На правах рукописи

Котов Виталий Владимирович

# АКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ БИОМОРФНОГО ПОДХОДА

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт – Петербург - 2015

**Работа выполнена** в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Математики и естественно-научных дисциплин» Института международных образовательных программ

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
**Арсеньев Дмитрий Германович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
кафедры проектирования и безопасности
компьютерных систем ФГАОУ ВО Санкт-Петербургского
национального исследовательского университета
информационных технологий, механики и оптики
**Ткалич Вера Леонидовна**

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры прикладной кибернетики
Санкт-Петербургского Государственного университета
**Кузнецов Николай Владимирович**

Ведущая организация: ФГБУН «Институт Проблем Машиноведения РАН»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» июня 2015 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.13 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенном по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, уч. корп., ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенном по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. Автореферат диссертации доступен на официальном сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» (http://www/spbstu.ru/).

Автореферат разослан «___» _____ 2015 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.229.13
доктор технических наук, профессор Григорьев Борис Семёнович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** При управлении распределёнными объектами сложной структуры в мехатронике применяется подход, связанный с анализом собственных частот и форм колебаний и последующей расстановкой приводов в узлах и пучностях таким образом, чтобы можно было обеспечить максимум снижение амплитуды колебаний в заданном частотном диапазоне. Такой подход является одним из основных в мехатронике. Вместе с тем он не позволяет решать задачи мехатроники как типовые, так как для каждого конкретного объекта требуется проведение длительного численного и экспериментального исследования для определения мест расположения приводов и датчиков. Это мешает широкому внедрению методов управления распределёнными объектами. Вместе с тем задача борьбы со случайными широкополосными колебаниями механических строительных конструкций в связи с увеличением внешнего воздействия на них, требует более точного управления. В этой связи актуальным является разработка нового подхода к управлению распределёнными механическими объектами, с использованием современных методов теории управления, основанных на проведении декомпозиции управляемых систем. Эти методы получили существенное развитие в работах М. Г. Захарова, Т. Ю. Захаровой, А. А. Первозванского и других учёных.

В качестве такого алгоритма предлагается биоморфный подход, при котором поведение механического объекта представляется подобным поведению биологического объекта с учётом всех его преимуществ с точки зрения теории управления. Реализация алгоритма биоморфного управления происходит в несколько этапов. Первый этап – построение моделей и проектирование системы управления. Вторым этапом должно стать определение собственных форм движения. На третьем этапе необходимо построить матрицу, столбцами которой является комбинация управляющих воздействий, создающая в управляемом объекте собственную форму с номером, равным номеру столбца.

После определения всех параметров можно вести управление по произвольному числу модулей форм (обратных связей), ориентируясь, например, на точность управления. Причем подключать и отключать дополнительные обратные связи можно динамически в процессе управления, что позволяет получать новые эффекты. Например, при увеличении уровня шумов можно отключить высокочастотные формы для большей устойчивости системы.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы состоит в создании математической модели эффективных биоморфных алгоритмов активного управления упругими механическими системами, а также в разработке вычислительных методов и программного обеспечения для получения количественных характеристик рассматриваемых явлений и процессов. Для достижения этой цели необходимо решить ряд важных задач

механики, теории управления и вычислительной математики. Одна из таких задач связана с адекватным математическим моделированием широкополосных случайных колебаний рассматриваемых механических систем. В общем случае их движение описывается системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений с частными производными. Другая задача работы состоит в построении оптимальных робастных алгоритмов подавления случайных колебаний и исследовании влияния параметров построенных алгоритмов на качество управления.

**Научная новизна.** Для активного подавления случайных колебаний упругого объекта предложен биоморфный алгоритм на базе модального подхода. Разработан комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента, основанный на реализации биоморфного алгоритма. Исследована и показана робастность биоморфного алгоритма подавления случайных колебаний механического объекта, в качестве которого была взята математическая модель балки Бернулли. Создана математическая модель робастного квазиоптимального управления колебаниями распределённых систем на базе биоморфного подхода. В ходе исследования были выявлены преимущества последовательной оптимизации при биоморфном контроле по сравнению с другими методами синтеза оптимального управления.

**Практическое значение полученных результатов.** Разработанная в данной диссертационной работе математическая модель активного управления упругими механическими системами была использована при создании экспериментальной установки по активному гашению вибраций упругой балки, которая впоследствии была внедрена в учебный процесс университета Иоганна Кеплера в г. Линц (Австрия).

Помимо этого одной из интересных прикладных задач, в которой они могут быть использованы, является сейсмическая защита стратегических и гражданских строительных объектов от сильных землетрясений. Другой актуальной задачей применения исследуемых подходов является управление случайными колебаниями различного вида кабелей и тросов, которые, например, имеют широкое применению в конструкции подвесных мостов.

