

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Федотова Александра Васильевича  
«Гашение колебаний в распределенных упругих системах с использованием  
пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов»,  
представленную к защите на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы  
(в машиностроении)»

На отзыв представлены том рукописи диссертации общим объемом 191 стр. и типографский вариант автореферата на 20 стр. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 68 наименований. Рассмотрение и анализ указанных материалов позволили сформулировать следующий отзыв о выполненном исследовании.

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертация посвящена проблеме активного гашения колебаний распределенных упругих систем. Актуальность данной задачи не вызывает сомнений, поскольку нежелательные вибрации конструкций возникают во множестве самых разных областей техники. Такие вибрации могут не только ухудшать эксплуатационные характеристики конструкций и машин и вызывать ненужный шум, но также зачастую могут быть опасными и приводить к повреждению и разрушению данных систем. Актуальность работы обуславливается также тем, что особенное внимание в последние десятилетия обращают на себя так называемые «умные» конструкции, способные адаптироваться к условиям нагружения, и активные системы управления. Благодаря развитию технологий и материалов появляется возможность использовать в таких системах массивы сенсоров и актуаторов, а также большое число контуров управления. В связи с этим возникает проблема правильной организации всех элементов системы управления, включающая в себя размещение сенсоров и актуаторов, их использование в контурах управления, выбор законов управления. Все перечисленные аспекты рассматривается в диссертации, причем не только на теоретическом, но и на экспериментальном уровне, что делает работу еще более ценной.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов**

Обоснованность выводов диссертации определяется строгостью использованных методов анализа механических систем и разработанных

математических моделей, а также высокой согласованностью результатов, полученных экспериментально и численно.

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах, из них 3 – в научных изданиях, рекомендованных ВАК, и еще 2 – в изданиях, индексированных в международной наукометрической базе Scopus. Кроме того, результаты диссертационного исследования были представлены автором на 7 российских и международных конференциях и симпозиумах, а также на научных семинарах в ИПМаш РАН и Университете ИТМО.

### **Научная новизна и достоверность результатов**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 68 наименований. Общий объем диссертации составляет 191 страницу.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи работы, методика выполненных исследований, их научная новизна и положения, выносимые на защиту. Также приводятся сведения об апробации работы и публикациях.

**В первой главе** приводится обзор литературы, соответствующей тематике работы, и излагаются теоретические основы исследований, описанных в последующих главах. Во-первых, дается описание локального и модального подходов к управлению упругими системами с распределенными параметрами, объясняются различия между данными подходами. Во-вторых, анализируется устойчивость замкнутой системы при управлении с двумя контурами обратной связи. В-третьих, теоретически рассматривается работа используемых в дальнейшем исследовании для управления изгибными колебаниями тонких балок пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов.

**Во второй главе** диссертации описывается постановка экспериментального исследования по сравнению локального и модального подходов к управлению распределенными системами в задаче о гашении вынужденных изгибных колебаний тонкой металлической балки, упруго защемленной в промежуточном сечении. Как при локальном, так и при модальном подходе две пары сенсор-актуатор используются для гашения изгибных колебаний балки на первом и втором резонансах. На первом этапе эксперимента устанавливаются оптимальные места расположения на балке сенсоров и актуаторов для наиболее эффективного управления первой и второй формами изгибных колебаний, для этого данные формы определяются экспериментально и численно. На следующем этапе в результате использования предложенной автором экспериментальной процедуры устанавливаются матрицы – синтезатор и анализатор форм, обеспечивающие раздельное управление первой и второй формами колебаний балки в модальной системе управления.

**Третья глава** посвящена реализации в рамках экспериментального исследования третьего этапа создания систем управления – а именно, синтеза передаточных функций в контурах управления. Передаточные функции синтезируются для локальных и модальных систем с двумя контурами, и эффективность полученных систем проверяется экспериментально. В результате сравнения созданных систем продемонстрировано преимущество модального подхода перед локальным, выражющееся в том, что он позволяет снижать амплитуду вынужденных колебаний балки на обоих резонансах, в то время как локальные системы могут обеспечить сравнимую эффективность гашения колебаний только либо на первом, либо на втором резонансе.

**В четвертой главе** эффективность локального и модального подходов к управлению сравнивается в рамках численного исследования, в котором рассматриваются вынужденные изгибные колебания тонкой шарнирно-опертой балки. Моделирование объекта управления осуществляется в вычислительном пакете Matlab в разложении по собственным формам колебаний балки. Корректность данного способа моделирования подтверждается сравнением с результатами конечно-элементных расчетов в пакете ANSYS. Для рассмотренной системы повторяются все этапы создания систем управления, изложенные в предыдущих главах, посвященных экспериментальной части исследования. Результаты сравнения подтверждают установленное ранее преимущество модального подхода перед локальным. В заключительной части главы проверяется применимость упрощенной модели работы сенсоров и актуаторов при синтезе модальной системы управления. Показано, что в рассматриваемых задачах необходимо использовать полную модель работы пьезоэлементов, учитывающую их влияние на формы колебаний балки, так как в противном случае эффективность управления заметно падает.

