсор-актуатор, расположенные на равных расстояниях друг от друга и от концов балки, как показано на Рисунке 6. Сенсоры и актуаторы идентичны используемым в экспериментальном исследовании в главах 2 и 3. Задача управления также состоит в гашении вынужденных изгибных колебаний балки в диапазоне частот, содержащем две низшие резонансные частоты.

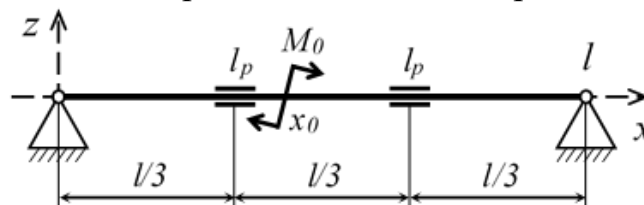


Рисунок 6. Модель шарнирно-опертой балки с пьезоэлементами

При синтезе законов управления в четвертой главе, в отличие от третьей, эффективность создаваемых систем проверялась не экспериментально, а численно, что значительно быстрее и удобнее. Таким образом, появлялась возможность протестировать большое количество разных вариантов передаточных функций и выбрать среди них оптимальный. Данная задача решалась с помощью специального алгоритма на языке Matlab, подбирающего оптимальные параметры фильтров, из которых конструируются передаточные функции в контурах управления. Данный алгоритм для каждого набора параметров из заданного диапазона определяет оптимальное значение коэффициента усиления, обеспечивающее наиболее эффективное гашение колебаний и не вызывающее неустойчивости. Далее результаты управления для каждой системы сравниваются и выбирается наиболее эффективная из них.

Для определения эффективности управления использовалась интегральная величина, определяемая по формуле:

$$E = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |w(x, t)|^2 dl}. \quad (2)$$

Здесь w – поперечное смещение точек балки, l – ее длина. Таким образом, величина E характеризует интенсивность установившихся колебаний балки.

Для модальной системы управления были численно определены матрицы – синтезатор и анализатор форм, затем синтезировались передаточные функции для каждого из контуров управления. В результате данной работы были созданы три локальных и одна модальная система. Первая из локальных систем синтезирована таким образом, чтобы максимально эффективно работать на первой резонансной частоте, вторая – на второй, а в третьей системе один контур управления настраивался на работу на первом резонансе, а второй – на втором. Для каждой из полученных систем были вычислены АЧХ балки, соответствующие интенсивности колебаний E , определяемой по формуле (2), при воздействии на балку с помощью внешнего момента. Данные АЧХ вблизи первого и второго резонансов приведены на Рисунке 7.

