

На правах рукописи



Кутузов Никита Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ
СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧЕ
ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ВИБРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

1.3.4 – Радиофизика

1.3.7 – Акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

- Научный руководитель: **Родионов Александр Алексеевич**
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный исследовательский
центр институт прикладной физики им.
А.В.Гапонова-Грехова Российской академии
наук»
- Официальные оппоненты: **Мякиньюв Александр Валерьевич**
доктор технических наук, профессор, ведущий
научный сотрудник ПАО «НПО «Алмаз»
имени академика А.А.Расплетина»
- Иголкин Александр Алексеевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры автоматических систем
энергетических установок им.академика РАН
Владимира Павловича Шорина Самарского
университета
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения
им. А. А. Благонравова Российской академии
наук

Защита состоится 30 сентября 2026г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.03 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп.1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу <https://diss.unn.ru/1620>

Автореферат разослан

2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор

Клюев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Задача локализации источников поля является классической для всех типов источников, излучающих волны различной природы. Такая задача возникает, например, в акустике, в геофизике, в приложении к радиоволнам – в том числе радиоастрономии, радиолокации. В виброакустике локализация источников повышенной виброактивности – важная задача, возникающая при диагностике и обслуживании конструкций и механизмов. Необходимость локализации источников часто возникает, например, при мониторинге состояния строительных конструкций, борьбе с шумом на судах, оценке нагрузок на фюзеляж и крыло в авиастроении, определении состояния двигателей. Решение подобной задачи предполагает разработку основ и принципов дистанционной диагностики, основанных на современных методах обработки сигналов и решения обратных задач. Создание, теоретическое и экспериментальное обоснование данных методов и принципов, обладающих высокой степенью универсальности, является сферой изучения радиофизики и акустики.

Локализация виброисточников производится на основе измерений вибрационного или акустического полей в наборе контрольных точек конструкции (местоположение которых, как правило, не совпадает с местоположением виброисточников). Определение характеристик источников или среды по измеренным в разных точках значениям поля предполагает использование пространственной обработки сигналов. Она находит широкое применение во множестве областей, в том числе виброакустике. Многие методы пространственной обработки, являющиеся инструментом и предметом разработки радиофизики, первоначально предложенные в одной области, могут успешно применяться и стать стандартными для другой. При этом может потребоваться адаптация методов для данной конкретной задачи (с учетом модели сигнала, типа волн, среды и т.д.), подразумевающая, как правило, создание новых способов анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех (что соответствует области изучения статистической радиофизики). Модификация существующих алгоритмов и разработка новых на основе известных принципов, с последующей апробацией в решении обратных задач (в том числе, локализации источников), могут существенно улучшить качество определения неизвестных параметров.

В данной работе рассматриваются методы локализации виброисточников, основанные на измерениях вибрационного поля. Общим для подобных методов решения задачи локализации является сопоставление экспериментально измеренных характеристик (ускорение, перемещение) с характеристиками, полученными с помощью численного расчета или предварительной экспериментальной калибровки. Положение источника, для которого модельное вибрационное поле максимально похоже на экспериментальное, считается наиболее вероятным. Локализация путем подобного сопоставления может производиться как во временной области, так и в частотной. Таким образом, решение задачи локализации виброисточников основано на применении методов пространственной обработки сигналов. Отметим, что задача оценки временной реализации виброисточника тесно связана с задачей локализации: во многих работах задачи локализации и реконструкции воздействия решаются совместно.

Методы локализации виброисточника можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, не связанные с использованием численной модели конструкции. Они предполагают использование определенной экспериментальной информации о характеристиках конструкции. Это могут быть, например, функции коэффициентов передачи (frequency response function, FRF) для данной задачи, полученные путем предварительной калибровки (W. Bartlett), характеристики дискретных составляющих спектров механизмов, расположенных на данной конструкции, собственные частоты и формы колебаний. Главным недостатком данных методов является необходимость предварительной калибровки (зачастую невозможной), а также необходимость наличия баз данных спектров и возможные проблемы селекции отдельных источников при работе нескольких механизмов.

Ко второй группе относятся методы, использующие численную модель конструкции. Их можно сравнить с аналогичными методами пространственной обработки MFP (Matched – Field Processing), часто применяемыми в гидроакустике (С. Kilseok). Методами, широко применяемыми в MFP-техниках (например, с помощью оценщика Бартлетта), производится сравнение экспериментальных данных с акселерометров с модельными данными вибрации, создаваемой установленным в определенной точке источником (G. Turek). Точка установки виброисточника определяется по максимуму функции неопределенности, рассчитанной соответствующим оценщиком. Модельные данные могут быть получены как аналитически, так и (в случае более сложных конструкций) с помощью конечно-элементного моделирования (КЭМ). Для сопоставления модельных (полученных с помощью конечно-элементного моделирования) и экспериментальных данных с целью локализации и реконструкции вибрационного воздействия часто используется (например, Q. Li, П. В. Артельный и др.) метод наименьших квадратов (МНК). Локализация может производиться во временной или частотной области. Для минимизации влияния возможного рассогласования (которое неизбежно присутствует в той или иной мере) модели и реальной функции Грина используются техники регуляризации.

Стоит отметить и наличие других, разнообразных, техник локализации виброисточника. Используются, к примеру, методы машинного обучения (W. Staszewski), модификации методов релевантных векторов (W. Feng).

Таким образом, тематика определения положения источника виброактивности является весьма актуальной. Существует ряд проблем, связанных с локализацией виброисточников. В имеющихся публикациях редко рассматривается постановка задачи локализации, когда в конструкции или исследуемом объекте находится одновременно несколько виброисточников. Принципиальным ограничением большинства используемых в работах алгоритмов является требование единственности источника.

Даже при наличии единственного виброисточника существенной проблемой является возможная некорректная локализация. В случае, когда ошибка локализации слишком велика, целесообразно говорить об аномальной (С. Фалькович) ошибке. В случае некорректной локализации основными причинами являются, как правило, низкое отношение сигнал/шум (ОСШ) и рассогласование экспериментальной (реальной) и модельной функций коэффициентов передачи (функций Грина). Проблема низкого ОСШ в виброакустике имеет особое значение в задачах, связанных с мониторингом состояния конструкций (в зарубежной литературе – Structural Health Monitoring (SHM)): именно в условиях данных задач слабый источник вибрации

может маскироваться множеством существенно более сильных посторонних воздействий. В большинстве работ, посвященных поиску виброисточника с использованием численной/аналитической модели конструкции, задача локализации не рассматривается в свете максимизации выходного ОСШ (за счет в первую очередь временного накопления сигнала). К примеру, рассматривается задача локализации широкополосного источника вибрации в механоакустической конструкции (П.В.Артельный), но при этом не уделяется внимания методам временного накопления и оптимальной обработке вибрационного сигнала в присутствии шума.

Отметим, что в виброакустике могут рассматриваться как детерминированные, так и случайные воздействия. В большинстве реальных сигналов присутствует в той или иной степени случайная компонента. Недостаточно исследованным остается вопрос об оптимальной обработке случайных сигналов в виброакустических приложениях. При этом, известно, что оптимальная обработка полностью случайного сигнала также является оптимальной в условиях априорного незнания формы сигнала, и методы, разработанные для случайных сигналов, оказываются универсальными и применимыми для множества других случаев.

При высоком ОСШ главной причиной ошибок локализации становится рассогласование реальной конструкции и ее модели, подобное рассогласование в той или иной степени присутствует всегда. Отметим, что даже после доводки и (или) верификации КЭМ (А.С.Суворов) оставшееся различие может приводить к существенным ошибкам локализации. При этом проблема рассогласования в задачах локализации виброисточников тесно связана с пространственной конфигурацией и состоянием вибродатчиков. Остановимся на этом замечании подробнее.

Известно, что для одной конкретной КЭМ, с конкретным рассогласованием, при удачном расположении датчиков, их количество, необходимое для решения виброакустической задачи, может быть сравнительно небольшим (например, 10–15). При этом неудачное расположение такого же количества датчиков, когда ряд датчиков установлен в узлах нескольких мод или в точках существенного несоответствия реальной конструкции и КЭМ, может привести к неверным выводам при диагностике. Таким образом, подбор подходящей геометрии расположения датчиков весьма важен. Существует большое число работ, посвященных оценке качества пространственных конфигураций датчиков при решении различных задач виброакустики (например, M.Pastor, G.Heo и др.).