Построенные в данной диссертационной работе квазиоптимальные биоморфные алгоритмы подавления широкополосных случайных колебаний помимо того, что могут быть использованы в вышеописанных прикладных задачах, также имеют большое практическое значение с точки зрения математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

**Личный вклад соискателя.** Автором диссертационной работы проведён корреляционный анализ математической модели внешнего воздействия, приложенного к рассматриваемому модельному объекту, разработан алгоритм применения математической

модели классического подхода поиска оптимального регулятора для случая локального и биоморфного управлений колебаниями упругого объекта и исследовано влияние параметров построенных алгоритмов на качество управления рассматриваемой системы. Автором диссертации также был проведён сравнительный анализ результатов моделирования подавления вибраций механического объекта различными подходами управления.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Математическая модель биоморфных алгоритмов управления и описание численного метода проведения декомпозиции системы управления;
2. Результаты моделирования подавления гармонических колебаний модельного объекта с помощью биоморфных алгоритмов управления, реализованных в программном комплексе Matlab;
3. Сравнение результатов моделирования биоморфного управления с результатами управления при использовании стандартного мехатронного подхода;
4. Результаты моделирования подавления случайных колебаний модельного объекта с помощью биоморфных алгоритмов управления и их сравнение с результатами управления при использовании стандартного мехатронного подхода;
5. Результаты исследования робастности биоморфных алгоритмов управления при неточности задания параметров системы управления;
6. Математическая модель алгоритма синтеза оптимального (линейный квадратичный регулятор) и квазиоптимального (биоморфное управление) подходов управления и результаты её применения для подавления случайных широкополосных колебаний модельного объекта.

**Достоверность** всех полученных в диссертации результатов подтверждается строгой математической постановкой задачи с использованием общепринятых обыкновенных дифференциальных уравнений из теории колебаний упругих тел, соотношений теории автоматического управления, методов анализа из теории случайных процессов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференция и научных форумах: Шестой всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2012), Научно-практическая конференция с международным участием «XLI Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2012), International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, ИПМАШ, 2013), Научно-практическая конференция с международным участием «XLII Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2013), Международный молодёжный научный форум «Ломоносов». XXI

Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», (Москва, МГУ, 2014), 7-я Российская мультиконференция по проблемам управления, (Санкт-Петербург, ЦНИИ Электроприбор, 2014).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 3 в виде статей в ведущих специализированных научных журналах, рекомендованных ВАК.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключительных выводов и списка литературы. Объём диссертации составляет 178 страниц машинописного текста с 87 рисунками. Список литературы содержит 175 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** кратко сформулированы актуальность темы, цели и задачи исследования, а также практическое значение полученных результатов. Приводится обзор структуры разделов диссертации.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена обзору существующих методик подавления широкополосных случайных колебаний распределённых объектов.

Судя по приведённым научным работам, разработанные модификации существующих стандартных алгоритмов и абсолютно новые подходы позволяют добиться очень точного управления распределёнными системами, но эта точность достигается лишь при использовании значительных вычислительных ресурсов. Этой проблемы лишён модальный подход, который как раз и применяется в данной диссертационной работе, так как в данном случае управление производится по отдельным нескольким модам колебаний системы, тем самым сильно ограничив число решаемых обыкновенных дифференциальных уравнений.

Во **второй главе** даётся описание моделирования процесса в виде суммы большого числа гармонических функций с разными частотами и сравнение его с помощью спектрального и корреляционного анализа с широкополосным случайным шумом, а точнее с белым шумом.

Для моделирования белого шума с гауссовым распределением по амплитуде использовалась соответствующая встроенная функция программного комплекса Matlab.

Были построены графики автокорреляционной функции (n – ограничивает область значений данной функции) и спектральной плотности ($f$ - частота) моделируемого случайного процесса (рисунки 1 и 2).

Процесс в виде суммы большого количества гармоник имеет следующий вид:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{1000} \sin\left(\left(k_0 + 0.0401ki\right)t\right),$$

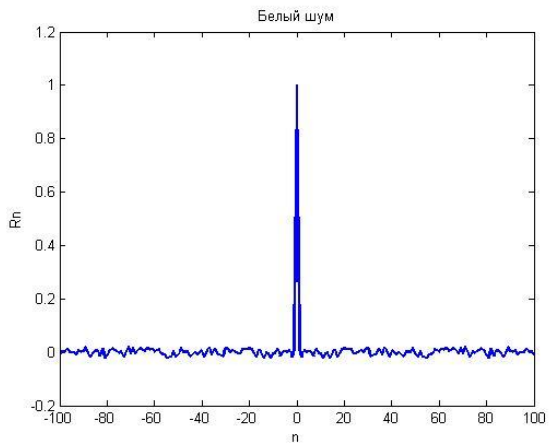


Рисунок 1. Автокорреляционная функция случайного процесса.

