

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Кутузова Никиты Анатольевича «Разработка методов пространственной обработки случайных сигналов в приложении к задаче локализации источников вибрации с использованием конечно-элементного моделирования», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям  
1.3.4 – Радиофизика, 1.3.7 – Акустика

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время важной проблемой является обнаружение источников повышенной виброактивности в различных механических системах. Подобная задача решается при диагностике и обслуживании промышленного оборудования, авиационной, ракетно-космической, морской и других видов техники. Целью является определение нестандартных, аварийных режимов работы, снижение уровня шума, проведение работ по устранению дефектов. Одним из возможных подходов является использование конечно-элементной модели объекта. Вибрационное поле, рассчитываемое с помощью конечно-элементного моделирования, при разных положениях источника сопоставляется с полем с вибродатчиков. Это подразумевает применение методов пространственной обработки сигналов. Особенности обработки сигналов в данном случае могут оказать решающее влияние на качество локализации (определения неизвестного местоположения источников вибрации). Причиной плохого результата в данном случае могут быть не только шумы и помехи, но и несоответствия конечно-элементной модели (КЭМ) исследуемому объекту. Разработка и апробация эффективных методов обработки сигналов при локализации источников вибрации является крайне актуальной задачей не только акустики, но и радиофизики, поскольку радиофизические методы обладают высокой степенью универсальности. Эффективными методами решения подобного рода задач являются методы статистической радиофизики.

## **Анализ содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списков сокращений и используемых источников, изложена на 104 страницах, содержит 44 рисунка, 4 таблицы, в списке источников 82 наименования.

Во введении представлена информация об актуальности темы исследования и степени ее разработанности, сформулированы цель, задачи диссертационной работы, приведены научная новизна и положения, выносимые на защиту, сведения о личном вкладе автора, теоретической и практической значимости. Представлен обзор исследований отечественных и зарубежных специалистов по теме работы. В обзоре анализ состояния темы диссертации дополняется указанием на недостатки работ и оставшиеся недостаточно разработанными вопросы локализации виброисточников.

Первая глава посвящена оптимальной обработке при решении задачи локализации единственного источника вибрации. Представлена постановка задачи, описаны принцип решения и модель сигнала на вибродатчиках, расположенных в наборе контрольных точек на конструкции. По сути, задача локализации является обратной задачей. Ошибки локализации в такой задаче связаны либо со снижением отношения сигнал/шум, либо с рассогласованием КЭМ и конструкции. Автор указывает, что для используемой модели сигнала (точечный источник с неизвестными местоположением, ориентацией, формой сигнала и аддитивный шум на датчиках) целесообразно использовать метод максимума правдоподобия. На основе метода максимального правдоподобия автор формулирует метод локализации (и его упрощенный вариант), представляет данные апробации в эксперименте с двумя конструкциями и имитационном моделировании. Показано, что разработанный метод и его упрощенный вариант (в применении к первому собственному вектору выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала) позволяют определять неизвестные параметры единственного источника с меньшими ошибками, чем при использовании известных ранее

методов. Причем, автор обосновал, что успешная локализация возможна и для КЭМ без предварительной корректировки параметров.

Вторая глава посвящена случаю, в котором предполагается наличие нескольких одновременно работающих виброисточников с неизвестными положением и ориентацией. Число источников также предполагается неизвестным. На основе применяющихся в радиофизике методов, связанных с алгоритмами сверхразрешения (Multiple Signal Classification – MUSIC) и анализом собственных чисел корреляционной матрицы принятого сигнала, автор формулирует собственный метод определения числа источников вибрации и их локализации. На основе данных эксперимента показано, что модифицированный таким образом метод позволяет качественно определять положение, разрешать источники, в отличие от метода наименьших квадратов, который часто применяется в обратных задачах вибродиагностики.

В третьей главе предлагается алгоритм, позволяющий осуществить предварительную проверку, валидацию экспериментальных данных. Известны и широко применяются критерии расстановки вибродатчиков (например, МАС). В данном случае, предлагается считать расположение зафиксированным, но при этом найти датчики не только с аппаратными неисправностями, но с аномалиями данных, вызванных различием параметров КЭМ и реальной конструкции. Так, автор приводит пример с изменением модуля Юнга для части элементов конструкции. Это приводит к существенной ошибке локализации. Обнаружить подобную ошибку данных затруднительно традиционными способами: из анализа экспериментального сигнала выявить такое несоответствие нельзя. Поэтому, для решения этой задачи предлагается новый алгоритм, основанный на анализе проекции векторов принятого сигнала в частотной области на главные компоненты, полученные из данных конечно-элементного моделирования для всех возможных положений источников. Автор показывает, что удаление датчиков с некачественными данными приводит к изменению численной

меры, связанной с указанной проекцией (проекционный алгоритм). В последующем подобная процедура, выполняемая перед локализацией, позволяет значительно улучшить получаемый результат. Автор предлагает использовать разработанный проекционный алгоритм и в других приложениях, обосновывая свой довод результатами применения алгоритма в задаче обработки акустических сигналов плоской микрофоноой решеткой.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **Научная новизна работы**

Научной новизной обладают:

1. Метод локализации единственного виброисточника на основе принципа максимума правдоподобия и его упрощенный вариант. 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. Модифицированный метод MUSIC для решения задачи локализации нескольких одновременно 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. 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. Проекционный алгоритм пространственной обработки сигналов, основанный на совмещении конечно-элементной модели и данных эксперимента. 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**

Результаты работы значимы для развития методов исследования процессов, связанных с вибрациями, шумами и дефектами конструкций. Разработанные методы и подходы к локализации виброисточников обладают большим потенциалом при использовании в задачах проектирования, создания, пусконаладки, вибродиагностики, снижения шумности механизмов, конструкций, объектов различной техники (например, авиационной, морской и т.д.). Результаты работы легли в основу модуля диагностики программного обеспечения моделирования акустических характеристик «САТЕС».

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается имитационным моделированием и экспериментальной апробацией с разными механическими конструкциями в разных конфигурациях источников и приемников сигнала. Основные результаты работы представлены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в научных журналах, рекомендуемых ВАК.

### **Замечания**

1. В работе приведены результаты экспериментальной апробации алгоритмов, при этом на конструкции устанавливается существенное число вибродатчиков, обладающих определенной массой. Автор не

делает оценки относительно степени влияния, установленных датчиков на результаты эксперимента.

2. Автором указан принцип определения числа источников по спектру собственных чисел выборочной корреляционной матрицы принятого сигнала, но не представлена численная граница для определения порога, разделяющего сигнальные и шумовые собственные числа.
3. В третьей главе не совсем ясным остается вопрос эффективности предлагаемого проекционного алгоритма в зависимости от количества модельных главных компонент.

Данные замечания не снижают научной и практической ценности полученных результатов.

### **Заключение**

Диссертационная работа Кутузова Никиты Анатольевича «Разработка методов пространственной обработки случайных сигналов в приложении к задаче локализации источников вибрации с использованием конечно-элементного моделирования» выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача создания и апробации новых эффективных методов определения неизвестных параметров источников виброактивности. Тематика и содержание диссертации соответствуют специальностям 1.3.4 – Радиофизика (пп.4,5), 1.3.7. – Акустика (пп.10,11). Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Кутузов Никита Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени

Подпись Макино А.А. удостоверяю.  
Заведующий отделом сопровождения деятельности  
научных советов Самарского университета  
Бояркина Бояркина У.В.  
7 » сентября 2016 г.