

На правах рукописи



Кузнецов Станислав Александрович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
АКТИВНЫХ ВАНТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПЬЕЗОПРИВОДАМИ
СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ФОРМЫ ОТРАЖАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Пономарев Сергей Васильевич

Официальные оппоненты:

Радченко Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», кафедра Е7 «Механика деформируемого твердого тела», профессор

Уцын Григорий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра механики и графики, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Защита состоится 24 апреля 2020 года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/KuznetsovSA24042020.html>

Автореферат разослан «__» марта 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Пикущак
Елизавета Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выбранной темы исследования. Вопросы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов в настоящее время являются актуальными и исследуются в ведущих странах – производителях космической техники, таких как США, Япония, Россия, Китай и др.

Анализ современных тенденций развития крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с вантовой формообразующей системой показывает необходимость обеспечение точности настройки отражающей поверхности в связи с увеличением частоты передаваемого сигнала для повышения объема передаваемой информации и создания систем глобальной связи.

В течение срока существования космического аппарата ухудшаются физико-механические характеристики вантовых элементов формообразующей системы, что приводит к искажению отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов. Решением данной проблемы является разработка системы активных вантовых элементов регулирующих форму отражающей поверхности, с использованием в качестве активных элементов пьезоприводов.

Системы активных вантовых элементов регулирующих форму отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов разрабатываются с 90-х годов. За прошедшее время были предложены различные модели реализации систем регулирующих форму отражающей поверхности, в том числе на основе пьезоприводов, которые считаются самыми перспективными. Подобные системы сейчас разрабатываются под руководством В. И. Халимановича в отраслевом центре крупногабаритных трансформируемых механических систем АО «ИСС», который является в России лидером по производству крупногабаритных трансформируемых рефлекторов.

Однако разработка перспективных аналогов подобных систем требует повышение точности моделирования, учитывающего динамику режимов работы системы, нелинейность отдельных механических взаимодействий и свойства материалов системы.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время для моделирования активных элементов системы регулирования отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов применяются численные методы (методы конечных элементов) в трехмерной постановке, либо одномерное математическое моделирование, так как длина объекта исследования (активного вантового элемента) в напряженном состоянии превышает поперечные размеры более чем на 2 порядка.

В доступных современных научно-технических публикациях рассмотрен ряд аналогов подобного моделирования. Наиболее представительными среди них являются работы F. Mitin & A. Krivushov, Z. Wang et al., S. Kabanov et al.

В работе F. Mitin & A. Krivushov рассматривается моделирование работы системы регулирования формы отражающей поверхности активными вантовыми элементами на основе электродвигателей, без учета силового взаимодействия элементов вантовой формообразующей структуры. А в работах Z. Wang et al. и S. Kabanov et al. рассматривается система на основе монолитных пьезоактуаторов, в которой учитывались нелинейные процессы, происходящие в системе регулирования отражающей поверхности, но не учитывались вязкоупругие деформации (ползучесть и релаксация) вантовой формообразующей системы, контактные взаимодействия и динамическая составляющая процесса регулирования длины вант.

Отметим, что для достоверного моделирования работы системы регулирования отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов необходимо учитывать силовые взаимодействия и вязкоупругие свойства элементов вантовой формообразующей структуры, при динамическом характере процесса регулирования длин вант.

Цель и задачи исследования. Целью работы является обоснование метода регулирования формы отражающей поверхности применением активных вантовых элементов формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезоприводами, позволяющего предотвратить накопление деформаций и ухудшения среднеквадратичного отклонения отражающей поверхности в течение срока активного существования космического аппарата.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Разработка математической модели напряженно-деформированного состояния вантовой формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов космических аппаратов с активными элементами регулирования формы отражающей поверхности.
2. Разработка модели активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности рефлекторов с вантовой формообразующей структурой, позволяющая моделировать динамические аспекты корректировки длин вант.
3. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик активных вантовых элементов с пьезоприводами.
4. Численное моделирование процесса регулирования длины ванта при пошаговой работе пьезопривода.
5. Экспериментальное исследование реализуемости процесса регулирования длины активных вантовых элементов с пьезоприводами.

Научная новизна

1. Впервые при моделировании напряженно-деформированного состояния формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами применяется сочетание геометрической нелинейности вантовой системы, нелинейности контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезоприводов,

вязкоупругого характера деформирования самих вант и динамики процесса регулирования формы отражающей поверхности пьезоприводами. Использование вязкоупругой модели деформирования позволяет прогнозировать накопление деформаций формообразующей системы и отражающей поверхности в течение всего срока активного существования космического аппарата.

2. Разработана модель активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов космических аппаратов, 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.