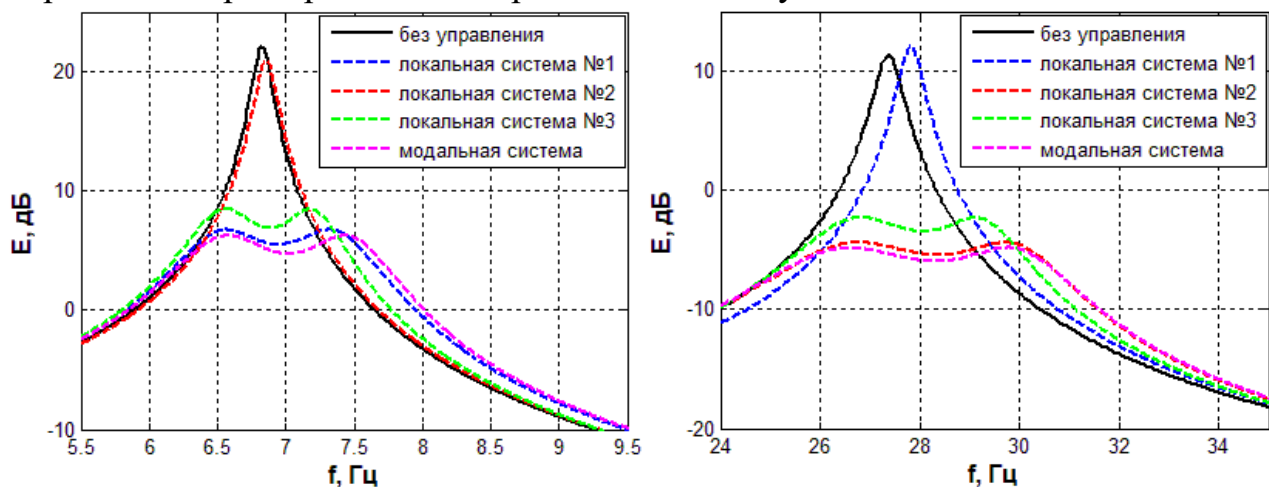


Рисунок 7. АЧХ шарнирно-опертой балки с управлением и без для разных систем управления вблизи первого (слева) и второго (справа) резонансов

Локальная система №1 снижает интенсивность колебаний на первом резонансе на 15.4 дБ, однако на втором резонансе она не работает (рост на 0.8 дБ). Локальная система №2 эффективно работает на втором резонансе (снижение на 15.8 дБ), однако неэффективна на первом (снижение на 1.2 дБ). Локальная система №3 достаточно хорошо работает на обоих резонансах (снижение на 13.6 дБ), однако модальная система более эффективна: снижение интенсивности колебаний составляет 15.9 дБ на первом резонансе и 16.2 дБ на втором. Таким образом, как и в экспериментальном исследовании, продемонстрировано преимущество модального подхода перед локальным.

Далее в четвертой главе исследуется возможность использования при синтезе системы управления упрощенной модели работы сенсоров и актуаторов, не учитывающей их влияние на собственные формы колебаний балки. Использование данной модели значительно упрощает расчеты при решении задачи об управлении. Выяснено, что указанное упрощение снижает эффективность управления: результаты созданной на основе данной модели модальной системы существенно уступают показателям системы, полученной для полной модели пьезоэлементов (снижение интенсивности колебаний балки на первом и втором резонансах составило соответственно 11.2 и 13.2 дБ). Таким образом, показана необходимость учета влияния пьезоэлементов на собственные формы колебаний балки при создании системы управления.

В пятой главе результаты экспериментального исследования из глав 2 и 3 воспроизводятся численно с помощью конечно-элементного (КЭ) моделирования балки с пьезоэлементами, после чего на основе полученных численно характеристик объекта синтезируется еще одна модальная система управления, превосходящая по эффективности все созданные ранее системы.

В конечно-элементном пакете ANSYS было создано две модели балки с пьезоэлементами, исследуемой в эксперименте: первая модель состоит из одномерных балочных элементов, вторая – из трехмерных. Общий вид данных моделей, а также укрупненный фрагмент 3D-модели, включающий конструкцию закрепления балки, представлены на Рисунке 8.