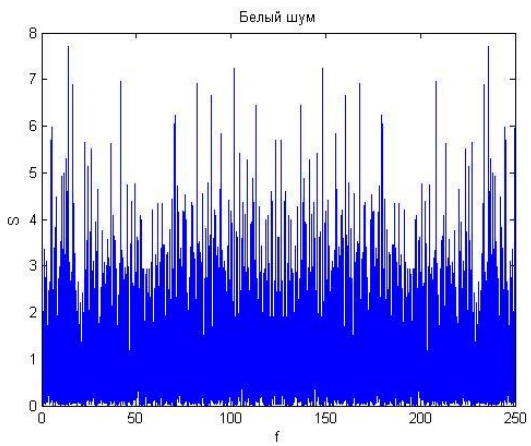


Рисунок 2. Спектральная плотность случайного процесса.

где с помощью параметров $k_0$, $k$ можно управлять частотным диапазоном процесса.

Добавим для сравнения график автокорреляционной функции исследуемого процесса к аналогичному графику белого шума, а также построим график его спектральной плотности (рисунки 3 и 4).

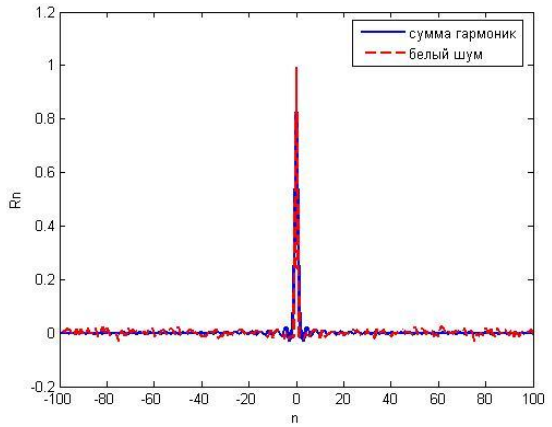


Рисунок 3. Автокорреляционные функции белого шума и процесса в виде суммы гармоник ($k_0 = 1,\ k = 50$).

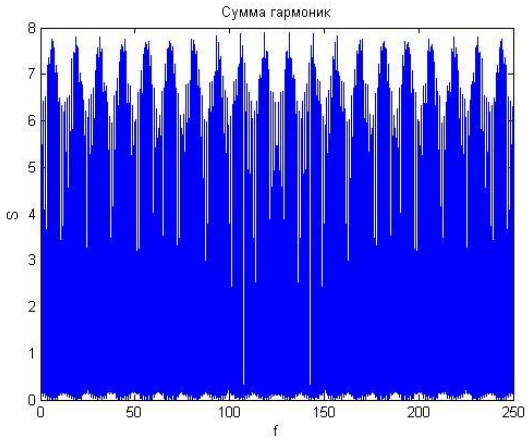


Рисунок 4. Спектральная плотность процесса в виде суммы гармоник ($k_0 = 1,\ k = 500$).

Из рисунка 4 видно, что при значительном расширении частотного диапазона исследуемого квазислучайного процесса, его энергетический спектр начинает приобретать равномерный характер, а гармоники всех его частот выравниваются по интенсивности, как и в случае белого шума (рисунок 2). Анализ графика на рисунке 3 показывает, что автокорреляционная функция данного процесса также имеет схожий характер с автокорреляционной функцией белого шума (рисунок 1), более того, практически совпадает с нею. Поэтому можно утверждать, что процесс, представляющий собой сумму большого числа

гармоник, близок по своим свойствам к широкополосному случайному шуму и вполне отражает в виде модели случайное воздействие, которое может иметь место в реальном мире.

Смоделированный процесс в виде суммы большого числа гармоник будет использоваться в данной диссертации в качестве внешнего случайного воздействия, приложенного к рассматриваемому механическому объекту управления.

Постановка задачи, определение основы биоморфных алгоритмов и описание модельного объекта приводится в **третьей главе**.

Рассматривается управляемый механический объект в линейном приближении. Уравнения такого объекта имеют вид

$$\begin{aligned} &\dot{X} = AX + BU + Gf \\ &Y = CX \\ &X(0) = X_0 \end{aligned} \tag{1}$$

где $X$ - вектор переменных состояния объекта размерности $[n]$, $Y$ - вектор наблюдений размерности $[m]$, $U$ - вектор управлений размерности $[l]$, $f$ - вектор внешних воздействий размерности $[\tilde{n}]$, $X_0$ - вектор начальных условий, $A$ - матрица линеаризованной системы уравнений, описывающей объект управления, размерности $[n \times n]$, $G$ - матрица внешних воздействий линеаризованной системы уравнений размерности $[n \times \tilde{n}]$, $B$ - матрица управления линеаризованной системы уравнений размерности $[n \times l]$, $C$ - матрица наблюдателя размерности $[m \times n]$.