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

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

5. Разработан подход и получены экспериментальные данные процесса регулирования длин вантовых элементов пьезоприводами на специально созданном стенде, учитывающем нелинейность жесткостей тыльной и фронтальной вантовых сетей рефлектора.

6. Исследованы зоны устойчивой работы пьезопривода типа «Захват», создающего линейное пошаговое продвижение штока касательным периодическим контактным воздействием захвата со скругленной кромкой. Выявленные зоны характеризуют двигательный режим и режим двигательного торможения, а также режим неустойчивой работы в зависимости от частоты питающего электрического напряжения.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Результаты диссертации имеют фундаментальный характер и являются теоретической основой для проектирования крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с системой активного регулирования на основе пьезоприводов, а так же обоснованием метода управления точностью отражающей поверхности рефлектора на орбите.

На практике результаты диссертации в своей совокупности позволяют решать широкий круг задач, возникающих при конструировании крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов и уже нашли применение при проектировании системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора на околоземных орбитах, а также при определении необходимых режимов работы такой системы.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись методы математического моделирования с позиций механики деформированного твердого тела при создании моделей, численные методы, тестирование и сравнение эффективности при численном анализе алгоритмов работы пьезопривода, экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанных моделей.

Область исследования – математические модели системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние активных вантовых элементов с пьезоприводами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Постановка задачи механического поведения формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами при регулировании формы отражающей поверхности, учитывающая комплекс нелинейностей различного рода (геометрической и контактной), реологический характер деформирования (ползучести) вантовых элементов в течение всего срока активного существования космического аппарата и динамический процесс регулирования пьезоприводами.

2. Модель активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов космических аппаратов, учитывающая геометрическую нелинейность формообразующей системы, нелинейность контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезопривода, вязкоупругое деформирование самих вант и моделирующая корректировку длин вант как динамический процесс.

3. Алгоритм численного решения нелинейной задачи механического поведения активных вантовых элементов прецизионной системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезоприводами.

4. Инженерная (одномерная) модель, учитывающая свойства пьезоэлемента и всей колебательной системы, позволяющая определять зону устойчивой и неустойчивой работы пьезопривода.

5. Специально созданный стенд для испытания пьезоприводов, моделирующий нагрузки вантовой формообразующей структуры при процессе регулирования формы отражающей поверхности рефлектора.

6. Результаты экспериментальных исследований зоны устойчивой работы пьезопривода типа «Захват», характеризующие двигательный режим и режим двигательного торможения, а также зоны неустойчивой работы в зависимости от частоты воздействия.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность результатов метода расчета основана на использовании

адекватных математических моделей вантово-оболочечных конструкций с учетом геометрической нелинейности. Сходимость итерационного процесса в методе конечных элементов подтверждена результатами расчетов для различных пространственных сеток конечно-элементной модели рефлекторов. Используются экспериментальные методики и сертифицированное оборудование, а также произведено сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными результатами.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы прошли апробацию на следующих международных и всероссийских конференциях: Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, 11–14 ноября 2014 г., Красноярск; XIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 55-летию Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, 10–14 ноября 2015 г., Красноярск; XX Юбилейная международная научно–практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, 09–12 ноября 2016 г., Красноярск; XXI Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, 08–11 ноября 2017 г., Красноярск; X Всероссийская научная конференция, посвященная 140-летию ТГУ и 50-летию Научно-исследовательского института прикладной математики и механики ТГУ, 03–05 сентября 2018 г., Томск; XXII Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, 12–16 ноября 2018 г., Красноярск; XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–27 апреля 2018 г., Томск; XXIII Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, 11–15 ноября 2019 г., Красноярск.

Публикации. По теме исследования опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные 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, 10 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийской научных и научно-практических конференций. Общий объем публикаций – 5,29 а.л., авторский вклад – 1,55 а.л. В опубликованных работах достаточно полно изложены материалы диссертационной работы.

Внедрение результатов работы. Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы были использованы в работах выполняемых АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», а также в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по соглашениям №14.578.21.0073, №14.578.21.0257.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации. При выполнении работ по теме диссертации автор лично принимал непосредственное участие в разработке методов и моделей, обработке и анализе результатов, подготовке и проведении экспериментов, подготовке статей, тезисов и докладов на конференциях. Совместно с научным руководителем были поставлены цели и задачи, сформулированы основные выводы по диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 112 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 81 наименований, 1 приложения, содержит 89 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели исследования, практическая значимость и новизна представленных результатов, приведены положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе рассмотрено состояние предметной области регулирования формы отражающей поверхности (ОП) для крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов (КТАР). Показан предел достижимого уровня среднеквадратичного отклонения (СКО) для ОП КТАР в зависимости от их диаметра без применения активных систем регулирования длины ванты (СРДВ). Проведен анализ тенденций мирового развития СРДВ, современный уровень разработки. Приведено обоснование использования в таких системах активных элементов на основе пьезоприводов (ПП). Сделан анализ нелинейных взаимодействий в СРДВ, в том числе при взаимодействии с системой ОП КТАР.

