

## Отзыв

официального оппонента по диссертационной работе

Кузнецова Станислава Александровича

«Напряженно-деформированное состояние активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности космических рефлекторов», представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

**Актуальность работы.** Современные тенденции в развитии глобальных высокоскоростных космических систем связи все чаще требуют применения крупногабаритных рефлекторов. Ограничения по массе и габаритам, накладываемые на выводимые в космос конструкции, требуют применения конструкций, которые имеют большой коэффициент трансформации - возможность разворачиваться на большие площади при относительно небольших первоначальных габаритах. К такому классу относятся крупногабаритные трансформируемые антенные рефлектора с вантовой формообразующей системой конструкции. Увеличение частоты сигнала в современных системах связи, в свою очередь требует все большей точности отражающей поверхности, что для конструкций с вантовой формообразующей системой не достижимо без систем активного регулирования длин вант.

Напряженно-деформированное состояние как вантовых систем, так и систем активного регулирования описывается нелинейными уравнениями механики деформируемого твердого тела. Сейчас в мире наблюдается большой интерес к вопросам развития численных методов решения таких уравнений для проектирования указанных систем. В частности, этим активно занимаются коллектив научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета совместно с лидером производства современных Российских систем космической связи АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».

Несмотря на активность последних лет, вопросы проектирования систем активного регулирования отражающих поверхностей изучены достаточно слабо. В частности, требуется повышение точности моделирования как всей вантовой системы, так и самих активных элементов, для чего необходимо учитывать все возможные контактные взаимодействия и возникающие нелинейные процессы. Особо хочется отметить, что об использовании таких систем регулирования в космосе до настоящего времени неизвестно.

Исходя из вышесказанного, тема диссертации Кузнецова С.А., цель которой разработка методов и подходов для проектирования систем регулирования формы

отражающей поверхности применением активных вантовых элементов, безусловно является актуальной.

### **Анализ содержания диссертационной работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 81 источник и приложения. Текст работы изложен на 112 страницах машинописного текста, включающего 89 рисунков и 9 таблиц.

**Во введении** приведена информация об актуальности и степени разработанности темы исследования; изложены цель работы, решаемые задачи, научная новизна диссертации, теоретическая и практическая значимость работы, область исследования, используемые методы и методология, положения, выносимые на защиту, сведения о степени достоверности полученных результатов, их апробации и личном участии автора в получении результатов, данные об объеме и структуре работы.

**Первая глава** посвящена рассмотрению состояния предметной области регулировки формы отражающей поверхности (ОП) для крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов (КТАР) и оценке предела достижимого уровня среднеквадратичного отклонения для ОП КТАР в зависимости от их диаметра без применения активных систем регулировки длины ванты (СРДВ).

Во второй части главы сформулирована новая постановка задачи математического моделирования напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора вантовой конструкцией с системой активного регулирования формы отражающей поверхности.

**Вторая глава** посвящена разработке представительной модели активных вантовых элементов с пьезоприводами и конечно-элементной модели самого пьезопривода, которая учитывает контактные взаимодействия и нелинейные процессы. Так же показано определение наиболее вероятных собственных резонансных частот для активного ванты с пьезоприводом и приведен анализ работы пьезопривода при регулировании формы отражающей поверхности с разными параметрами режимов работы. Проводится сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных для определения достоверности предложенной конечноэлементной модели.

**Третья глава** посвящена разработке одномерной математической модели для расчетов колебательной системы СРДВ при различной инерционной нагрузке методом электрических аналогий, а также моделированию работы экспериментальной установки при различных условиях. При математическом

моделировании пьезопривода (ПП) были сделаны следующие допущения: 1) не учитываются потери механической энергии в зоне контактных взаимодействий; 2) при продвижении штока ПП вперед предполагается полное сцепление в зоне контакта захвата и штока; 3) источник электрической энергии является источником бесконечной мощности; 4) силовая нагрузка представлена весом груза; 5) деформации материала захвата и штока за период колебания носят упругий характер; 6) характеристики пьезопакета определяются техническим паспортом производителя.

Для определения наиболее эффективного режима работы ПП проводилось численное решение уравнения движения механической системы ПП, где варьировались параметры сигнала управления. Была проанализирована нелинейная колебательная система ПП с точки зрения полезной механической мощности. Рассчитаны режимы работы ПП и определена граница разделения режимов работы ПП.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям моделируемой системы и анализу полученных данных в сравнении с результатами математического моделирования для подтверждения работоспособности математических моделей. Описывается специально разработанный опытный образец ПП и стенд для его испытаний, моделирующий нагрузки вантовой формообразующей структуры при процессе регулирования формы отражающей поверхности рефлектора.