**В пятой главе** ставится задача численного воспроизведения результатов, полученных ранее в рамках эксперимента во второй и третьей главах диссертации. Для этого создаются две конечно-элементных модели исследуемой балки в пакете ANSYS: балочная и 3D-модель. Далее с помощью разработанной автором процедуры оптимизации синтезируются новые передаточные функции для модальной системы управления, позволяющие значительно повысить ее эффективность (снижение амплитуды резонансных колебаний по сравнению с модальной системой №1 составляет около 10 дБ на обоих резонансах). Полученные численно результаты управления для систем, синтезированных в третьей главе диссертации, хорошо согласуются с экспериментом.

**В заключении** приведены основные результаты выполненных исследований и сформулированы выводы по работе.

Таким образом, в работе получен ряд результатов, обладающих безусловной научной новизной:

1) Разработан и применен метод экспериментальной идентификации распределенного объекта, позволяющий определить оптимальные параметры

линейного преобразования измеренных и управляющих сигналов, которое обеспечивает раздельное управление различными формами колебаний объекта в рамках модального подхода;

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

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

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

Достоверность указанных результатов не вызывает сомнений. Автореферат диссертации и опубликованные научные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

### **Практическая и научная значимость**

В диссертации разработана практическая методика синтеза эффективных систем управления на основе модального подхода, позволяющих гасить вынужденные изгибные колебания тонких балок. Данные результаты могут быть применены для создания систем управления, используемых для гашения колебаний широкого класса упругих систем с распределенными параметрами, не ограничиваясь выбором именно пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов. Разработанные в диссертации методы управления актуальны для таких объектов, как роботы и робототехнические системы, медицинские приборы, высокоточные обрабатывающие станки, автомобили и летательные аппараты, а также здания и инженерные сооружения.

## **Замечания по диссертационной работе**

По работе имеются следующие замечания:

1. Использование информационно-измерительных систем с необходимостью связано метрологическим регламентом. В диссертации, с одной стороны, даны сведения о технических характеристиках измерительной системы. С другой стороны, не отражены вопросы, связанные с особенностями выбора технологии закрепления сенсоров и актуаторов. Далее, зачем использовать в диссертации словосочетание «...расхождение составляет около 10%»? (Стр. 67). Ведь есть регламентированная терминология!

2. Соискатель всюду пишет: «...с большой точностью сходятся все результаты» (для примера на стр.130). В диссертации не обнаружены такие оценки, как дисперсия, СКО. Сравнение идет «на глазок».

3. Использование императива «...эффективные системы управления» (стр.181) требует серьезного обоснования. Ведь эффективность в целом обеспечивается, в том числе, и экономическими соображениями, связанными с энергозатратами, быстродействием, а еще и дружественным интерфейсом. А о последнем соискателем ничего не сказано. То есть нет информации об авторском программном обеспечении проекта под названием **ДИССЕРТАЦИЯ**.

4. В библиографическом списке соискатель, в основном, ссылается на зарубежные источники. Было бы уместно сослаться на работы соотечественников, занимающихся аналогичными исследованиями. Например, хотя бы на работу профессора Знаменской Л.Н. «Управление упругими колебаниями» и ряд других публикаций.

## **Заключение**

Диссертационная работа Федотова Александра Васильевича «Гашение колебаний в распределенных упругих системах с использованием пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов», несмотря на имеющиеся замечания, является законченной научно-квалификационной работой, в которой решаются задачи, соответствующие паспорту специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)» и имеющие научное и практическое значение.

Диссертация Федотова А.В. полностью удовлетворяет п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)».

Официальный оппонент,

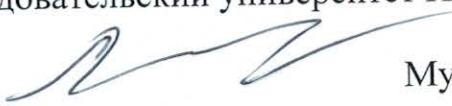
Профессор факультета систем управления и робототехники

федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский университет ИТМО»

д.т.н., профессор



Мусалимов В.М.

Дата: 25 мая 2020 г.

Мусалимов Виктор Михайлович: тел. +79214217917, musvm@ya.ru.

Адрес университета ИТМО: 197101, Санкт-Петербург,

Кронверкский проспект, 49. Тел. 8(812)2323150.