Стандартный мехатронный подход предполагает, что датчики обратных связей расположены в местах приложения управляющих воздействий, таким образом, числа $m$ и $l$ совпадают и можно построить $m$ контуров обратной связи в каждом из которых организовать управление вида

$$u_i = -H_i y_i \tag{2}$$

Где $u_i$ - компонента вектора управления, $y_i$ - компонента вектора наблюдения, $H_i$ - оператор системы управления в $i$ - том контуре обратной связи.

Такой подход обладает некоторыми недостатками, которые можно исключить, проведя декомпозицию системы (1). Для этого домножим правую и левую её части на матрицу неособого преобразования $S$, которую задают собственные формы движения упругого объекта, такую, что $SAS^{-1}$ имеет диагональный вид. Сделаем замену вида $SX = q$, тогда получим систему

$$\begin{aligned} \dot{q} &= SAS^{-1}q + SBU + SGf \\ Y &= CS^{-1}q \\ q(0) &= SX_0 \end{aligned} \tag{3}$$

где $q$ - вектор коэффициентов собственных форм движения упругого объекта размерности $[N]$, который заменит вектор переменных состояния. Он имеет вид:

$$q = S(C^T C)^{-1} C^T Y \tag{4}$$

где $S(C^T C)^{-1} C^T$ - матрица пересчета вектора наблюдений в модули собственных форм движения.

В данной диссертационной работе применяется совершенно новый подход на основе биоморфных алгоритмов, в рамках которого предлагается выбирать управления $u$ в виде $u = kF(q^* - q)$, где $q^*$- внешнее задание на значение модулей формы, $k$ - коэффициент усиления, $F$ - матрица, такая, что $SBF$ имеет диагональную структуру. Выбор матрицы $F$ - отдельный вопрос. Допустим, что такой выбор возможен. Тогда из системы (3) получим

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \Lambda_A q + k\Lambda_B (q^* - q) + SGf \\ q &= S(C^T C)^{-1} C^T Y \\ q(0) &= SX_0 \end{aligned} \tag{5}$$

где $\Lambda_A$ и $\Lambda_B$ - диагональные матрицы.

В качестве модельного объекта выбрана балка Бернулли, шарнирно опертая по концам. Модель балки изображена на Рисунке 5.

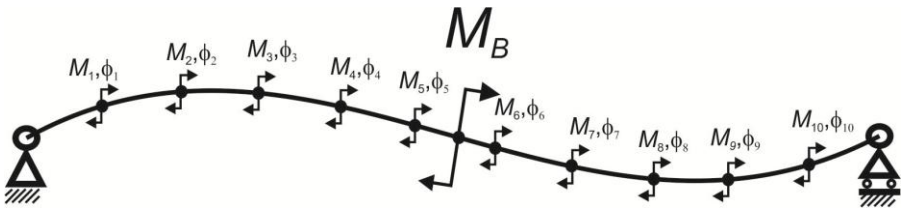


Рисунок 5. Модель управляемой балки с десятью приводами

Колебания балки возбуждаются приложением в ее середине изгибающего момента $M_B$, изменяющегося по заданному закону. Угол поворота касательной к средней линии балки $\varphi_l = \varphi(z_l, t)$, $l = 1,...,N$ в каждый момент времени измеряется в десяти поперечных сечениях ($N$=10), выбранных равномерно по длине балки, исключая концы. В этих же сечениях могут быть приложены управляющие моменты $M_l$, с целью уменьшить амплитуду изгибных колебаний балки.

Математическая модель биоморфного алгоритма выглядит следующим образом:

После задания всех необходимых параметров касательно характеристик управляемого объекта (в данном случае – модель балки) и определения свободных форм колебаний объекта, происходит заполнение соответствующими элементами матрицы *F* и *S*:

$$F = \vartheta_k\left(z_l\right)\left(\vartheta_k\left(z_l\right)\right)^T, \qquad S = \vartheta_k\left(z_l\right),$$

где $\vartheta_k(\mathrm{z}) = -\frac{k\pi}{L}\sqrt{\frac{2}{\rho L}}\cos\frac{k\pi z}{L}$ - формы угла поворота при свободных колебаниях балки, *k* – число форм колебаний, $z$ - продольная координата, отсчитываемая от левого конца балки, $\rho$ - масса единицы длины балки, $L$ - длина балки, $E$ - модуль Юнга материала.