Для обеспечения точности ОП космических антенных рефлекторов требуется соблюдение размеростабильности вантовых элементов формообразующей структуры. Однако применяемые композиционные шнуры для вантовых элементов под нагрузкой проявляют ползучесть. С течением времени, напряженно-деформированное состояние рефлектора изменяется – ухудшается точность формы ОП и снижается жесткость конструкции. Таким образом, одной из задач СРДВ является компенсация таких изменений. Другие элементы конструкции рефлектора, выполненные из углеволокон с полимерной матрицей, также проявляют вязкоупругие свойства, однако их вклад в изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) рефлектора существенно меньше вклада, обеспечиваемого ползучестью шнуров.

Для постановки задачи рассмотрим некоторую вантовую конструкцию КТАР (ободную или зонтичную), имеющую систему активного регулирования формы ОП с ПП и занимающую область Ω , представленную набором подобластей Ω_j , $j = 1, 2, \dots, k$ соответствующих элементам конструкции со свойствами упругих, вязкоупругих и пьезоэлектрических материалов. Считается, что физико-механические процессы, происходящие в подобластях Ω_j можно адекватно описать в рамках теорий упругости, вязкоупругости и электроупругости. Пусть $\Gamma = \partial\Omega$ – граница области Ω ; $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\mathbf{x})$ – вектор внешней единичной нормали к Γ ($\mathbf{x} \in \Gamma$).

Связь деформаций и перемещений рассматривается в виде

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,j}u_{k,i}), \quad (1)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора деформаций Грина;

$u_{i,j}$ – частная производная i компоненты вектора перемещения \mathbf{u} по направлению j .

Для моделирования механического поведения в напряженном состоянии элементов силового каркаса и ОП конструкции КТАР в качестве определяющих соотношений использован закон Гука:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E \cdot \varepsilon_{kl}, \quad (2)$$

где c_{ijkl}^E – матрица упругих констант.

Так как композиционные шнуры для вантовых элементов проявляют ползучесть при постоянной нагрузке, то для моделирования процессов деформирования вантовых элементов формообразующей системы КТАР при эксплуатации на околоземных орбитах использованы определяющие соотношения вязкоупругости Ю.Н. Работнова

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \Pi(t - \tau) \sigma(\tau) d\sigma(\tau), \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t - \tau) d\varepsilon(\tau), \quad t \geq 0, \quad (4)$$

где $\Pi(t)$, $R(t)$ – функции ползучести и релаксации. Отсчет времени ведется с момента раскрытия рефлектора ($t=0$) и до времени окончания срока активного существования КА (t_k).

Соотношение (3) позволяет оценивать изменения длин вантовых элементов рефлекторов и соответственно искажения формы ОП. Порядок величин ползучести шнуров при планируемых натяжениях может достигать 10^{-3} , что приводит к удлинению вантовых элементов КТАР длиной до 10 метров на несколько миллиметров. Искажения формы ОП на такие величины считаются неприемлемыми, и требуется их уменьшение до допустимой величины. Для расчетов НДС формообразующей структуры использован модуль упругости, полученный экспериментально при растяжении шнуров с постоянной скоростью.

Для пьезоэлектрической среды $\Omega_j = \Omega_{pk}$, соответствующей пьезопакету ПП состояние среды определяется кроме вектор-функции перемещений $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ также и скалярной функцией электрического потенциала $\varphi = \varphi(\mathbf{x}, t)$. Связь деформаций и перемещений рассматривается, как выражение (1), связь

напряженности электрического поля E и потенциала φ рассматривается в виде

$$E_i = -\varphi_{,i}. \quad (5)$$

Для пьезоэлектрической среды в линейном приближении существует линейная связь между тензором деформаций ε и вектором напряженности электрического поля E с тензором напряжений σ и вектором электрической индукции D . Эти зависимости имеют следующий вид:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E (\varepsilon_{kl} + \beta_d \cdot \dot{\varepsilon}_{kl}) - e_{kij} E_k, \quad (6)$$

$$D_i = e_{ikl} \varepsilon_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k, \quad (7)$$

где c_{ijkl}^E , e_{ikl} , ϵ_{ik}^S – материальные константы характеризующие, соответственно, упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические свойства материала соответствующих элементов конструкции рефлектора, β_d – второй коэффициент демпфирования по Релею (конструкционный коэффициент).