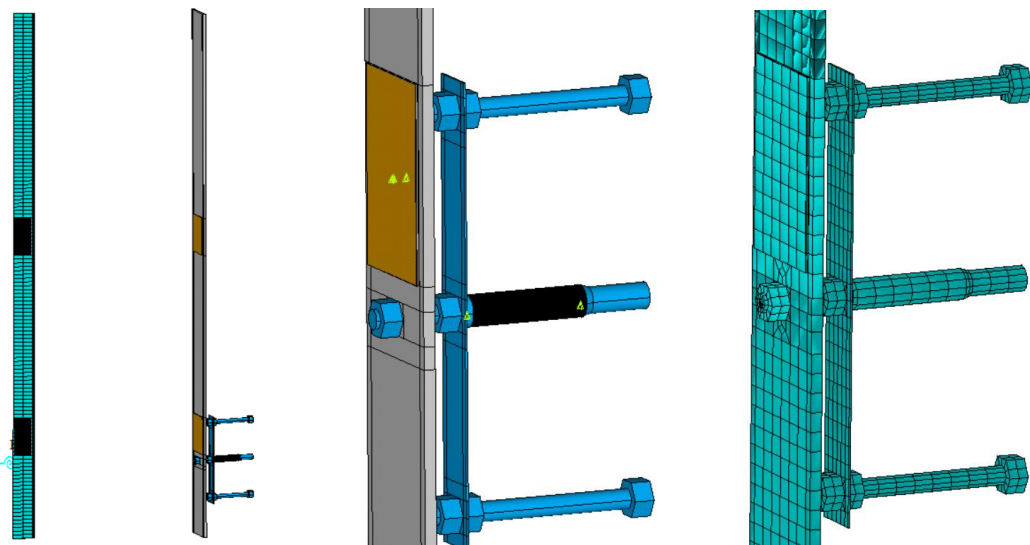


Рисунок 8. Фрагменты конечно-элементных моделей балки с пьезоэлементами

Балочная модель значительно проще 3D-модели: первая содержит 161 элемент и 283 узла, вторая – 3534 элемента и 21088 узлов. Разница между данными моделями состоит также в том, что в балочной модели закрепление балки моделируется двумя пружинами, работающими на смещение и на поворот, кроме того, в ней не моделируется пьезоэффект: вместо этого воздействие с помощью актуаторов задается в виде приложения к балке сил и моментов, а сигнал сенсоров вычисляется по изгибной деформации пьезоматериала. В 3D-модели конструкция закрепления балки присутствует полностью вместе с пьезотолкателем, а пьезоэффект моделируется напрямую с помощью задания свойств пьезоматериала. В обеих моделях для всех форм колебаний используется одинаковый коэффициент демпфирования, равный 0.002.

В результате КЭ-моделирования были получены АЧХ и ФЧХ объекта управления, соответствующие различным вариантам возбуждения и измерения сигнала. АЧХ, соответствующие каждому из двух актуаторов и каждому из двух сенсоров, полученные экспериментально и методом КЭ-моделирования, представлены на Рисунке 9. Синие линии соответствуют данным эксперимента, красные – балочной, а зеленые – 3D-модели. Видно, что результаты КЭ-моделирования в целом хорошо отражают картину, наблюдаемую в эксперименте, при этом вторая модель дает более точный результат, чем первая, поэтому в дальнейшем исследовании используется именно она.