Далее происходит заполнение матрицы управления *U*:

$$U = \vartheta_k\left(z_l\right)KM^T,$$

где $K = diag\left\{K_l\right\}$ - матрица коэффициентов обратной связи, $M = FS$

и вычитание её из матрицы $A_{rs}$:

$$A_{rs} = \begin{bmatrix} 0_{k\times k} & 1_{k\times k} \\ -\left(\Lambda_{eg_v} + U\right) & -N_d \end{bmatrix},$$

где $0_{k\times k}$, $1_{k\times k}$ - нулевая и единичная матрицы размерности $\left[k\times k\right]$, $\Lambda_{eg_v} = diag\left\{\lambda_k^2\right\}$,

$\lambda_k = k^2\pi^2\sqrt{\frac{EI}{\rho L^4}}$ - частоты свободных колебаний балки, $I$ - момент инерции поперечного сечения, $N_d = diag\left\{\gamma_k\right\}$ - матрица коэффициентов демпфирования $\gamma_k = \frac{2}{\omega}$,

В итоге получаем новую систему уравнений, которую необходимо численно проинтегрировать:

$$\dot{X} = A_{rs}X + f_d$$

где $X = \begin{bmatrix} \beta_k\left(t\right) \\ \dot{\beta}_k\left(t\right) \end{bmatrix}$, $\beta_k(t)$ - главные координаты, $f_d = \begin{bmatrix} 0_k \\ f_k \end{bmatrix}$, $f_k = \int_0^L \mu\vartheta_k(\mathrm{z})dz$ - вектор возмущающего воздействия, $\mu$ - распределенный внешний момент.

Выводим измерения датчиков углов: $\varphi\left(\mathrm{z},t\right) = \sum_{k=1}^{m}\beta_k\left(t\right)\vartheta_k\left(z_l\right)$

Эффективности предложенного биоморфного алгоритма управления, реализованного в программном комплексе Matlab, сначала была проверена на примере, когда распределённый внешний момент принимался в виде одиночной гармоники, а потом на случае, когда

распределённый внешний момент, изгибающий балку, изменялся по квазислучайному закону в виде суммы большого числа гармоник, смоделированному в предыдущей главе (рисунок 6).

На рисунке 7 представлены результаты биоморфного управления по двум собственным формам на фоне результатов управления с обратной связью по измерениям углов поворота.

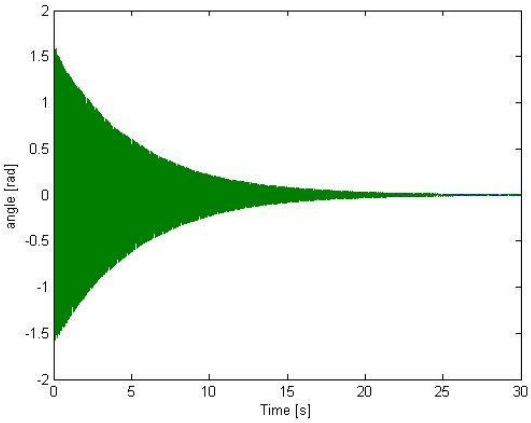


Рисунок 6. Осциллограмма вынужденных случайных колебаний балки без управления.

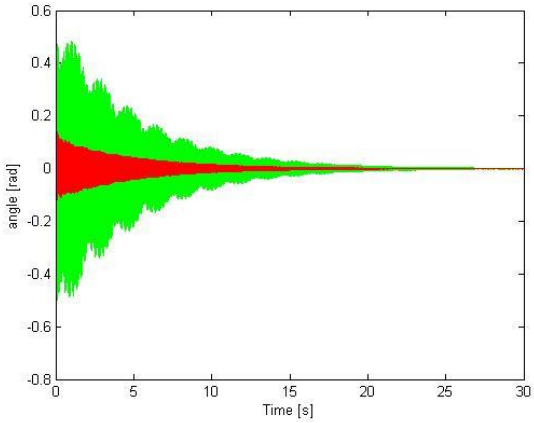


Рисунок 7. Результаты биоморфного управления (2 формы) на фоне результата управления по десяти локальным контурам.

Посмотрим, как влияет добавление форм колебаний на качество биоморфного управления, а точнее на уровень значения амплитуды колебаний (рисунок 8).

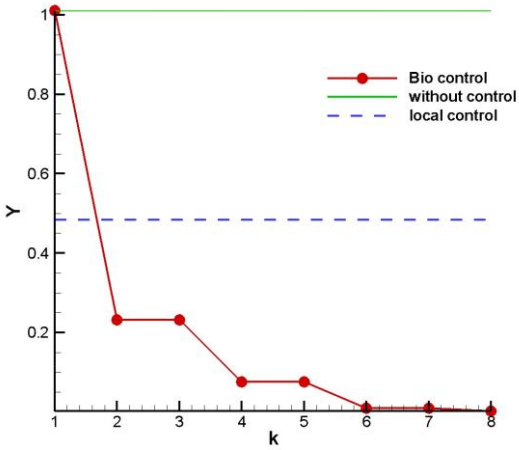


Рисунок 8. Уровень амплитуды колебаний (без управления, при локальном и биоморфном управлении) в зависимости от количества форм, по которым производится управление.