В силу того, что скорости упругих и электромагнитных волн отличаются на порядки, а пьезоэлектрические среды являются диэлектриками, можно принять уравнение приближения квазиэлектростатики вида

$$D_{i,i} = \sigma_\Omega, \quad (8)$$

где σ_Ω – объемная плотность электрических зарядов, причем $\sigma_\Omega = 0$.

Подставляя определяющие соотношения (6) и (7) и формулы (1) и (2) в уравнение движения и (8), получаем итоговую систему дифференциальных уравнений электроупругости относительно функций u и φ :

$$\rho \ddot{u}_i + \alpha_d \rho \dot{u}_i - \left(c_{ijkl}^E (u_{k,l} + \beta_d \dot{u}_{k,l}) - e_{kij} \varphi_{,k} \right)_{,j} = f_i, \quad (9)$$

$$\left(e_{ikl} u_{k,l} - \epsilon_{ik}^S \varphi_{,k} \right)_{,i} = \sigma_\Omega, \quad (10)$$

Граничные условия подразделяются на механические и электрические.

Для формулировки механических граничных условий предполагается, что граница Γ разбивается на три участка Γ_u , Γ_σ и Γ_{cont} .

Тогда механические граничные условия для закрепленных точек поверхности тел имеют вид

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_u. \quad (11)$$

Граница контакта Γ_{cont} разделяется на два участка: граница сцепления $\Gamma_{сц}$ и граница проскальзывания $\Gamma_{ск}$. Контактное взаимодействие элементов ПП характеризуется действием только нормальных напряжений $\sigma_{ПП}$ и является заданным в начальный момент времени $\sigma_{ПП}^0$.

Условие сцепления двух тел имеет вид

$$\tau \leq \mu \sigma, \quad (12)$$

где τ – тангенциальное напряжение, σ – нормальное напряжение, μ – коэффициент трения.

Полное сцепление двух тел означает, что

$$u_i^+(\mathbf{x}) = u_i^-(\mathbf{x}) \text{ при } \mathbf{x} \in \Gamma_{сц}, \quad (13)$$

где u_i^+ и u_i^- – перемещения противоположащих точек контактной поверхности двух тел.

В области проскальзывания действует закон трения Кулона:

$$\tau = \mu\sigma(\mathbf{x}, t) \text{ при } \mathbf{x} \in \Gamma_{\text{ск}}. \quad (14)$$

На границы Γ_{σ} – боковой свободной поверхности элементов задаются граничные условия с нулевыми нормальными и касательными напряжениями.

Для задания электрических граничных условий будем считать, что существует независимое разбиение границы Γ : $\Gamma = \Gamma_{\varphi} + \Gamma_D$.

На границе Γ_{φ} нанесены электроды, которые питаются генератором напряжения с выходным потенциалом $V(t)$, то

$$\varphi = V(t), \mathbf{x} \in \Gamma_{\varphi}, \quad (15)$$

На границе пьезоэлектрического материала Γ_D , где нет электродов, задается поверхностная плотность электрических зарядов:

$$\mathbf{n}^* \cdot \mathbf{D} = 0, \mathbf{x} \in \Gamma_D, \quad (16)$$

Начальные условия для точек области Ω при $t = 0$ поле перемещений \mathbf{u} , скоростей $\dot{\mathbf{u}}$ и напряжений σ_{ij} предполагаются заданными

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad (18)$$

$$\sigma_{ij}(\mathbf{x}, 0) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{x}), \quad (19)$$

где $\sigma_{ij}^0(\mathbf{x})$ – начальное напряжение в элементах конструкции.

Таким образом, постановка задачи анализа НДС формообразующей системы с ПП включает систему дифференциальных уравнений (9) и (10), граничные условия (11) – (16) и начальные условия (17) – (19).

Во второй главе рассматривается разработка представительной модели активных вантовых элементов с ПП и анализ НДС этой системы.

Для построения представительной модели активных вант с ПП проведены расчеты НДС КТАР показанного на рисунке 1. Основная цель этих расчетов заключалась в определении силового упругого воздействия со стороны тыльной и фронтальной сетей на концы вантовых элементов (оттяжки) с ПП.

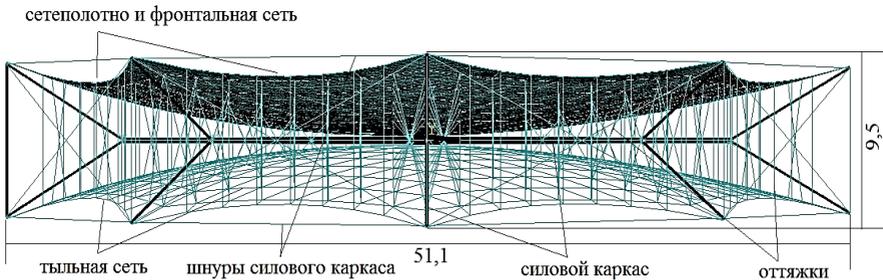


Рисунок 1 – Конструкция крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора космического аппарата

На основании анализа НДС предложена представительная модель активного вантового элемента (оттяжки) с нелинейными упругими связями (рисунок 2), по силовому воздействию эквивалентными рассчитанным силовым воздействиям тыльной и фронтальной сети рефлектора (рисунок 1).

