



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное  
автономное образовательное  
учреждение  
высшего образования  
«Балтийский федеральный  
университет  
имени Иммануила Канта»  
(БФУ им. И. Канта)

ул. А. Невского 14, г. Калининград, 236016  
Тел.: +7 (4012) 595597, факс: +7 (4012) 465813  
E-mail: [post@kantiana.ru](mailto:post@kantiana.ru), <http://www.kantiana.ru>  
ОКПО 02068255, ОГРН 1023901002949,  
ИНН/КПП 3906019856/390601001

27.03.2020 № 01/30-456  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Временно исполняющий обязанности ректора  
федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Балтийский федеральный  
университет имени Иммануила Канта»  
А.А. Федоров  
\_\_\_\_\_ 2020 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

«Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»  
на диссертацию Кузнецова Станислава Александровича  
«Напряженно-деформированное состояние активных вантовых элементов с  
пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности  
космических рефлекторов»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

### Актуальность темы исследования диссертации

Регулирование формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов весьма актуальный и востребованный механизм для обеспечения передачи сигналов высокой частоты. Исследованием и созданием таких систем сейчас занимаются многие ведущие страны, которые занимают лидирующие позиции в производстве космической техники.

Необходимость обеспечения настройки отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с вантовой формообразующей системой необходима в связи с ухудшением физико-механических характеристик вантовых элементов формообразующей системы в течение срока существования космического аппарата, что приводит к искажению

отражающей поверхности. Решением данной проблемы является разработка системы активных вантовых элементов регулирующих форму отражающей поверхности, с использованием в качестве активных элементов пьезопроводов.

Работа с реальными конструкциями требует большого количества временных и финансовых ресурсов, поэтому вопрос разработки алгоритмов анализа и прогноза состояния таких систем крайне актуален. Сейчас для моделирования состояния активных элементов системы регулирования формы отражающей поверхности обычно применяются методы конечных элементов в трехмерной постановке или одномерное математическое моделирование. Однако для проектирования перспективных систем регулирования формы отражающей поверхности требуется улучшение точности моделирования, учитывающего динамику режимов работы системы, нелинейность отдельных механических взаимодействий и свойства материалов используемых в такой системе.

### **Общая характеристика работы**

Основной целью диссертации является обоснование метода регулирования формы отражающей поверхности, путем применения активных вантовых элементов формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезопроводами.

Диссертационная работа Кузнецова С.А. содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 81 наименования, одного приложения и изложена на 112 страницах машинописного текста, включая 9 таблиц и 89 рисунков. Структура работы логична и последовательна, соответствует цели и задачам исследования. По объему, структуре и стилю изложения диссертационной работы замечаний не возникает.

**Во введении** представлена актуальность рассматриваемой темы и степень её разработанности. Сформулированы: цель, решаемые задачи, новизна работы; теоретическая и практическая значимость результатов исследования, а также сведения об их достоверности; приведены данные об апробации работы, внедрении и личном участии автора в получении результатов, положения, выносимые на защиту. Также приведены данные об апробации работы, внедрении и личном участии автора в получении результатов.

**В первой главе**, по доступным литературным источникам, приведен обзор современных методов регулировки формы отражающей поверхности для крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов, анализ тенденций развития систем регулировки длины вант и современный уровень их разработки. Показан предел достижимого уровня среднеквадратичного отклонения для отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов, если не применять активные систем регулировки длины ванты. Проведен анализ нелинейных взаимодействий в системе регулировки длин вант при регулировке формы отражающей поверхности крупногабаритных

трансформируемых антенных рефлекторов. Приведено обоснование использования в таких системах активных элементов именно на основе пьезопроводов.

Сформулирована новая математическая постановка задачи для определения напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора с вантовой конструкцией, имеющей систему активного регулирования формы отражающей поверхности с пьезопроводами.

**Во второй главе** приведены представительная модель вантового элемента с пьезопроводом для активного регулирования формы отражающей поверхности, конечно-элементная модель пьезопровода, учитывающая особенности контактного взаимодействия и электроупругого деформирования, а так же алгоритм решения нелинейного динамического контактного взаимодействия элементов пьезопровода для всех режимов работы, включая переходный процесс при начале работы пьезопровода. Определены требования для удержания пьезопроводом активного вантового элемента. Рассчитаны собственные частоты резонансного эффекта для модели активного ванта с пьезопроводом, определена наиболее вероятная. Приведен анализ работы пьезопровода при регулировании формы отражающей поверхности и показано влияние параметров режима работы пьезопровода на величину перемещения штока.