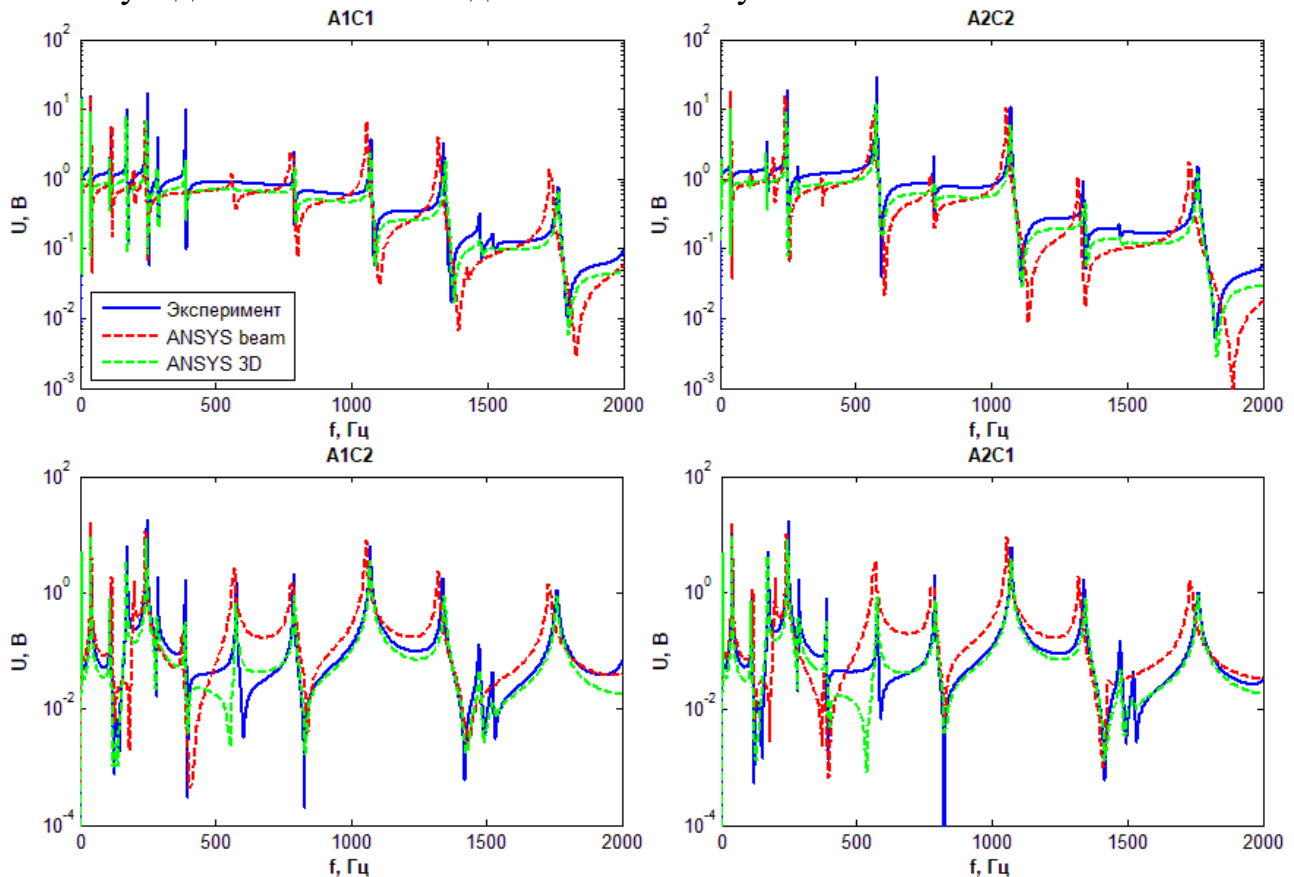


Рисунок 9. АЧХ актуатор – сенсор, полученные экспериментально и численно

Далее была поставлена задача на основе характеристик объекта, полученных численно, синтезировать новую модальную систему управления. Основное отличие данной системы от систем, протестированных ранее в главе 3, состоит в том, что при ее создании подбор оптимальных параметров передаточных функций в контурах управления осуществляется не экспериментально, а численно, с использованием алгоритма, применяемого для синтеза законов управления в главе 4. Это позволяет значительно оптимизировать процесс синтеза законов управления и повысить эффективность создаваемых систем. Результаты работы созданной таким образом модальной системы управления №2 в сравнении с синтезированными ранее системами вблизи первого и второго резонансов представлены на Рисунке 10. Данные АЧХ получены численно без использования результатов эксперимента, поэтому они несколько отличаются от экспериментальных, представленных на Рисунке 5.