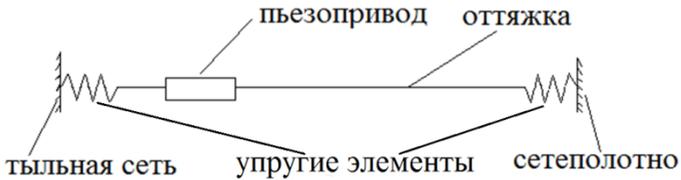


Рисунок 2 – Механическая схема активного вантового элемента с ПП

На рисунке 2 упругие элементы моделируют воздействие фронтальной сети с сетеполотном и тыльной сети. Оттяжке задавалось граничное условие в виде предварительного натяжения равного 10 Н (проектное натяжение вантовых оттяжек рефлектора), а упругим элементам задавались граничные условия в виде определенной зависимости силы от изменения длины. Расчеты показывают, что точки ОП в узлах крепления вант смещаются на величину более 2,5 мм (при длине ванты 6,5 м) относительно начальной радиотехнической формы, что характеризует жесткость формообразующей системы.

На рисунке 3 представлена расчетная модель контактной пары захват-шток, которая рассматривалась в двумерной постановке. В расчетной модели упругий элемент (6) по жесткости равен сумме жесткостей тыльной и фронтальной сетей.

Работоспособность ПП зависит от надежности контактной пары захват (1)-шток (2) (рисунок 3).

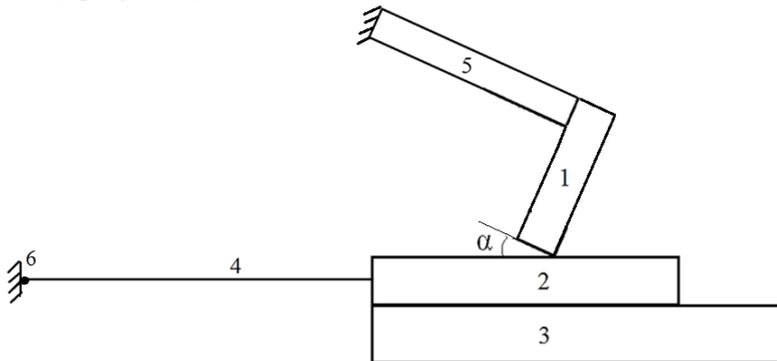


Рисунок 3 – Расчетная геометрическая модель ПП типа «Захват»

Геометрическая модель ПП типа «Захват» состоит из шести элементов: захват (1), шток (2), корпус (3), вант рефлектора (4), пьезопакет АПМ 2-22 (5) и упругий элемент (6). В задаче учитывается корпус, потому что необходимо учесть силу трения штока о корпус. Захват к поверхности штока располагается под углом α . Взаимодействие системы ПП и ванты с другими элементами конструкции рефлектора моделируется упругим элементом.

Моделирование НДС элементов ПП при заданных рабочих нагрузках проводилось с использованием программного конечноэлементного комплекса ANSYS. На основе геометрической модели строилась КЭМ. В расчетной модели учитываются две пары контактов: захват-шток (тип: узел-поверхность) и шток-корпус (тип: поверхность-поверхность). Граничные условия в расчетной модели: корпус ПП, упругий элемент и левая грань пьезопакета жестко закреплены по всем направлениям.

В конструкции ПП захват упирается скругленной гранью в поверхность штока, тем самым прижимая шток к поверхности корпуса. От угла наклона захвата к поверхности штока α зависит величина перемещения штока и максимальная интенсивность напряжений в зоне контакта захвата и штока. При подаче электрического напряжения (управляющего сигнала) на пьезопакет, он удлиняется и касательно (с учетом трения) воздействует на захват, перемещая его.

Численный анализ показал, что максимальная интенсивность напряжения σ_u в зоне контакта захвата и штока, которая должна определять упругое деформирование материалов контактирующих элементов конструкции ПП, зависит от количества элементов в области контакта (рисунок 4а). График, обобщающий результаты статического анализа, приведен на рисунке 4б. По графику видно, что сеточная сходимость решения наблюдается, когда в зоне контакта содержится не менее 4 элементов.