Однако, часто конфигурация расположения датчиков фиксирована, а их пространственное расположение ограничено техническими возможностями. В этом случае актуальной становится задача отделения «хороших» датчиков от «плохих», которые могут ухудшить результат решаемой задачи локализации. Появление «плохих» датчиков может быть связано с выходом из строя самих преобразователей, их неудачным расположением (например, в узлах мод, либо в точках большого рассогласования с моделью) или изменением характеристик конструкции и механизма со временем, уже после создания численной модели. Самое важное, что определение таких «плохих» датчиков может существенно нивелировать влияние упомянутого ранее рассогласования между реальной конструкцией и КЭМ на ошибки локализации.

Показания таких «плохих» вибродатчиков будем называть выбросами или аномалиями. Наличие аномалий говорит о непригодности датчика для дальнейшей работы. Под аномалией датчика в данном случае мы имеем в виду не только его аппаратную неисправность, но и то, что в точке установки датчика велика разница

между модельными и экспериментальными данными. Отметим, что при решении задачи обнаружения и классификации аномалий данных с вибродатчиков могут использоваться методы обработки показаний датчиков (Н.Тех), широко применяемые и в отличных от виброакустики областях (геофизика, метеорология, беспроводная связь и т.д.).

Для решения задачи обнаружения и классификации выбросов часто используются алгоритмы, основанные на методе главных компонент (РСА). Данный метод (Н.Hotelling) заключается в уменьшении размерности задачи путем нахождения компонент, создающих ортогональный базис для данной задачи. Метод главных компонент в приложении к рассматриваемой проблеме нашел применение во множестве разных областей. В виброакустике данный метод может быть использован для обнаружения и локализации дефекта в конструкции (Р.Де Вое). Часто предполагается, что дефект в определенной области конструкции можно ассоциировать с появлением аномалии в показаниях соответствующего вибродатчика. Подобный «плохой» вибродатчик и предполагаемую область дефекта можно обнаружить путем сравнения углов между подпространствами (G.Golub), образованными главными компонентами (при определенных условиях главные компоненты совпадают с модами конструкции) принятого сигнала в обычном и дефектном состояниях конструкции. Устранение «плохого» вибродатчика ведет к существенному уменьшению угла (т.е. «разницы») между подпространствами. Вообще «плохим» могут считать как датчик, ассоциированный с определенным дефектом самой конструкции, так и датчик, вышедший из строя. В отсутствие априорной информации о причине выбросов может стать актуальной задача классификации аномалий.

Помимо РСА, для обработки выбросов могут быть использованы, к примеру, машинное обучение, вейвлет – преобразования, кластерный анализ (например, Z.Kunpeng, A.Diez-Olivan и др.).

Применение обработки «плохих» показаний датчиков при решении задачи локализации виброисточников требует дополнительного исследования. Распространенные методы обнаружения аномалий датчиков основываются, прежде всего, на экспериментальных данных. При этом для успешного решения обратной виброакустической задачи и минимизации эффектов рассогласования характеристик конструкции и КЭМ необходимо совмещение и экспериментальной и модельной (априорной) информации.

Можно заключить, что, хотя тема локализации виброисточников получила освещение во множестве работ в теоретическом и прикладном аспектах, ряд ключевых для успешного решения обратной задачи вопросов остаются малоисследованными. Решению вышеуказанных проблем обработки сигналов при наличии нескольких одновременно работающих виброисточников, в присутствии шумов, некорректных измерений на датчиках и рассогласования модели и конструкции посвящена настоящая работа.

Цель диссертационной работы

В соответствии с изложенным выше кругом проблем основной целью диссертационной работы является разработка устойчивых к рассогласованию методов локализации одного и нескольких виброисточников с применением пространственной обработки сигналов и алгоритма определения «плохих»/аномальных вибродатчиков.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка методов локализации единственного виброисточника на основе метода максимума правдоподобия. Апробация данных методов. Анализ влияния ОСШ на качество локализации.
2. Разработка алгоритма локализации нескольких одновременно работающих виброисточников. Численное моделирование и экспериментальная апробация данного алгоритма. Анализ результатов локализации, оценка влияния параметров алгоритма и исследуемых конструкций на качество локализации.
3. Разработка алгоритма определения аномалий данных на вибродатчиках, предполагающего совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Апробация данного алгоритма в задаче локализации источников с оценкой эффективности алгоритма для поиска ошибок показаний датчиков разного типа.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, векторного анализа и теории матриц, а также методы математического и компьютерного моделирования. Особое внимание в диссертации уделено экспериментальной апробации предложенных методов и алгоритмов, которая подтвердила их эффективность, а также исследованию и анализу ошибок локализации.

Научная новизна диссертационной работы

1. На основе принципа максимума правдоподобия разработан ранее не применявшийся метод локализации единственного виброисточника. Для сложных механоакустических конструкции (для воспроизведения вибрационных характеристик требуется не менее $10^4 \div 10^5$ узлов) в исследуемом частотном диапазоне экспериментально подтверждена его эффективность. Показано, что разработанный метод обладает меньшими погрешностями оценок параметров виброисточника (местоположение и ориентация), в сравнении с известными методами.
2. Предложена модификация метода MUSIC (Multiple Signal Classification), позволяющая решить задачу локализации нескольких работающих виброисточников. Показано, что данная модификация обладает большей эффективностью при решении задачи локализации с двумя источниками по сравнению с методами наименьших квадратов и максимума правдоподобия, рассчитанными на единственный источник, притом что данные методы для модели двух источников неприменимы ввиду высокой вычислительной сложности. Показано, что суммирование целевых функций модифицированного метода MUSIC, рассчитанных для разных частотных полос, улучшает результат локализации. Модифицированный метод апробирован в экспериментах с несколькими конструкциями.
3. Для решения задачи определения различного рода аномалий данных на вибродатчиках и минимизации их влияния на результат решения обратной задачи предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным. Главной особенностью метода является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Эффективность алгоритма продемонстрирована в задаче локализации виброисточников в разных конфигурациях. Разработанный алгоритм может быть использован и в других приложениях, где решение обратной задачи происходит с использованием численной или аналитической модели.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

На основе известных принципов пространственной обработки сигналов проведены разработка, исследование и экспериментальная апробация методов локализации виброисточников. Разработанные методы локализации могут быть использованы при проектировании, обслуживании, акустической диагностике конструкций и механизмов. Разработан и экспериментально апробирован новый проекционный алгоритм определения аномальных измерений на датчиках. Алгоритм экспериментально апробирован в различных задачах и может быть использован во множестве приложений радиофизики и акустики. Результаты работы использовались при разработке программного обеспечения высокопроизводительного численного моделирования виброакустических характеристик и акустической диагностики «САТЕС» в рамках соответствующего гранта-субсидии Минпромторга.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждаются их сравнением с результатами, полученными с помощью математического моделирования, экспериментальной апробации, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям радиофизики и акустики.

Апробация результатов

Результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

XXIII-я научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2019.

24-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). 2019

XXII-я сессия Российского акустического общества. Москва, 2019.

XXII-ой конкурс молодых ученых ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2020

V Международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин DVM-2020»

XXVIII-я научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2024.

XXVI-я сессия Российского акустического общества. Москва, 2024.

Основные материалы диссертации опубликованы в 9 работах. Среди них 2 статьи в журналах, включенных в библиографические базы данных Web of Science, Scopus («Acoustical Physics» [A1], «Physics of wave phenomena» [A2]), 1 статья опубликована в журнале, включенном в перечень ВАК (специальность 1.3.4 – Радиофизика, физико-математические науки) и базу данных RSCI («Журнал радиоэлектроники» [A3]) и 6 работ, представляющие собой опубликованные материалы докладов [A4-A9] на научных конференциях. Также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [A10].

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в получении всех результатов, представленных в данной диссертационной работе. Он участвовал в постановке задач, непосредственной разработке методов, проведении аналитических расчетов, компьютерного моделирования, экспериментальной апробации, а также в обсуждении полученных результатов и подготовке их к печати.

Структура и объем диссертации

Настоящая диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 104 страницы, включая 44 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 82 наименований.