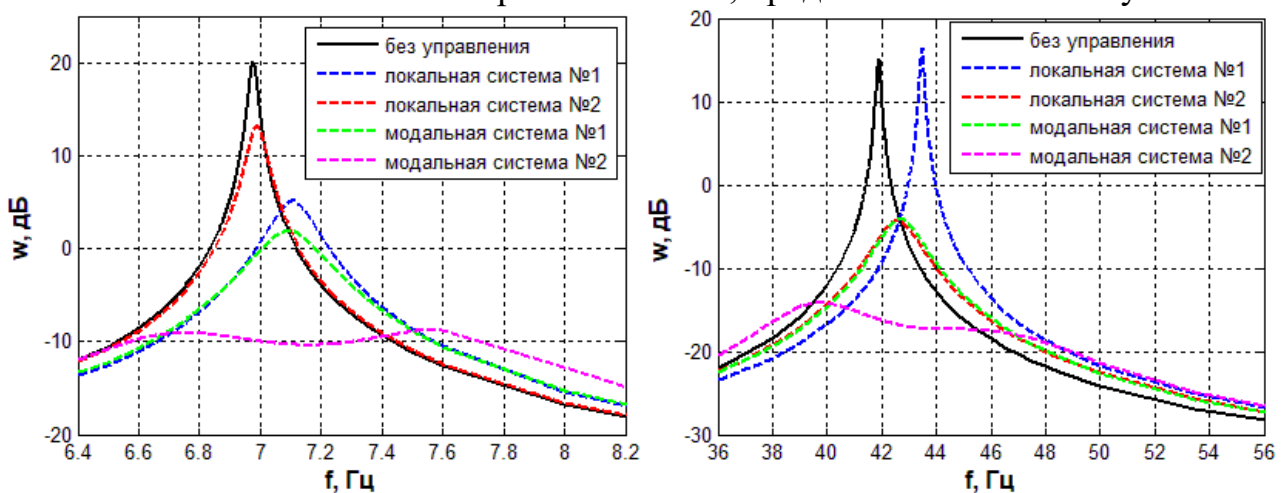


Рисунок 10. АЧХ упруго заземленной балки с управлением и без для разных систем управления вблизи первого (слева) и второго (справа) резонансов (расчет)

Видно, что модальная система №2 значительно превосходит по эффективности все остальные системы, в том числе модальную систему №1: снижение амплитуды колебаний на первом и втором резонансах составляет соответственно 28.9 и 29.2 дБ у системы №2 против 18.3 и 19.3 дБ у системы №1. Такая высокая эффективность обусловлена использованием при синтезе модальной системы №2 процедуры, оптимизирующей параметры передаточных функций с целью наиболее успешного гашения вынужденных колебаний балки. Таким образом, использованный способ численного моделирования колебаний балки с управлением является мощным инструментом, позволяющим проектировать эффективные системы управления.

Основные результаты

1) Проведено экспериментальное исследование, включающее практическую реализацию локального и модального подходов к управлению

колебаниями упругой системы на примере гашения вынужденных изгибных колебаний тонкой металлической балки. В рамках данного исследования собрана экспериментальная установка, включающая металлическую балку, упруго защемленную в промежуточном сечении, и используемые для целей управления пьезоэлектрические сенсоры и актуаторы, соединенные через дискретный контроллер. На основании анализа собственных форм изгибных колебаний балки, полученных экспериментально и численно, определено оптимальное расположение на балке сенсоров и актуаторов.

2) Предложен и применен в рамках выполненного исследования метод экспериментальной идентификации, позволяющий определить оптимальные параметры линейного преобразования измеренных и управляющих сигналов, которое обеспечивает разделение форм колебаний распределенного объекта в контурах модальной системы управления. Полученные в результате использования данной процедуры значения параметров обеспечили качественное разделение первой и второй форм изгибных колебаний балки в модальной системе управления.

3) Отработана методика синтеза передаточных функций для контуров обратной связи локальных и модальных систем управления, основанная на численном моделировании работы данных систем без проведения эксперимента. Данная методика позволяет программным образом сопоставлять результаты работы систем управления с различными параметрами передаточных функций и определять наиболее эффективные из них. Полученные с использованием данной методики системы способны эффективно снижать амплитуду резонансных колебаний как на первой, так и на второй собственной частоте изгибных колебаний балки.

4) В результате проведенного экспериментального исследования продемонстрировано преимущество модального подхода к управлению перед локальным, проявляющееся в том случае, когда необходимо бороться с вынужденными колебаниями системы в диапазоне частот, содержащем несколько собственных частот объекта.

5) Выводы экспериментального исследования о преимуществе модального подхода над локальным подтверждаются численным исследованием, проведенном для другой постановки задачи, предполагающей шарнирное закрепление балки и иное расположение на ней сенсоров и актуаторов. Данное исследование проводилось в программном комплексе Matlab в разложении по собственным формам колебаний. Корректность использования указанного метода подтверждается конечно-элементным моделированием данной системы.

6) Проведено сравнение результатов использования при создании системы управления различных моделей работы сенсоров и актуаторов. Показано, что при синтезе системы управления колебаниями распределенного объекта необходимо применять полную модель работы сенсоров и актуаторов, учитывающую влияние данных элементов на собственные формы колебаний

объекта, поскольку в случае использования упрощенной модели эффективность управления значительно снижается.