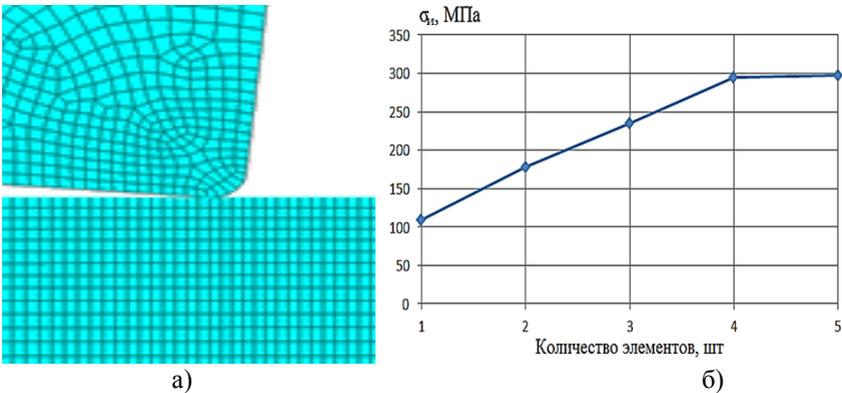


Рисунок 4 – Сеточная сходимость решения контактной задачи захват-шток:
 а) пример разбиения зоны контакта захвата и штока на конечные элементы;
 б) график сеточной сходимости решения по максимальной интенсивности напряжений от количества элементов в зоне контакта

По результатам расчетов, выбран оптимальный угол наклона для максимального перемещения штока при натяжении вантового элемента. Совместно с величиной перемещения в каждом рассмотренном случае оценивалась интенсивность напряжений в области контакта захвата и штока.

В таблице 1 представлены результаты моделирования величины перемещения штока при перемещении захвата на заданную величину.

Анализ результатов моделирования НДС конструкции ПП типа «Захват» показал, что при увеличении угла наклона α перемещение штока уменьшается. При увеличении угла наклона возрастает нормальная составляющая силы к поверхности штока и уменьшается величина осевого перемещения штока. При уменьшении угла наклона α есть момент, когда вертикальная (прижимная) составляющая силы контактного взаимодействия становится не достаточной для перемещения штока и захват начинает проскальзывать. Такой процесс наблюдается при угле наклона $\alpha \leq 4^\circ$. По результатам моделирования определен максимальный порог величины перемещения штока равный $X = 0,33 \cdot 10^{-4}$ м при угле наклона $\alpha = 5^\circ$. По результатам оценки максимума интенсивности напряжений в каждом из этих случаев, наиболее оптимальным является расчетный случай при угле наклона $\alpha = 5^\circ$, при этом $\sigma_u = 295$ МПа (предел пропорциональности стали).

Таблица 1 – Результаты моделирования величины перемещения штока и интенсивность напряжений в области контакта

Угол наклона $\alpha, ^\circ$	Перемещения по оси $X, 10^{-4}$ м	Максимальная интенсивность напряжений σ_u , МПа
45	3,34	236
30	3,34	349
20	3,34	546
10	10	971
5	33,9	295
3	29	254
2	25,4	210
1	22,1	92,1

Так как предполагается периодическое импульсное электрическое питание ПП, то проведен анализ собственных частот рассматриваемой механической системы (рисунок 2). Полученные результаты конечноэлементных расчетов показали, что наиболее вероятным при динамическом нагружении является резонансный процесс с наибольшей эффективной массой 0,826 кг для собственной частоты № 3 при 2,321 Гц.

Учитывая, что рабочая частота ПП находится в диапазоне 20 – 50 Гц, динамическая нагрузка от пьезоэлемента не может вызвать резонанса, так как собственная частота №7 (22,09 Гц) в этом интервале частот имеет незначительную эффективную массу, а именно, 10^{-4} кг. Остальные собственные частоты для рассматриваемой представительной модели активного вантового элемента с ПП в рабочий диапазон частот ПП не попадают.

Проведенный анализ форм и частот собственных колебаний соответствует идеализированной упругой модели, не учитывающей демпфирование в этой

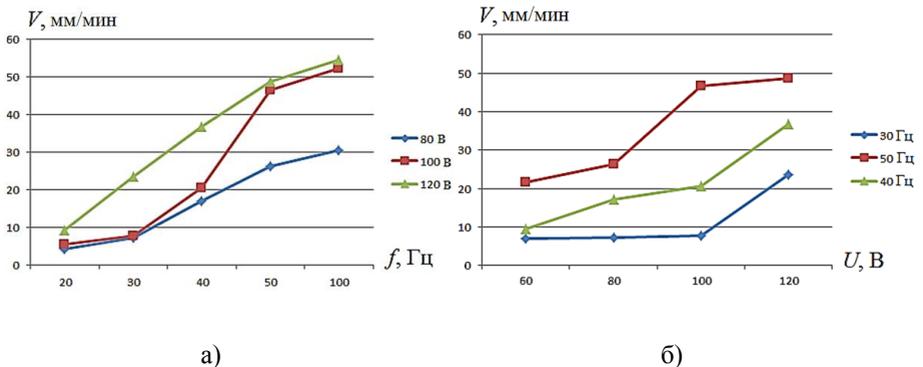
колебательной системе. Для более адекватного анализа проведен динамический анализ модели активного вантового элемента с ПП системы регулирования формы ОП космического рефлектора с учетом демпфирования.