Положения, выносимые на защиту

1. Полученный метод пространственной локализации единственного виброисточника на основе принципа максимального правдоподобия, с использованием конечно-элементного моделирования, обладает меньшими погрешностями оценок параметров виброисточника, в сравнении с известными методами.
2. Предложенная модификация метода пространственной обработки MUSIC позволяет разрешить источники вибрации в существенно большем числе частотных полос, по сравнению с ранее применявшимися методами, при решении задачи локализации с использованием конечно-элементного моделирования.
3. Предложенный проекционный алгоритм пространственной обработки сигналов, основанный на совмещении конечно-элементной модели и экспериментальных данных, позволяет существенно улучшить результат локализации виброисточников за счет удаления аномальных измерений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** освещается современное состояние проблемы локализации виброисточников. Представлены обзор литературы по теме исследований, цели и задачи работы, научная новизна диссертации, научная и практическая значимость работы, методы исследования, структура и объем работы, а также достоверность представленных в работе результатов, их апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

В **первой главе** рассмотрена задача локализации единственного виброисточника. На основе принципа максимума правдоподобия сформулированы метод локализации единственного виброисточника, а также упрощенный подход (в сравнении с методом максимума правдоподобия) – метод наименьших квадратов в применении к первому собственному вектору для локализации виброисточника. Проведено исследование эффективности вышеуказанных методов в зависимости от отношения сигнал/шум. Приведены результаты численного моделирования и апробации методов на экспериментальных конструкциях (для верифицированных и не верифицированных КЭМ). Приведены оценки необходимого числа полос и вибродатчиков для успешной локализации. Представлена информация о применении предложенных методов в разработанном программном обеспечении.

В **разделе 1.1** дано описание постановки задачи локализации виброисточника. Имеется некоторая механоакустическая система (конструкция), для которой построена конечно-элементная модель, состоящая из определенного числа узлов. Будем считать, что в некотором узле расположен виброисточник. Этот виброисточник ориентирован определенным образом в пространстве, а сигнал, возбуждающий виброисточник, является широкополосным белым гауссовским шумом. В данном исследовании в качестве виброисточника использовался пьезоэлектрический возбудитель. Будем также считать, что в каждой узкой частотной полосе амплитудно-частотная характеристика виброисточника близка к константе, а сигнал, соответственно, является белым шумом. В K точках конструкции находятся вибродатчики

(акселерометры), а принимаемый сигнал подвергается узкополосной фильтрации на частоте f_0 (см. рисунок 1).

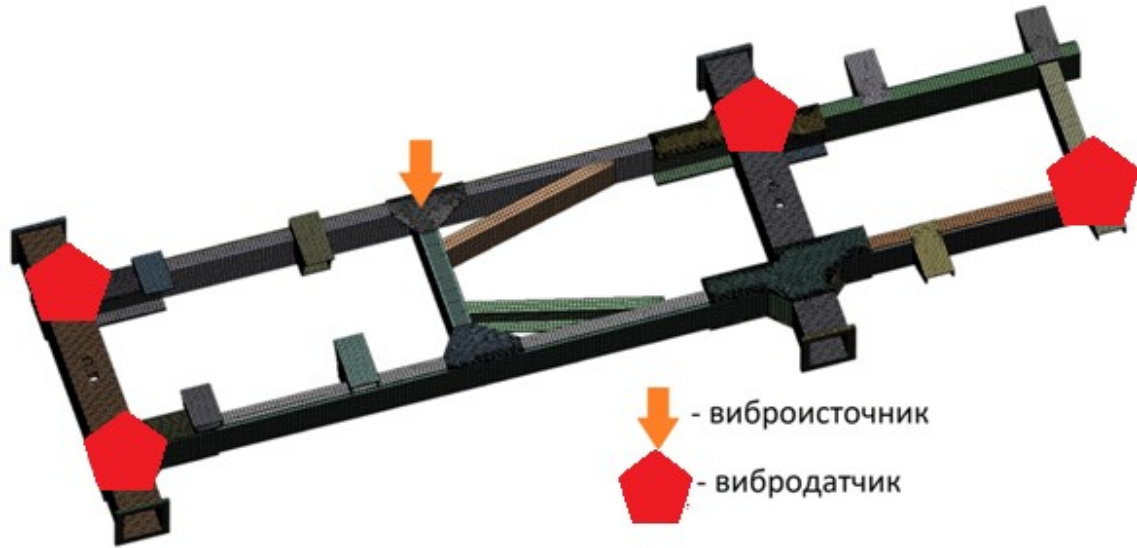


Рис. 1. Механоакустическая конструкция, иллюстрация задачи локализации виброисточника. Метками разных цветов показаны вибродатчики и виброисточник

Модель принимаемого сигнала на частоте f_0 в момент времени с номером j можно записать как следующий $K \times 1$ вектор:

$$\mathbf{v}_j = p_j \mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F} + \xi_j, \quad j = 1 \dots J, \quad (1)$$

где p_j – временная форма узкополосного сигнала, представляющая комплексный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ_s^2 , (определяющей интенсивность вибрационного источника), \mathbf{F} – вектор 3×1 нормированных комплексных составляющих силы ($\mathbf{F}^H \mathbf{F} = 1$), ξ_j – временные отсчеты аддитивного белого гауссова шума с нулевым средним и дисперсией σ_0^2 , $\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i)$ – $K \times 3$ матрица комплексных коэффициентов передачи из узла с координатами x_i, y_i, z_i (координаты виброисточника) в узлы, соответствующие контрольным точкам (в которых находятся вибродатчики). Каждая из K строчек матрицы \mathbf{A} содержит три комплексных коэффициента передачи (например, (a_{1x}, a_{1y}, a_{1z})) от каждой из составляющих силы, приложенной в данном узле, в соответствующую контрольную точку. Матрица \mathbf{A} получается путем численного моделирования с использованием конечно-элементной модели конструкции. Для уменьшения разницы между модельной и реальной матрицами \mathbf{A} предварительно может проводиться процедура доводки ряда характеристик модели. После доводки коэффициенты передачи модели становятся заметно ближе к коэффициентам передачи реальной конструкции. При этом сохраняется некоторое рассогласование между модельными и реальными данными.

В разделе 1.2 представлено описание метода локализации единственного виброисточника на основе принципа максимума правдоподобия. Для модели (1) в случае отсутствия рассогласования оптимальным является принцип максимума правдоподобия (МП). Метод максимума правдоподобия заключается в максимизации

ции функции правдоподобия (ФП) w , логарифм которой для модели (1) записывается следующим образом:

$$\ln w = -J \left[\ln \det(\sigma_s^2 \mathbf{A} \mathbf{F} \mathbf{F}^H \mathbf{A}^H + \sigma_0^2 \mathbf{I}) + \text{tr}((\sigma_s^2 \mathbf{A} \mathbf{F} \mathbf{F}^H \mathbf{A}^H + \sigma_0^2 \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{K}}) \right], \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{K}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^H$ – выборочная корреляционная матрица принятого сигнала. Не-

известными параметрами здесь являются (x, y, z) , σ_0^2 , σ_s^2 , \mathbf{F} . После дифференцирования по неизвестным параметрам и подстановки решений в функцию (2) получим ФП, зависящую только от координат вибрационного источника (x, y, z) . В результате процедура поиска координат источника приобретает следующий вид:

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \arg \max_{x, y, z} S_{ML}(x, y, z); \quad S_{ML}(x, y, z) = -(K-1) \ln(\text{tr} \hat{\mathbf{K}} - \lambda) - \ln \lambda, \quad (3)$$

где λ – максимальное собственное число матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{K}} \mathbf{A}$. Оценка положения источника производится в данном случае в одной частотной полосе. В случае широкополосного сигнала целесообразно и оптимально суммировать значения целевой функции (3), полученные для разных частот.

В разделе 1.3 представлен альтернативный методу максимума правдоподобия, другой, упрощенный метод. Он заключается в следующем. Вначале находится собственный вектор \mathbf{V} выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала, соответствующий максимальному собственному числу. Этот вектор является максимально правдоподобной оценкой сигнального вектора (первого слагаемого в (1)) в предположении его полной неизвестности (В.И.Турчин). Далее для определения неизвестных параметров источника используется метод наименьших квадратов (МНК). В нем в качестве модели используется вектор $\bar{\mathbf{F}} = \alpha \mathbf{F}$, где α – масштабный коэффициент. Этот коэффициент вводится из-за того, что в обработке используется нормированный собственный вектор, то есть $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = 1$. Подобный подход обладает чуть меньшей эффективностью по сравнению со строгой МП-оценкой. Отметим, что при высоком ОСШ разница практически нивелируется, так как в таком случае точность локализации определяется в первую очередь рассогласованием реальной и модельной матрицами \mathbf{A} . При этом упрощенный метод обладает значительной меньшей вычислительной сложностью: в 2–3 раза для экспериментальных конфигураций, используемых в настоящей работе. Целевая функция метода наименьших квадратов в рассматриваемой ситуации записывается следующим образом:

$$S(x, y, z, \bar{\mathbf{F}}) = (\mathbf{A} \bar{\mathbf{F}} - \mathbf{V})^H (\mathbf{A} \bar{\mathbf{F}} - \mathbf{V}), \quad (4)$$

а решение сводится к её минимизации: $S(x, y, z, \bar{\mathbf{F}}) \rightarrow \min_{x, y, z, \bar{\mathbf{F}}}$.