В заключении приведены основные результаты, выводы диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении приведен акт о внедрении научных результатов.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и практических рекомендаций.

Достоверность научных положений основана на использовании математически обоснованного аппарата в нелинейной механике деформируемого твердого тела, теории метода конечных элементов, вычислительной линейной алгебры. Предложенный подход в моделировании систем активного регулирования отражающей поверхности и алгоритм численного решения нелинейной задачи механического поведения активных вантовых элементов находят подтверждение в результатах экспериментальных исследований.

Научная новизна полученных результатов:

- математическая постановка задачи моделирования напряженно-деформированного состояния формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами, учитывающая геометрические нелинейности вантовой системы, нелинейности контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезопроводов,

вязкоупругого характера деформирования самих вант и динамики процесса регулирования формы отражающей поверхности пьезоприводами;

- модель активных вантовых элементов системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезоприводами, учитывающая геометрическую нелинейность формообразующей системы, нелинейность контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезопривода и вязкоупругость деформирования самих вант с рассмотрением корректировки длин вант как динамический процесс;

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

- одномерная модель, учитывающая свойства пьезопакета и всей колебательной системы, позволяющая определять зону устойчивой и неустойчивой работы пьезопривода;

- подход в получении экспериментальных данных процесса регулирования длин вантовых элементов пьезоприводами;

- выявленные зоны устойчивой работы пьезопривода типа «Захват», создающего линейное пошаговое продвижение.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются достаточно обоснованными.

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

Предложенный метод может быть рекомендован для решения задач при разработке крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с системой регулирования формы отражающей поверхности и определении необходимых режимов работы такой системы/

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.**

Значимость для науки полученных результатов заключается в том, что предложенный подход расширяет возможности численного анализа и точности моделирования систем активного регулирования отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов. Практическое значение результатов заключается в возможности более точного моделирования таких конструкций, определении необходимых параметров и режимов работ, что позволит снизить затраты как временных, так и финансовых ресурсов на доработку реальных конструкций. Это особенно актуально для предприятий ГК Роскосмос, занимающихся созданием автоматических космических аппаратов для

перспективных и глобальных систем связи АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск), Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (г. Москва), Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (г. Королев).

#### **Замечания по содержанию и оформлению диссертации**

1. Целью работы является обоснование метода регулирования формы отражающей поверхности применением активных вантовых элементов формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезоприводами, однако на защиту выносятся постановка задачи, модели, алгоритмы, модели и результаты экспериментальных исследований. Возможно, следовало более точно сформулировать цель работы или вынести на защиту обобщение научных результатов в форме метода.

2. На рисунке 2.5 приведена схема активного вантового элемента с пьезоприводом. Из приведенного описания схемы не ясно, учитывалось ли в расчете собственных частот активного вантового элемента массы фронтальной и тыльной сети, масса шнура.

3. На рисунке 4.18 а) «границы режимов устойчивой работы ПП при разных частотах воздействия от амплитуды управляющего напряжения» не достаточно явно определены границы зоны работ. Для большей наглядности зоны работ следовало бы выделить цветом или различным фоном.

4. Рекомендуется провести оценку эффективности предложенной инженерной модели для определения зоны устойчивой и неустойчивой работы ПП других типов.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Представленная диссертация Кузнецова С.А. выполнена на достаточно высоком квалификационном уровне и соответствует паспорту специальности ВАК 01.02.04 по пунктам 7 и 8 раздела «Области исследований»: 7. Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники; 8. Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования. Сделанные замечания не снижают научной ценности диссертации. Оформление диссертации в целом отвечает требованиям, установленным ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

По теме диссертации Кузнецовым С.А. опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В представленном списке имеется 4 публикаций, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.

**Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.**

Диссертация «Напряженно-деформированное состояние активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности космических рефлекторов» является законченной научно-квалификационной работой. По содержанию, научной новизне, объему проведенных исследований, теоретической и практической значимости результатов она полностью соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842 (в ред. от 01.10.2018), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кузнецов Станислав Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры Е7 «Механика деформируемого твердого тела» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», доктор физико-математических наук (01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела), профессор.

"23" марта 2020 г.

Радченко Андрей Васильевич

Подпись Радченко Андрея Васильевича удостоверяю.

Начальник отдела кадров БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Сергеева О.А.

"24" марта 2020 г.



**Сведения об организации:** Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»; 190005, город Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская улица, 1., 8 (812) 316-23-94, komdep@bstu.spb.su;; сайт организации: <http://www.voenmeh.ru>