В расчетной модели на пьезопакет ПП подавалось электрическое напряжение в виде пилообразного сигнала. При этом варьировалась амплитуда и частота электрического напряжения. В результате решения получены зависимости величины перемещения штока от времени.

По результатам моделирования выявлено влияние выбранных параметров режима работы ПП (амплитуды U и частоты f электрического напряжения) на максимальную скорость перемещение штока с нагрузкой в виде упругого элемента с нелинейными свойствами (рисунок 5). Анализ полученных данных показал, что зависимости средней скорости штока ПП V_{cp} от частоты и амплитуды питающего напряжения имеют возрастающий характер.

Для определения достоверности предложенной конечноэлементной модели проведено сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных. Задавались одинаковые условия: амплитуда напряжения $U = 100$ В, частота сигнала $f = 30$ Гц. Проведено сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей средней скорости перемещения штока от силы сопротивления упругого элемента, показавшее наибольшее расхождение не более 18 % (рисунок 6).

Использование данного подхода для моделирования процесса работы ПП позволяет произвести выбор материалов для изготовления конструкции ПП и выбрать оптимальный режим работы ПП.



- а) зависимость скорости штока от частоты управляющего сигнала при разных амплитудах напряжения; б) зависимость скорости штока от амплитуды напряжения управляющего сигнала при разных частотах

Рисунок 5 – Результаты численного моделирования

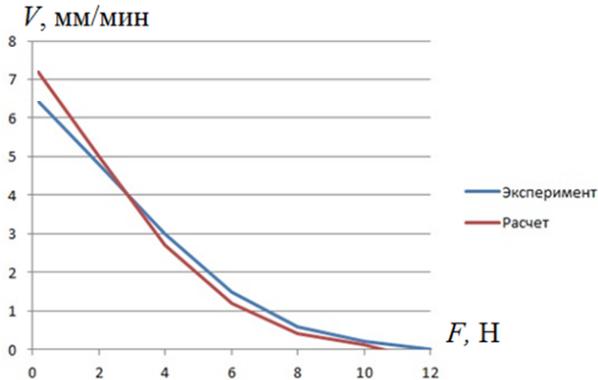


Рисунок 6 – Расчетная и экспериментальная зависимости скорости движения штока ПП от силы сопротивления растягиваемого упругого элемента

В третьей главе описывается разработка одномерной математической модели для расчетов колебательной системы СРДВ при различной инерционной нагрузке методом электрических аналогий, а также моделирование работы экспериментальной установки при различных условиях.

При математическом моделировании ПП были приняты 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.

Преобразование электрической энергии в механическую энергию происходит в колебательной системе, которая состоит из: колебательной подсистемы ПП и подсистемы нагрузки. Для описания процесса поведения механической системы ПП рассматривается уравнение движения:

$$M_{\Sigma} \cdot \ddot{x} + R_{\Sigma} \cdot \dot{x} + K_{\Sigma} \cdot x + F_{nag} = \frac{d_{33} \cdot n \cdot U \cdot S_0}{S_{33}^E \cdot l} - \frac{x \cdot S_0}{l \cdot S_{33}^E}, \quad (20)$$

где M_{Σ} – суммарная масса движущихся частей ПП и нагрузки (спиц рефлектора или нагрузки испытательного стенда); $x = x(t)$, $\dot{x} = \dot{x}(t)$, $\ddot{x} = \ddot{x}(t)$ – вибрсмещение, виброскорость и виброускорение штока ПП соответственно; d – пьезоэлектрический модуль; R_{Σ} – коэффициент диссипации (рассеяния) энергии на трение и полезную работу за цикл работы ПП и конструкции рефлектора или испытательного стенда; K_{Σ} – суммарная жесткость ПП и конструкции рефлектора или испытательного стенда; F_{nag} –

сила, создаваемая нагрузкой; $U = U(t)$ – напряжение питания пьезопакета ПП; S_0 – площадь поперечного сечения пьезопакета; S_{33}^E – упругая податливость пьезокерамики; l – толщина пьезопластины.