После решения уравнения для частных производных $\frac{\partial S}{\partial \bar{\mathbf{F}}} = 0$, подстановки решения в (4), а также учитывая, что $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = 1$, получим решение в следующем виде

$$S_1(x, y, z) = \mathbf{V}^H \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{V} \rightarrow \max_{x, y, z}. \quad (5)$$

Максимизируемая функция в (5) является, по сути, коэффициентом корреляции между модельными данными и экспериментом. Узел с наибольшим значением ко-

эфициента корреляции является местом наиболее вероятного расположения источника. Так же, как и в случае функции (3), целесообразно суммировать значения (5) по набору частотных полос.

В разделе 1.4 представлены результаты апробации разработанных методов. Вначале проведено имитационное моделирование с простой модельной пластиной, а после – имитационное моделирование и экспериментальная апробация с двумя механоакустическими конструкциями. Длина первой конструкции составляет около 0,8 м, ширина – 0,23 м, высота – 0,14 м, число узлов около 25000, число элементов – около 6000. В экспериментах в качестве вибродатчиков использовались пьезоэлектрические акселерометры, установленные в контрольных точках модели, подключенные к системе сбора данных и ориентированные по одной из осей по нормали к поверхности модели. В реальном и численном экспериментах были рассмотрены различные положения виброисточника. В эксперименте с первой конструкцией на ней было установлено 22 акселерометра, а на виброисточнике размещался еще один акселерометр для контроля мощности. Сигнал на виброисточник подавался в течение около 2 мин. Численный расчет модельной матрицы производился в диапазоне 100–800 Гц с шагом в 1 Гц. В эксперименте записанный с вибродатчиков сигнал был подвергнут узкополосной фильтрации, частотные полосы были взяты в диапазоне 100–800 Гц с шагом 1 Гц (всего 700 полос), ширина полосы при узкополосной фильтрации – 0,33 Гц. ОСШ определялось как разница уровня сигнальных и шумовых собственных чисел корреляционной матрицы принятого сигнала в каждой частотной полосе в эксперименте и составляло, в зависимости от полосы, 40–75 дБ. Расчеты проводились, как для неverified КЭМ, так и для verified КЭМ, после доводки. На рисунке 2 представлены фото конструкции с установленными акселерометрами и единственным виброисточником и распределение целевой функции (5), суммированной по всем полосам анализа (А), а также зависимость ошибки локализации по методу (5) от частоты. Под ошибкой локализации, показанной на рисунке 2, Б, подразумевается расстояние между реальным положением источника и его оценкой. Чертой отмечен уровень ошибки 0,12 м, при ошибке выше, в данной полосе локализация считается неудачной (аномальная ошибка). Предельная величина ошибки выбиралась равной характерному пространственному размеру целевой функции локализации. Отметим, что основные ошибки локализации возникают вблизи собственных частот конструкции. Это связано с тем, что в такой ситуации при любом воздействии возбуждается почти одна и та же форма колебаний. При определенном удалении полосы анализа от собственных частот конструкции, и при наличии вклада нескольких собственных форм колебаний в результирующее колебание, результат локализации практически гарантированно будет хорошим. Следует отметить высокий уровень среднего коэффициента корреляции (более 0,9) в точке максимума, что говорит о хорошем согласовании модельных и экспериментальных данных. Относительно сравнения эффективности локализации при verified и неverified КЭМ, следует отметить, что существенная разница в качестве локализации проявляется только при значительном снижении числа датчиков.

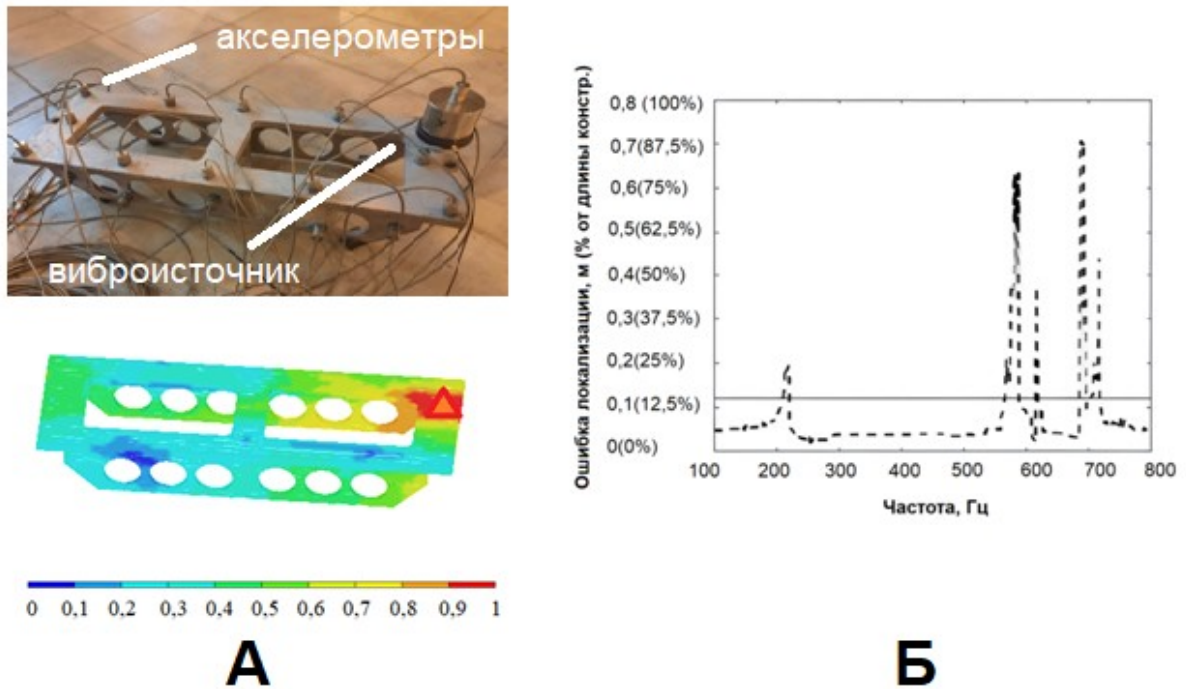


Рис. 2. Первая конструкция с установленными акселерометрами и единственным виброисточником и распределение целевой функции (5), суммированной по всем полосам анализа (А). Треугольником отмечен максимум целевой функции (оценка положения). Зависимость ошибки локализации по методу (5) (в метрах и процентах от длины конструкции) от частоты в эксперименте (Б). Расчет проводился с использованием неverified КЭМ

Принципиальными преимуществами методов (3) и (5), в сравнении с ранее применявшимися методами (МНК без накопления), является возможность эффективного накопления вибрационного сигнала во времени, что особенно актуально при низком ОСШ. В эксперименте, результаты которого показаны выше, ОСШ в каждой полосе было достаточно высоким и главной причиной ошибок было рассогласование модели и конструкции, а также плохая обусловленность задачи вблизи собственных частот. В таком случае эффективную локализацию можно произвести и по короткому фрагменту реализации (т.е. при $J=1$ в (1)). Эффективность методов в таком эксперименте практически одинакова.

Ситуация меняется при повышении уровня шума. Для сравнения эффективности методов (3), (5) и МНК без накопления (т.е. (5) для единичного отсчета) было проведено имитационное моделирование в диапазоне 100–200 Гц, в котором ОСШ было значительно ниже, чем в эксперименте, и не превышало нескольких дБ. В численном эксперименте использовалось 6 вибродатчиков, число временных отсчетов $J=20$, полезный сигнал представлял собой белый гауссов шум с нулевым средним. Из 100 полос при использовании метода максимума правдоподобия (3) удачными (без аномальной ошибки) оказались 55, МНК для первого собственного вектора (5) – 48, МНК без накопления – 24. Пример локализации на частоте 173 Гц приведен на рисунке 3.