Анализ полученных результатов показывает, что при сопоставимом числе обратных связей и тех же коэффициентах усиления точность биоморфного управления на два порядка выше, чем у стандартного способа с набором локальных контуров управления.

Варьирование элементов матрицы $S$ позволит определить, насколько робастными являются биоморфные алгоритмы управления. Возьмём их равными с точностью до знака формы колебаний в рассматриваемом сечении (рисунок 9).

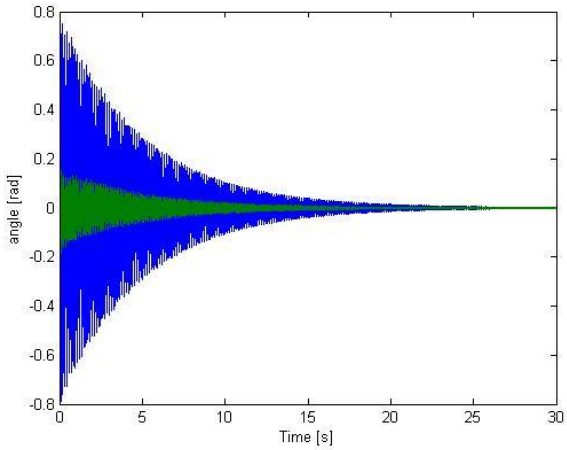


Рисунок 9. Осциллограммы сигналов с датчиков №2 и №4 по 2-м формам. Параметры управления взяты с точностью до знака формы колебания.

Из данных осциллограмм видно, что существенного ухудшения управления при уменьшении точности задания параметров системы управления, не происходит. Это доказывает робастность построенных алгоритмов управления.

Полученные результаты математического моделирования были экспериментально проверены на специально созданной для использования в учебном процессе установке по биоморфному подавлению вибраций упругой балки (рисунок 10).

В качестве датчиков и актуаторов использовались пьезокерамические пластинки, наклеенные на балку. На рисунке 11 представлены амплитудно-частотные характеристики экспериментальных данных и результатов моделирования биоморфного управления ($A$ – амплитуда колебаний балки). Из данного рисунка видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает правильность реализации математической модели биоморфных алгоритмов.

Основу **четвёртой главы** составляет описание методов оптимизации параметров систем управления и выявление наиболее пригодных для биоморфных алгоритмов. Выбранный метод, основанный на применении линейно-квадратичного регулятора, также используется для подавления случайных вибраций модельного объекта. Его суть заключается в следующем.

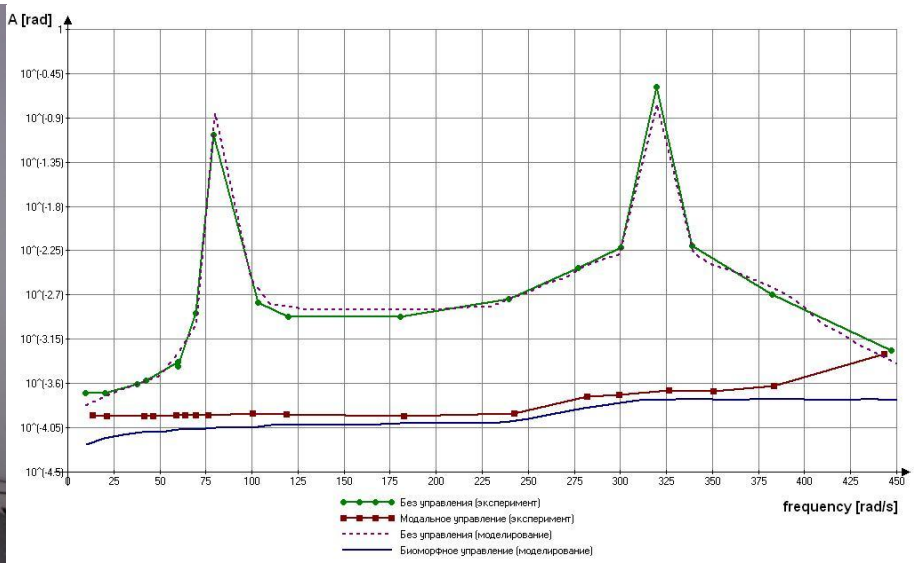


Рисунок 10. Экспериментальная установка

Рисунок 11. АЧХ системы в области первого и второго резонансов

Имеется динамическая система первого порядка

$$\dot{X} = AX + BU + Gf \tag{6}$$

где $X(t) = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}$ - вектор состояния, $A = \begin{bmatrix} 0_{k\times k} & 1_{k\times k} \\ -\lambda_k^2 & -\gamma_k \end{bmatrix}$ - матрица системы, $B = \begin{bmatrix} 0_{k\times l} \\ \vartheta_k(z_l) \end{bmatrix}$ - матрица управления, $G = 1_{k\times k}$ - матрица внешнего воздействия, $f$ – внешнее воздействие.