7) В программном комплексе ANSYS созданы две конечно-элементные модели металлической балки с пьезоэлементами, исследуемой в эксперименте: балочная и 3D-модель. Полученные методом КЭ-моделирования частотные характеристики объекта управления оказались близки к экспериментальным. На основе КЭ-моделирования синтезирована модальная система управления, превосшедшая по эффективности системы, созданные в рамках эксперимента: разница между рассматриваемыми системами в уровне гашения колебаний составила 10 дБ на первом и втором резонансах.

8) Разработана методика проектирования модальных систем управления распределенным упругим объектом, осуществляющих гашение вынужденных резонансных колебаний данного объекта. Данная методика включает в себя определение матриц – синтезатора и анализатора форм, обеспечивающих отдельное управление различными формами колебаний объекта, а также синтез регуляторов для отдельных контуров управления, обеспечивающих эффективную работу системы управления на резонансных частотах, соответствующих указанным формам колебаний. Эффективность указанной методики продемонстрирована численно на примере гашения вынужденных колебаний тонкой металлической балки, закрепленной в одной точке, с помощью двух пьезоэлектрических сенсоров и двух актуаторов: снижение амплитуды колебаний балки на первом и втором резонансах составило 29 дБ.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1) Федотов А.В. Применимость упрощенных моделей пьезоэлементов в задаче активного гашения колебаний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. №2. С. 126-132.

2) Федотов А.В. Численное моделирование гашения колебаний распределенной системы с помощью пьезоэлементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 142-155.

3) Беляев А.К., Полянский В.А., Смирнова Н.А., Федотов А.В. Процедура идентификации при модальном управлении распределенным упругим объектом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 2. С. 69-81.

Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных (Scopus, Web of Science, Springer):

4) Fedotov A.V. Active vibration suppression of Bernoulli-Euler beam: experiment and numerical simulation // Cybernetics and Physics. 2019. V. 8. № 4. P. 228-234.

5) Polyanskiy V.A., Belyaev A.K., Smirnova N.A., Fedotov A.V. Influence of Sensors and Actuators on the Design of the Modal Control System. In: Matveenko V.,

Krommer M., Belyaev A., Irschik H. (eds) Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines. 2019. Springer, Cham. – P. 127-135.

6) Belyaev A.K., Fedotov A.V., Irschik H., Nader M., Polyanskiy V.A., Smirnova N.A. Experimental study of local and modal approaches to active vibration control of elastic systems // Structural Control and Health Monitoring. 2018. V. 25. № 2. e2105.

Публикации в других изданиях и материалах научных конференций:

7) Федотов А.В. Экспериментальное сравнение локального и модального подходов к управлению распределенными системами // Сборник трудов IV Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов АО «КБСМ» «Старт в будущее – 2017».

8) Федотов А.В. Проблемы идентификации при биоморфном управлении распределенными системами // Сборник трудов XVIII Конференции молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением». 2016. – С. 271-278.

9) Fedotov A.V. Biomorph approach in application to vibration control of continuous systems // The International Conference "Advanced Problems in Mechanics – 2016". – P. 107-118.

10) Полянский В.А., Смирнова Н.А., Федотов А.В. Развитие модального подхода к синтезу алгоритмов управления распределенными системами // Сборник трудов 9-й Российской мультikonференции по проблемам управления: конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах». 2016. – С. 72-82.

11) Belyaev A.K., Fedotov A.V., Polyanskiy V.A., Smirnova N.A. Experimental study of local and modal approaches to active vibration control of elastic systems // International Symposium Automated Systems and Technologies. 2015. – P. 73-80.

12) Беляев А.К., Полянский В.А., Смирнова Н.А., Федотов А.В. Теоретические и экспериментальные исследования биоморфных алгоритмов управления распределенными системами // Сборник трудов 7-й Российской мультikonференции по проблемам управления: конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах». 2014. – С. 96-105.

13) Федотов А.В., Беляев А.К. Экспериментальное исследование различных подходов к управлению распределенными системами // Сборник трудов научного форума с международным участием XLIII «Неделя науки СПбПУ». 2014. – С. 61-64.