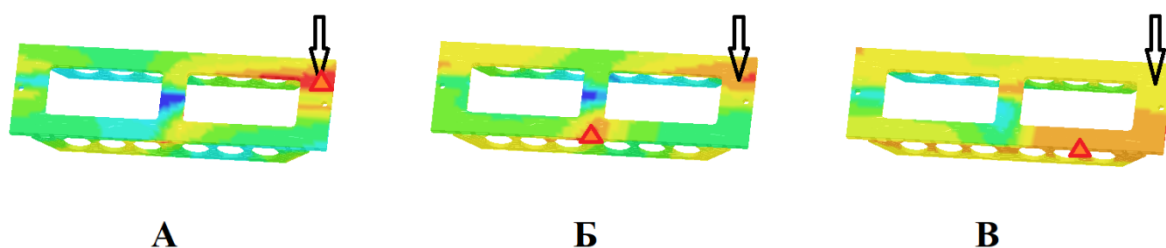


Рис. 3. Локализация источника на частоте 173 Гц при низком ОСШ, А – МП (3), Б – МНК (5), В – МНК для $J=1$. Стрелкой отмечено положение источника, треугольником – оценка по соответствующим методам

Интересно отметить, что и при высоком ОСШ метод (3) обладает некоторым преимуществом перед (5), но не в задаче локализации источника, а при оценке пространственной ориентации виброисточника (получаемой после локализации). Так, например, в определенных частотных диапазонах метод максимума правдоподобия определял ориентацию вектора силы с существенно меньшей погрешностью в сравнении с методом наименьших квадратов.

В разделе 1.5 приведены оценки количества датчиков и частотных полос, необходимых для успешной локализации. Оценка производилась в эксперименте со второй механоакустической конструкцией. Характерный размер конструкции составлял 1 м, число узлов составляло более 10^5 , число элементов КЭМ было более 30000. Расчет целевой функции по методу (5) проводился для 28 случайных частотных полос в диапазоне от 100 до 600 Гц, при разном количестве используемых при расчете вибродатчиков по 18 случайным комбинациям из 10–50 датчиков. Для каждой комбинации оценивалась вероятность того, что оценочное положение единственного виброисточника находится за пределами соответствующей детали составной конструкции (аномальная ошибка). Целевые функции при этом рассчитывались для заданного количества полос (полосы выбирались случайно) и суммировались. На рисунке 4 приведена зависимость вероятности аномальной ошибки от числа датчиков и числа частот (А). Также приведено распределение целевой функции метода МП (Б). Видно, что суммирование целевых функций по частотам позволяет существенно улучшить результат локализации. При 10–15 датчиках и 20 частотах вероятность аномальной ошибки при локализации становится практически нулевой.

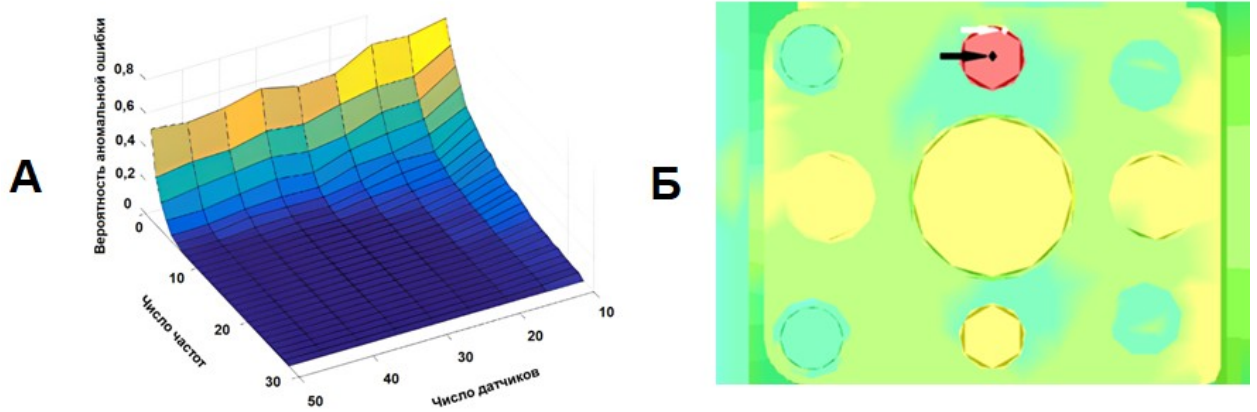


Рис. 4. А – Зависимость вероятности аномальной ошибки от числа датчиков и числа частот, Б – фрагмент второй конструкции с распределением целевой функции (5), черной стрелкой – положение источника, белой – оценка положения

В разделе 1.6 представлена информация о ПО «САТЕС», созданном в ИПФ РАН в рамках соответствующего проекта. Данное программное обеспечение реализует возможности решения задач акустического проектирования и диагностики техники. При акустической доводке конструкций часто возникает задача локализации виброисточников. Для этой цели в состав ПО «САТЕС» входит модуль «Поиск источника». Поиск источников возможен с использованием метода максимума правдоподобия, метода наименьших квадратов, модифицированного метода MUSIC (описание приведено во второй главе диссертации).

В разделе 1.7 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённых в первой главе исследований.

Во второй главе рассмотрена задача локализации нескольких виброисточников. Показана неэффективность практического применения методов локализации единственного виброисточника к данной задаче. Для решения задачи локализации нескольких виброисточников предложен алгоритм, основанный на модификации метода MUSIC. Модифицированный метод MUSIC экспериментально апробирован, а также исследован с помощью численного моделирования. Показана возможность определения числа одновременно работающих виброисточников по спектру собственных чисел корреляционной матрицы сигнала.

В разделе 2.1 представлено описание модифицированного специально для задачи локализации нескольких виброисточников метода сверхразрешения MUSIC, возникшего при решении задач спектрального оценивания и часто используемого в задачах пеленгации для разрешения близких источников плоских волн. Общепринятое выражение для целевой функции метода MUSIC в таких задачах выглядит следующим образом:

$$F_{music}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})}{\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{U}\mathbf{U}^H \mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})}, \quad (6)$$

где $\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})$ – вектор направлений (steering vector) для данной задачи,

$\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \sum_{l=L+1}^K \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H$, \mathbf{u}_l – собственные вектора выборочной корреляционной матрицы

принятого сигнала $\hat{\mathbf{K}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^H$, L – параметр метода MUSIC (должен быть больше или равен общему числу источников M), \mathbf{v}_j – вектор принятого сигнала на частоте f_0 в момент времени с номером $j = 1 \dots J$. Можно считать, что в условиях нашей задачи аналогом вектора направлений $\mathbf{A}_{st}(\boldsymbol{\theta})$ является вектор $\mathbf{A}\mathbf{F}$, который является функцией коэффициентов передачи для задачи локализации виброисточника. Учитывая это, запишем выражение для модификации целевой функции метода MUSIC для задачи локализации виброисточников:

$$F_{music+}(x, y, z) = \frac{\mathbf{F}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{F}}{\mathbf{F}^H \mathbf{A}^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A} \mathbf{F}}. \quad (7)$$

Для поиска неизвестных параметров необходимо максимизировать выражение (7) по этим параметрам. Для параметра \mathbf{F} это легко сделать путем решения уравнения $\frac{\partial F_{music+}}{\partial \mathbf{F}} = 0$. После подстановки найденного решения в (7) получим новую целевую функцию:

$$F_{MUS+}(x, y, z) = \lambda_{MUS}^{-1}, \quad (8)$$

где λ_{MUS} – минимальное собственное число матрицы $(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A}$.

Алгоритм (8) обладает гораздо меньшей вычислительной сложностью, чем алгоритм полного перебора по методу наименьших квадратов для нескольких источников и сопоставим со сложностью метода максимума правдоподобия для одного источника. Целевые функции (8) для разных частот, также как и целевые функции метода наименьших квадратов, можно суммировать для улучшения качества итогового результата. Число источников M может быть определено по спектру собственных чисел выборочной корреляционной матрицы сигнала $\hat{\mathbf{K}}$. Количество т.н. «сигнальных» собственных чисел равно количеству источников, а их абсолютные значения выше абсолютных значений «шумовых» чисел (при достаточно большом отношении сигнал/шум).

В разделе 2.2 представлены результаты апробации модифицированного метода MUSIC. Для исследования эффективности предложенной модификации метода MUSIC были проведены численное моделирование и эксперименты с двумя уже упомянутыми механическими конструкциями. Эксперимент проводился при разных взаимных положениях двух виброисточников, излучавших одновременно широкополосный белый гауссовский шум.

Расчет целевой функции в каждой узкой частотной полосе для модифицированного метода MUSIC производился по формуле (8), для метода максимума правдоподобия – по (3), для метода наименьших квадратов – по (5). В данном случае сравнение велось с МНК и МП, рассчитанными на единственный виброисточник (как уже отмечалось ранее, расчет в предположении полного числа источников является вычислительно сложным). Определение качества локализации виброисточников производилось при помощи оценки вероятности правильного разрешения. Считалось, что источники в данной полосе разрешены, если глобальный максимум целевой функции расположен вблизи реального положения одного из источников – в области близлежащих узлов, а при исключении данной области глобальный максимум будет располагаться в области близлежащих узлов другого источника.