Уравнение состояния системы (6) с учётом теории выражения линейно-квадратичного регулятора преобразуется к виду $\dot{X} = \left(A - BK^*\right)X + Gf$

где оптимальный регулятор имеет вид $K^* = R^{-1}B^T P^*$,

а матрица $P^*$ является решением матричного квадратного уравнения Лурье - Риккати:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

Весовые матрицы были выбраны следующим образом:

$$Q = 1_{k\times k},\ R = diag\left\{r_l = 0.0001,\ l = 1,\ldots,\ 10\right\}.$$

<u>Математическая модель алгоритма синтеза линейно-квадратичного регулятора и биоморфного подхода имеет вид:</u>

Определив свободные формы колебаний объекта, заполняются матрицы *F* и *S*:

$$F_1 = \vartheta_k(z_l)\left(\vartheta_k(z_l)\right)^T, \quad F = \begin{bmatrix} 0_{k\times k} & 0_{k\times k} \\ F_1 & F_1 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0_{k\times l} \\ \vartheta_k(z_l) \end{bmatrix}$$

Происходит формирование матрицы управляющих воздействий:

$$U = M \cdot K^{*} \cdot D, \qquad M = FS, \qquad D = \begin{bmatrix} 1_{k\times k} & 0_{k\times k} \\ 1_{k\times k} & 0_{k\times k} \end{bmatrix}$$

и вычитание её из матрицы $A_{rs}$: $A_{rs} = \begin{bmatrix} 0_{k\times k} & 1_{k\times k} \\ -\Lambda_{eg_v} & -N_d \end{bmatrix} - U$

необходимой для численного решения системы: $\dot{X} = A_{rs} X + f_d, \qquad X = \begin{bmatrix} \beta_k(t) \\ \dot{\beta}_k(t) \end{bmatrix}$

Выводим измерения датчиков углов: $\varphi(z,t) = \sum_{k=1}^{m} \beta_k(t)\, \vartheta_k(z_l)$.

Результаты моделирования и управления представлены на рисунках 12-14.

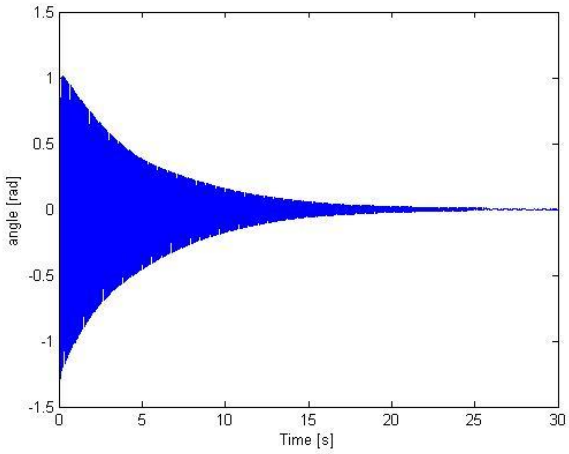


Рисунок 12. Осциллограмма вынужденных случайных колебаний балки без управления.

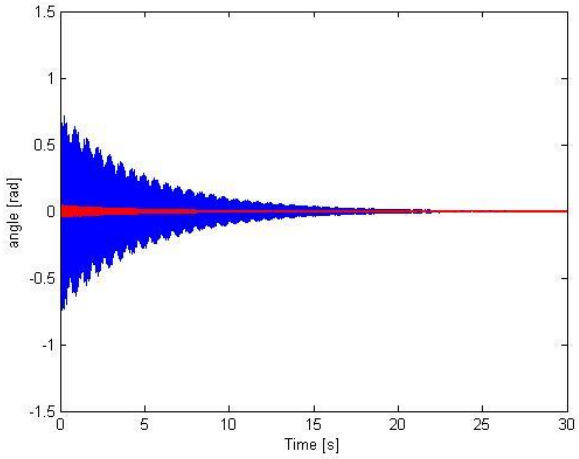


Рисунок 13. Результат биоморфного управления (4 формы) на фоне результата управления по десяти локальным контурам.

Результаты моделирования показывают, что применение синтеза оптимального (линейный квадратичный регулятор) и квазиоптимального (биоморфное управление) подходов управления позволяет получить высококачественные системы подавления вибраций, вызванных широкополосным случайным воздействием. Также было выяснено, что в данном случае существует только определённое количество форм, для которых можно проводить оптимизацию. Дальнейшее добавление форм колебаний может не только ухудшить качество управления (увеличить значение амплитуды колебаний объекта), но и вовсе привести к потере вычислительной устойчивости.