**В третьей главе** приведена разработка математической модели функционирования пьезопровода при заданных рабочих нагрузках, учитывающая свойства пьезопакета и всей колебательной системы. Определены зоны устойчивой и неустойчивой работы пьезопровода. Определены критерии формирования двигательного режима пьезопровода при регулировании формы отражающей поверхности рефлектора.

**В четвертой главе** представлены параметры пошагового режима работы разработанного пьезопровода для регулирования формы отражающей поверхности рефлектора, определенные по результатам анализа результатов экспериментальных исследований. На основе параметрического анализа экспериментальных данных определены три зоны режимов работы пьезопровода: зона двигательного режима; зона режима динамического торможения и зона равновесия. Показана возможность регулирования производительности разработанного пьезопровода за счет изменения величины амплитуды напряжения сигнала управления, в пределах допустимых значений пьезопровода.

**Научная новизна.** Новыми результатами, полученными соискателем, следует считать следующие:

– математическая постановка задачи моделирования напряженно-деформированного состояния формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами, учитывающая комплекс нелинейностей различного рода;

– модель активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов космических аппаратов, учитывающая комплекс нелинейностей различного рода;

– алгоритм численного решения нелинейной задачи механического поведения активных вантовых элементов прецизионной системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезоприводами;

– инженерная (одномерная) модель, учитывающая свойства пьезопакета и всей колебательной системы, позволяющая определять зону устойчивой и неустойчивой работы пьезопривода;

– разработанный подход и экспериментальные данные процесса регулирования длин вантовых элементов пьезоприводами на специально созданном стенде, учитывающем нелинейность жесткостей тыльной и фронтальной вантовых сетей рефлектора;

– результаты исследования зон режимов работы пьезопривода типа «Захват», создающего линейное пошаговое продвижение штока касательным периодическим контактным воздействием захвата со скругленной кромкой.

Результаты диссертации обладают **теоретической и практической значимостью**. Наиболее важный результат заключается в том, что предложенный комплекс методов и подходов является теоретической основой для проектирования крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с системой активного регулирования на основе пьезоприводов и является обоснованием метода управления точностью отражающей поверхности рефлектора на орбите. Так же полученные результаты являются развитием механики деформируемого твердого тела в части определения напряженно-деформированного состояния системы регулирования длин вант и ее элементов.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Основное практическое применение результаты найдут в космической отрасли. В частности их уже применяли в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» при проектировании системы регулирования формы отражающей поверхности перспективного крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора на околоземных орбитах, а также при определении необходимых режимов работы такой системы. Так же результаты могут быть использованы в научных учреждениях, включая: Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва) и др.; в высших учебных заведениях: Томский государственный университет (г. Томск), Московский авиационный институт (г. Москва), Сибирский

государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск) и др.

**Достоверность** и обоснованность полученных результатов основана на правильно выбранной математической модели вантово-оболочечных конструкций, с учетом геометрической нелинейности, использовании апробированных и верифицированных методов решения для различных пространственных сеток конечно-элементной модели рефлекторов, сравнении полученных экспериментальных результатов и результатов математического моделирования.

**Публикация основных результатов диссертации в научной печати.** По теме диссертации соискателем опубликовано 17 работ, в том числе 3 в научных изданиях из списка, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в российском научном журнале, входящем в Web of Science), 1 статья в сборнике материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science, 3 статьи, в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. Постановка задачи механического поведения формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами при регулировании формы отражающей поверхности не учитывает тепловые деформации, которые будут возникать при функционировании КА в космосе.

2. На графике «Зависимости скорости линейного движения штока ПП от силы растяжения пружины» (Рисунок 2.33) наблюдается неестественно резкий угол изменения направления зависимости, что говорит о не достаточном количестве расчётных и измеряемых точек.

3. Для управления ПП выбран пилообразный сигнал напряжения, обоснования этого выбора отсутствуют.

4. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований, разработанного ПП на постоянную нагрузку и на нагрузку в виде упругой связи. Но описан только метод исследования на постоянную нагрузку.

5. Рекомендуется провести сравнение эффективности пьезоэлектрического привода типа «Захват» с пьезоэлектрическими приводами других типов.

#### **Заключение**

Диссертационная работа Кузнецова Станислава Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой предлагается комплекс