В эксперименте с первой конструкцией расчет целевых функций методов, а также оценка эффективности разрешения, были произведены для 18 комбинаций из 16 датчиков (взятых случайно из общего количества в 22 датчика). Локализация выполнялась как для верифицированной, так и неверифицированной КЭМ для двух взаимных положений виброисточников. Для одного из взаимных положений в таблице 1 приведено количество полос, в которых выполнено правильное разрешение (размер области близлежащих узлов – сфера радиусом 0,12м) виброисточников, для всех комбинаций датчиков. Видно, что метод MUSIC позволяет значительно лучше разрешать виброисточники в сравнении с методом наименьших квадратов. Целевые функции метода MUSIC, рассчитанные для разных частотных полос, можно суммировать, что позволяет улучшить качество локализации.

Таблица 1. Количество полос (из общего числа в 700 в диапазоне 100 – 800 Гц), в которых успешно произведено разрешение виброисточников методами наименьших квадратов и MUSIC. Приведен результат для одного из положений в случае использования верифицированной и неверифицированной КЭМ. Представлена статистика для 18 комбинаций из 16 датчиков.

	Минимальное число полос, в которых произведено разрешение	Максимальное число полос, в которых произведено разрешение	Среднее число полос, в которых произведено разрешение
MUS/Невер	194	527	369,3
МНК/Невер	66	244	135,4
MUS/Вер	275	511	403,3
МНК/Вер	73	212	150,9

Характерные распределения целевых функций методов (8) и (5) для двух взаимных положений и разных частот приведены на рисунке 5. Видно, что метод MUSIC позволяет правильно разрешить источники, тогда как МНК – нет.

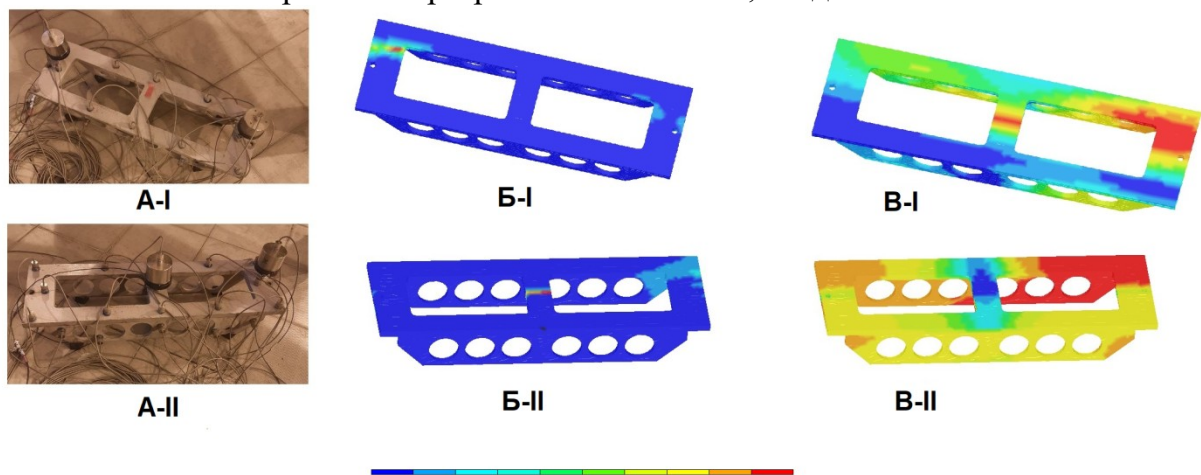


Рис. 5. Показаны два взаимных расположения виброисточников на первой конструкции: А-I и А-II. Б-I – целевая функция метода MUSIC с частотой 450 Гц (положение I), В-I – МНК с частотой 450 Гц (положение I); Б-II – метод MUSIC с частотой 200 Гц (положение II), В-II – МНК с частотой 200 Гц (положение II)

В разделе также представлены результаты апробации метода MUSIC в экспериментах со второй конструкцией, показывающие более высокую эффективность

предложенного метода в сравнении с МНК и МП в задаче локализации нескольких виброисточников.

В разделе 2.3 представлено описание реализации процедуры поиска нескольких источников в ПО «САТЕС».

В разделе 2.4 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённых во второй главе исследований.

В третьей главе рассмотрена задача определения ошибок (аномалий) измерений на вибродатчиках, вызванных аппаратными неисправностями или рассогласованием между КЭМ и экспериментом. Для её решения предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным. Показано, что предложенный подход позволяет обнаруживать аномальные приёмники различного типа. Особенностью метода является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Эффективность предложенного метода продемонстрирована в задаче локализации одного и двух виброисточников при разных типах ошибок. Дополнительно применимость разработанного алгоритма показана в задаче диагностики приемной системы (решетка микрофонов) для локализации источников плоских волн.

В разделе 3.1 описана постановка задачи поиска аномалий на вибродатчиках при локализации виброисточников. Отклик конструкции на воздействие в одной из узких частотных полос, прежде всего, определяется модами (собственными формами конструкции) и соотношением их вклада в результирующее колебание. На разных частотах и при разных положениях источника и вибродатчиков функция коэффициентов передачи определяется разными наборами мод. Собственные формы и собственные частоты колебаний КЭМ и реальной конструкции различаются даже после уточнения модели. При высоком ОСШ качество локализации определяется именно разницей между модельной и реальной функциями коэффициентов передачи. При этом в одной полосе амплитуда и фаза колебаний могут лучше совпадать с модельными значениями на одних вибродатчиках, чем на других вибродатчиках и частотах. Можно представить конструкцию с заметным дефектом, за счет чего в одних точках конструкции собственные формы колебаний могут гораздо больше отличаться от модельных форм, чем в других точках. Отметим, что наборы таких «аномальных»/«плохих» вибродатчиков с наибольшим рассогласованием реальной конструкции и модели будут отличаться для разных частот. Это происходит потому, что наборы мод, вносящих существенный вклад в результирующее колебание, различаются (при этом рассогласование модельных и реальных пространственных форм и частот для каждой моды уникально). Наличие таких аномальных датчиков может существенно ухудшать результат локализации источников, приводя даже к принципиальной невозможности корректной локализации. Отметим, что аномальным («плохим») в данном случае датчик делает именно рассогласование КЭМ и конструкции, а не аппаратные неисправности. Для корректного решения обратной задачи локализации необходим способ, который способен исключить такие аномальные датчики за счет сопоставления данных модели и эксперимента. Также предпочтительно, чтобы способ селекции датчиков позволял исключать и датчики с аппаратными неисправностями, резкими выбросами сигнала и т.д.

В разделе 3.2 приводится описание предлагаемого проекционного алгоритма определения аномальных измерений. На частоте f_0 для каждого i -го узла КЭМ рассчитаем матрицу коэффициентов передачи и для каждого узла составим $K \times 3$ матрицу

$$\mathbf{B}_i = [\overline{\mathbf{A}}_x \overline{\mathbf{A}}_y \overline{\mathbf{A}}_z]. \quad (9)$$

Здесь $\overline{\mathbf{A}}_x = \frac{\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_x}{\|\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_x\|_2}$, $\overline{\mathbf{A}}_y = \frac{\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_y}{\|\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_y\|_2}$, $\overline{\mathbf{A}}_z = \frac{\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_z}{\|\mathbf{A}(x_i, y_i, z_i) \mathbf{F}_z\|_2}$ соответст-

венно, а $\mathbf{F}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Из матриц \mathbf{B}_i составим матрицу $K \times 3N$

$\mathbf{M} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_i, \dots, \mathbf{B}_N]$, где N – число узлов в модели. Матрицы \mathbf{B}_i состоят из нормированных модельных откликов на единичные воздействия в трех направлениях для каждого узла, а матрица \mathbf{M} состоит из откликов для всей модели. Матрица $\mathbf{T} = \mathbf{M} \mathbf{M}^H$ содержит $D \leq K$ главных компонент (собственных векторов $\mathbf{W}_1 \dots \mathbf{W}_D$). Любой отклик на воздействие может быть выражен как линейная комбинация указанных выше компонент. Можно предположить, что при наличии рассогласования между КЭМ и конструкцией экспериментальный отклик \mathbf{v}_j будет разложен по ортогональным компонентам $\mathbf{W}_1 \dots \mathbf{W}_D$ с существенной погрешностью. Вероятно, эта погрешность будет максимальной на аномальных или «плохих» датчиках. Удаление таких датчиков способно существенно повлиять на соответствие эксперимента и модели и, как следствие, на решение обратной задачи. Определим такие датчики с использованием матрицы \mathbf{T} . Будем последовательно исключать каждый датчик, т.е. удалять соответствующие k -ую строку и столбец из матрицы \mathbf{T} , получая, таким образом, для каждого удаленного k -ого датчика матрицу \mathbf{T}_k . Для определения размерности ортогонального базиса D и последующего отбора собственных векторов будем использовать распространенный критерий CPV (Cumulative Percent Variance):

$$\frac{\sum_{w=1}^D \lambda_w}{\sum_{w=1}^{K-1} \lambda_w} > 0,99, \quad (10)$$

где λ_w – собственные числа матрицы \mathbf{T}_k . Критерий (10) заключается в отборе D компонент (из общего числа в $K-1$) по суммарному «весу», определяемому через спектр собственных чисел. Отметим что возможно использование и других критериев.