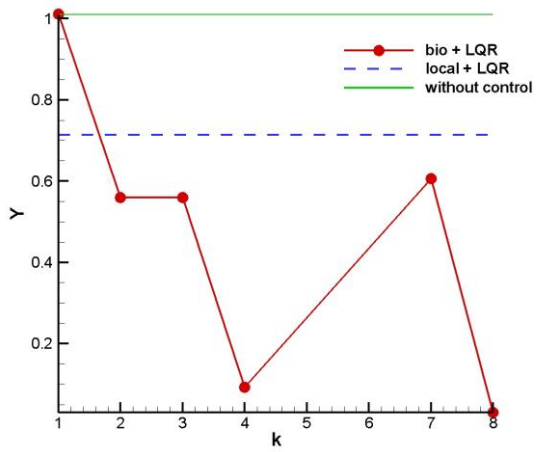


Рисунок 14. Уровень амплитуды колебаний.

В **заключении** сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы:

1. Предложен биоморфный алгоритм активного подавления случайных колебаний упругого объекта на базе модального подхода.
2. При сопоставимом числе обратных связей и тех же коэффициентах усиления эффективность биоморфного подавления случайных колебаний на два порядка выше эффективности управления с локальными обратными связями.
3. Робастность биоморфных алгоритмов подавления колебаний была показана при моделировании неточности параметров системы управления.
4. Последовательное добавление одной формы колебания не сильно влияет на качество управления, а при добавлении двух форм, качество подавления случайных колебаний может улучшиться даже на порядок.
5. Результаты моделирования биоморфного управления колебаниями упругой балки хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на учебной установке.
6. Применение синтеза оптимальных (линейный квадратичный регулятор) и квазиоптимальных (биоморфные алгоритмы) подходов управления позволяет получить высококачественные системы подавления вибраций, вызванных широкополосным случайным воздействием, но только при ограниченном количестве форм колебаний.

**Публикации автора по теме диссертации**

В журналах перечня ВАК:

1. Арсеньев Д. Г., Котов В. В., Полянский В. А., Смирнова Н. А. «Биоморфное управление в задаче о виброизоляции случайных колебаний» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Информатика. Телекоммуникации. Управление.- 2(169).- (2013).- с. 112-117.

2. Беляев А. К., Котов В. В. Полянский В. А., Смирнова Н. А. «Биоморфное управление в задаче об активном подавлении колебаний» // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия.- 2014.- Том. 1.- №1.- с. 96-106.

3. Арсеньев Д. Г., Котов В. В., Полянский В. А. «Квазиоптимальное биоморфное подавление случайных колебаний упругих объектов» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Информатика. Телекоммуникации. Управление.- 5(205) .- (2014) .- с. 102-109.

В сборниках тезисов и материалах конференций, научных изданиях:

4. Котов В. В. «Активные системы подавления колебаний строительных конструкций» // Материалы шестого всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных, 09-12 октября 2012 г.: тезисы доклада. Санкт-Петербург (Россия), 2012 г.- с. 26-27.

5. Котов В. В., Арсеньев Д. Г. «Подавление колебаний свободно опёртого стержня» // Материалы научно-практической конференции с международным участием, часть XIII, 03-08 декабря 2012 г.: тезисы доклада.Санкт-Петербург (Россия), 2012 г.- с. 256-257.

6. Arseniev D. G., Kotov V. V., Polyanskii V. A., Smirnova N. A. «Biomorphic Control of stochastic vibrations», // Proceedings of the XLI Summer School – Conference Advanced Problems in Mechanics, 01-06 июля 2013 г.: материалы конференции. Санкт-Петербург (Россия), 2013 г.- с. 449-456.

7. Котов В. В., Арсеньев Д. Г. «Робастное управление стохастическими колебаниями шарнирно опёртой балки» // Материалы научно-практической конференции с международным участием, 02-07 декабря 2013 г.: тезисы доклада. Санкт-Петербург (Россия), 2013 г.- с. 124-126.

8. Belyaev A. K., Kotov V. V., Polyanskii V. A., and Smirnova N. A. «Biomorphic Control in Problem on Active Suppression of Vibrations», // Vestnik St. Petersburg University. Mathematics.- 2014.- Vol. 47.- No. 1.- pp. 39-46.

9. Арсеньев Д.Г., Котов В.В., Полянский В.А. «Робастные оптимальные алгоритмы подавления случайных колебаний распределённых систем» // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2014)», 7-9 октября 2014г. ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», Санкт-Петербург (Россия), 2014 г.- с. 453-460.