Проделаем ту же операцию исключения датчиков с экспериментальными данными и получим набор \mathbf{v}_{jk} – векторов отсчетов сигнала в момент времени j без k -ого датчика. Для каждого k найдем отношение:

$$F_{\text{sensor}}(k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{v}_{jk}}{\mathbf{v}_{jk}^H \mathbf{C} \mathbf{C}^H \mathbf{v}_{jk}}. \quad (11)$$

где $\mathbf{C}\mathbf{C}^H = \sum_{d=D+1}^{K-1} \mathbf{c}_d \mathbf{c}_d^H$, \mathbf{c}_d – собственные векторы матрицы \mathbf{T}_k , соответствующие младшим $D+1 \leq w \leq K-1$ собственным числам λ_w . Функция (11) вычисляется для каждого k -ого датчика в каждой частотной полосе f_0 и является мерой того, насколько «хорошо» векторы экспериментальных отсчетов без k -ого датчика лежат в пространстве D модельных главных компонент. Знаменатель выражения (11), представляющий собой проекцию вектора экспериментальных отсчетов сигнала на $(K-1)-D$ собственных векторов матрицы \mathbf{T}_k , резко уменьшится при удалении аномального датчика. Причина состоит в том, что при устранении рассогласования проекция векторов \mathbf{v}_{jk} (которые лежат в пространстве, образованном соответствующими D старшим собственным числам матрицы \mathbf{T}_k собственными векторами $\mathbf{W}_{k1} \dots \mathbf{W}_{kD}$) на младшие собственные вектора \mathbf{c}_d устремляется к нулю. Можно предположить, что при удалении «нормальных» датчиков (без рассогласования), отношение (11) для разных k будет меняться не так сильно, как при удалении аномальных датчиков. Функция (11) напоминает выражение проекционного метода MUSIC (8). Такой вид функции выбран произвольно, возможно применение и других видов функций (при этом, эффективность может отличаться). Резко выделяющиеся выбросы функции $F_{sensor}(k, f_0)$ можно определить, например, с помощью абсолютного медианного отклонения (MAD, median absolute deviation):

$$MAD = med(|F_{sensor}(1..K) - med[F_{sensor}(1..K)]|)b, b = 1.4826. \quad (12)$$

Те датчики, для которых выполняется неравенство

$$F_{sensor}(k) > med[F_{sensor}(1..K)] + 3MAD, \quad (13)$$

и будем считать аномальными датчиками. Отметим, что использование медианного отклонения является более робастным методом определения выбросов, по сравнению, с использованием среднеквадратичного отклонения. Такая методика позволяет для каждой узкой частотной полосы f_0 определить аномальные и плохо согласующиеся (в силу рассогласования, и в силу аппаратных погрешностей) с моделью датчики.

В разделе 3.3 представлена информация об условиях экспериментальной апробации и численного моделирования разработанного алгоритма. Исследование проводилось с использованием первой конструкции, конфигурация датчиков и источников аналогична конфигурациям, использованным при экспериментах с локализацией источников. Локализация единственного источника производилась по методу (5), двух источников – по алгоритму (8). Алгоритм (13) использовался непосредственно перед решением задачи локализации, время подобной предварительной «калибровки» по всему набору (700) частотных полос было сравнимо со временем расчета при локализации по нескольким полосам. Датчики, определенные по алгоритму (13) как аномальные, исключались из расчета при локализации.

В разделе 3.4 описаны результаты имитационного моделирования локализации единственного модельного источника, помещаемого в один из узлов. При проведении моделирования рассогласование вносилось различными способами. В первом сценарии в каждой полосе случайно выбирался датчик, и отклик умножался на случайную гауссовую действительную переменную с нулевым средним и единичным СКО. Во втором сценарии проводилось тоже самое, только с 4 датчиками. В третьем сценарии искусственно менялся модуль Юнга для части конструкции. Во

всех трех сценариях путем предварительного отбора аномальных датчиков удалось добиться существенного снижения ошибки локализации (числа аномальных полос). В первом сценарии были достигнуты наилучшие результаты: число полос с аномальной ошибкой снизилось с 83 (из 700) до 1. На рисунке 6,А приведен пример распределения условной амплитуды полезного сигнала на вибродатчиках до и после внесения чисто амплитудного искажения на двенадцатом вибродатчике на частоте 202 Гц. Это искажение привело к появлению аномальной ошибки локализации (ошибка локализации составляет несколько десятков сантиметров). На рисунке 6,Б приведены значения функции отбора (11) в зависимости от номера датчика k для данного сценария. По алгоритму (13) двенадцатый вибродатчик был удален, его удаление привело к устранению ошибки локализации.

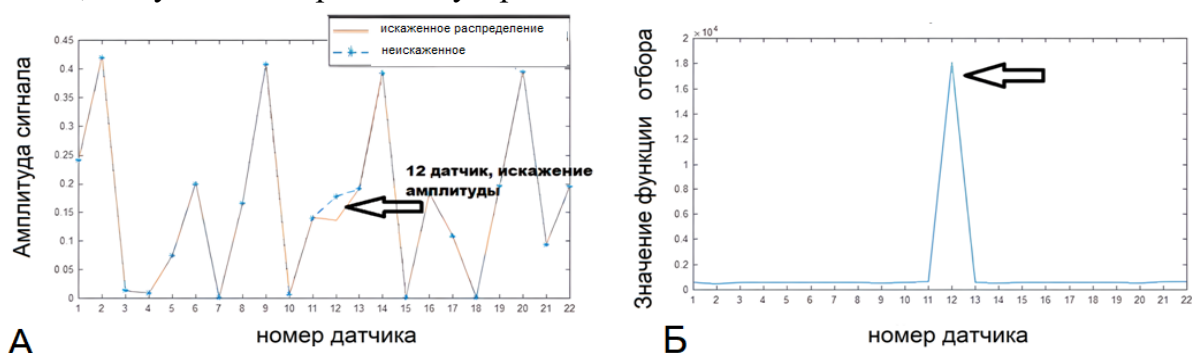


Рис. 6. А – Зависимость амплитуды сигнала от номера датчика с искажением (красная кривая) и без (синяя кривая). Б – функция отбора (11). Частота – 202 Гц

В разделе 3.5 представлены результаты экспериментальной апробации. Экспериментальная апробация проводилась с использованием неverified КЭМ, в задаче с локализацией двух источников. Локализация производилась по модифицированному методу MUSIC (8). Удалось добиться существенного увеличения числа частотных полос, в которых произведено разрешение источников: для одного положения с 445 до 483, для другого с 423 до 492. В результате отбора по методу (13) удалялось разное число вибродатчиков (от 0 до 6). Подобное разнообразие обусловлено различным рассогласованием модели и эксперимента на разных частотах. На рисунке 7 для этих положений представлено характерное улучшение результата локализации в полосах 580 и 626 Гц, отмечены положения двух источников, определяемые модифицированным алгоритмом MUSIC.

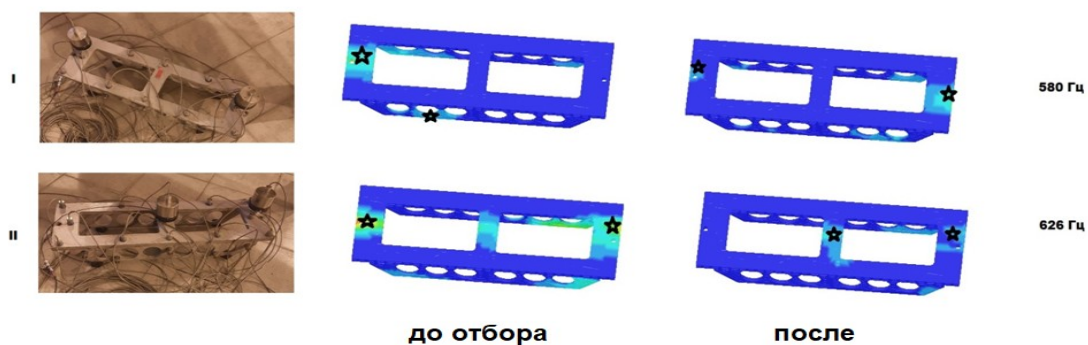


Рис. 7. Результат локализации двух виброисточников на частотах 580 Гц и 626 Гц по модифицированному методу MUSIC с использованием алгоритма отбора (13) и без него. Результаты представлены для двух взаимных положений источников (I и II). Звездами отмечены локализованные источники

В разделе 3.6 сравнивается эффективность предлагаемого проекционного алгоритма отбора датчиков с одной из традиционных техник: с «жадной» модификацией метода наименьших квадратов, при решении задачи локализации единственного виброисточника. Показано, что эффективность предлагаемого алгоритма сравнима с «жадным» алгоритмом, при этом вычислительная сложность алгоритма (13) существенно (в десятки и сотни раз для рассматриваемых конфигураций) ниже сложности «жадного» алгоритма. Отметим, также, что «жадный» алгоритм не может применяться при локализации нескольких источников и использовании других, отличных от МНК функций.

В разделе 3.7 приводится информации об апробации предлагаемого проекционного алгоритма в задаче определении неисправных микрофонов с некорректными показаниями при эксплуатации многоэлементных микрофонных решеток, часто используемых при построении акустических изображений (распределения в пространстве энергетических величин звукового поля). В рамках настоящего исследования разработанный проекционный алгоритм был применен к микрофонной 120 элементной эквидистантной плоской решетке с межэлементным расстоянием 5 см. Алгоритм позволил определить микрофоны с аппаратными неисправностями различного рода, при этом, списки определяемых вручную и автоматически аномальных микрофонов хорошо согласуются.

В разделе 3.8 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенных в третьей главе исследований.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе данного диссертационного исследования, подведены итоги, сделаны теоретические и практические выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе принципа максимума правдоподобия разработаны методы локализации единственного виброисточника. Первый метод получен строгим выводом из метода максимума правдоподобия, второй метод является его упрощенной модификации и основан на использовании первого собственного вектора выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала виброускорений. Экспериментально и численно показано, что разработанные методы обладают более высокой эффективностью в задаче локализации в сравнении с ранее применяемыми алгоритмами.
2. Получена модификация метода MUSIC, позволяющая решить задачу локализации нескольких работающих виброисточников. Модифицированный метод апробирован численно и в экспериментах с несколькими конструкциями. Показано, что модифицированный метод MUSIC обладает большей эффективностью при решении задачи локализации с двумя источниками в сравнении с методом наименьших квадратов, рассчитанного на единственный источник. Экспериментально продемонстрирована возможность правильной оценки числа одновременно работающих виброисточников по спектру собственных чисел выборочной корреляционной матрицы сигналов виброускорений.
3. Для решения задачи определения различного рода аномалий данных на вибродатчиках и минимизации их влияния на результат решения обратной задачи предложен оригинальный алгоритм, относящийся к проекционным алгоритмам. Экспериментально и численным моделированием показано, что предложенный подход позволяет обнаруживать аномальные приёмники различного рода. Главной особенностью алгоритма является совмещение численной конечно-элементной модели исследуемого объекта и экспериментальных данных. Эффективность алгоритма продемонстрирована в задаче локализации виброисточников в разных конфигурациях. Также применимость разработанного алгоритма показана в задаче диагностики приемных систем для локализации источников плоских волн. Разработанный алгоритм может быть использован и в других приложениях, где решение обратной задачи происходит с использованием численной или аналитической модели.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Kutuzov N. A. Study of the possibility of localizing multiple vibration sources in a mechanoacoustic system with a large number of degrees of freedom/ N. A. Kutuzov, A. A. Rodionov, A. V. Stulenkov, A.S.Suvorov // *Acoustical Physics*. – 2020. – Vol. 66. – No 3. – P. 313–319.
- A2. Kutuzov N. A. Localization of Multiple Vibration Sources Using a Modified MUSIC Algorithm / N. A. Kutuzov, A. A. Rodionov, A. V. Stulenkov // *Physics of Wave Phenomena*. – 2024. – Vol. 32. – No. 1. – P. 56–66.
- A3. Кутузов Н. А. Проекционный метод определения аномальных датчиков в задачах виброакустики / Н. А. Кутузов, А. А. Родионов // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. – 2024. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec24/8/text.pdf>
- A4. Родионов А. А. Исследование эффективности модификации сверхразрешающих алгоритмов для локализации виброисточников / А. А. Родионов, А. С. Суворов, Н. А. Кутузов, А. В. Стуленков // *Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н. А. Железцова*. – Н. Новгород: ННГУ, 2019 – С. 370–373.
- A5. Родионов А. А. Модификация метода MUSIC для поиска источников вибрационной активности в сложных системах / А. А. Родионов, А. С. Суворов, Н. А. Кутузов, А. В. Стуленков // *Материалы докладов 24 Нижегородской сессии молодых ученых*. – Н. Новгород: НРЛ, 2019. – С. 181–182.
- A6. Суворов А. С. Локализация источников виброактивности в сложных системах / А. С. Суворов, Н. А. Кутузов, А. А. Родионов, А. В. Стуленков // *Труды XXXII сессии РАО*. – 2019. – С. 1377–1384.
- A7. Kutuzov N. A. Modified MUSIC algorithm for vibration source localization / N. A. Kutuzov, A. A. Rodionov, A. V. Stulenkov // *Динамика и виброакустика машин: тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции*. – Самара: Самарский университет, 2020. – С. 75.
- A8. Кутузов Н. А. Проекционный подход в анализе аномальных датчиков в задачах, связанных с измерением виброакустических полей / Н. А. Кутузов, А. А. Родионов // *Труды XXVIII Научной конференции по радиофизике*. – Н. Новгород: ННГУ, 2024. – С. 333–336.
- A9. Кутузов Н. А., Родионов А. А. Проекционный метод обнаружения аномальных значений на датчиках в виброакустических задачах // *Сборник трудов XXXV сессии Российского акустического общества*. – М.: ГЕОС, 2024. – С. 483–488
- A10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661249 “САТЕС” Севрюков О.Ф., Соков Е.М., Суворов А.С., Евстифеев В.В., Коновалов К.С., Львова Д.А., Родионов А.А., Салин М.Б., Кутузов Н.А., Стуленков А.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЕДИНСТВЕННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА	19
1.1 Постановка задачи локализации виброисточника	20
1.2 Метод максимума правдоподобия в задаче локализации единственного источника.....	23
1.3 Метод наименьших квадратов в задаче локализации.....	24
1.4 Экспериментальная апробация и численное моделирование методов локализации единственного виброисточника	26
1.5 Оценка числа вибродатчиков и частотных полос, необходимых для успешной локализации.....	43
1.6 Реализация процедуры локализации виброисточников в программном обеспечении «САТЕС»	45
1.7 Заключение по первой главе	47
ГЛАВА 2. ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ ВИБРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА MUSIC	49
2.1 Модифицированный метод MUSIC для поиска нескольких виброисточников.....	50
2.2 Экспериментальная апробация и численное моделирование предложенного алгоритма локализации виброисточников	52
2.3 Реализация процедуры локализации нескольких виброисточников в ПО «САТЕС»	64
2.4 Заключение по второй главе.....	65
ГЛАВА 3. ПРОЕКЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИБРОДАТЧИКОВ СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМ РАССОГЛАСОВАНИЕМ МОДЕЛИ И ДРУГИМИ АНОМАЛИЯМИ	67
3.1 Аномалии показаний на вибродатчиках и решение обратной задачи	67
3.2 Проекционный алгоритм определения аномальных измерений в задаче локализации виброисточников.....	68
3.3 Условия численного моделирования и экспериментальной апробации.....	71
3.4 Численное моделирование.....	72
3.5 Экспериментальная апробация	80
3.6 Сравнение разработанного алгоритма с традиционными методами	82
3.7 Апробация проекционного алгоритма при проведении измерений с использованием микрофонных антенных решеток	85
3.8 Заключение по третьей главе	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	96