Для определения наиболее эффективного режима работы ПП проводилось численное решение уравнения (20) с использованием пакета прикладных программ Mathcad. Варьировались параметры сигнала управления ПП (частота и амплитуда питающего напряжения) и масса груза. Результаты расчетов приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета режимов работы ПП

f, Гц	U, В	m, г	V, мм/мин
20	50	500	5,3
20	50	1000	3,3
20	50	2000	3,93
50	50	2000	10,57
100	50	2000	13,21
200	50	2000	52,81
20	100	2000	7,9
50	100	2000	15,8
100	100	2000	39,6
200	100	2000	79,3

Полезная механическая мощность ПП определяется выражением:

$$P = F_{\text{наг}} \cdot V_{\text{наг}}, \quad (21)$$

где $F_{\text{наг}}$ – вес груза, Н; $V_{\text{наг}}$ – скорость движения подвижных частей ПП.

С использованием математической модели (20) проанализирована нелинейная колебательная система ПП с точки зрения полезной механической мощности. Условия моделирования: вес груза $m = 0,5$ кг, частота сигнала управления $f = 50$ Гц и амплитуда напряжения сигнала управления $U = 50$ В. Для выбранных параметров режима работы ПП механическая мощность имеет четкую периодичность и положительное значение средней механической мощности, следовательно, ПП имеет двигательный режим работы (рисунки 7–9).

Рассчитаны режимы работы ПП, позволяющие разделить двигательный режим работы, при выполнении условия: $F_{\text{пп}} > F_{\text{наг}}$, и режим динамического торможения ПП, при выполнении условия: $F_{\text{пп}} < F_{\text{наг}}$, где $F_{\text{пп}}$ – сила развиваемая пьезопакетом.

Основными критериями устойчивой работы ПП являются:

- периодичность механической мощности ПП;
- положительное значение средней механической мощности ПП.

На рисунке 10 представлена схема определения двигательного режима работы ПП при постоянном сигнале управления (амплитуда напряжении $U = 50$ В и частота сигнала управления $f = 50$ Гц) с изменением массы груза.

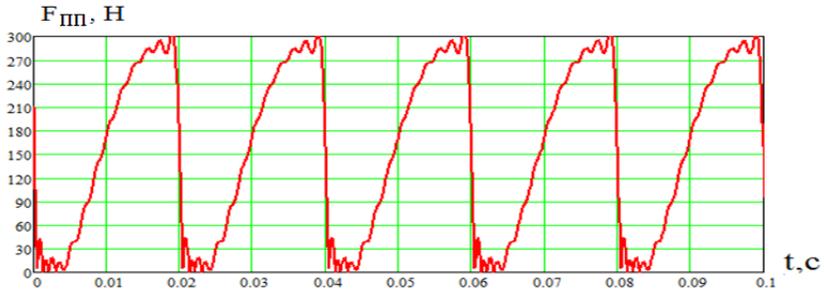


Рисунок 7 – Зависимость силы развиваемой пьезопакетом от времени

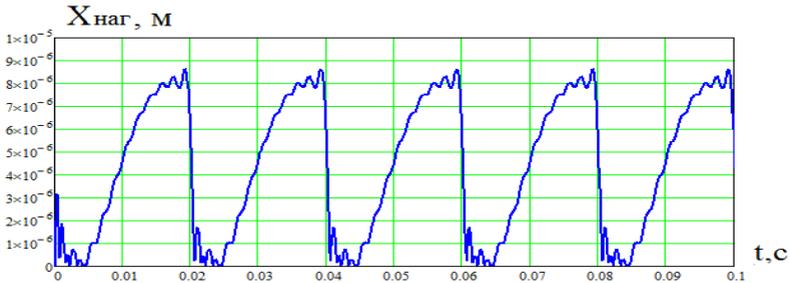
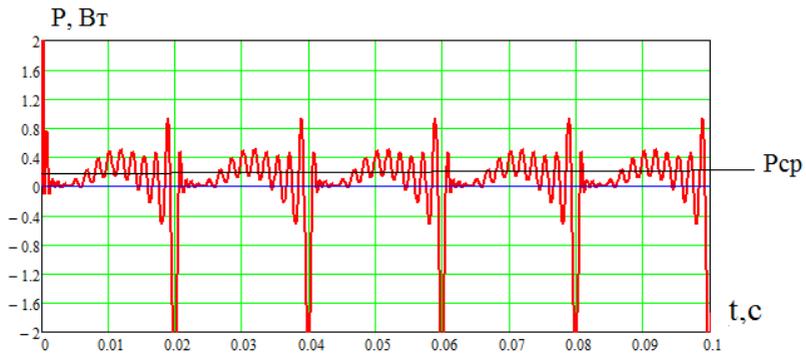


Рисунок 8 – Зависимость перемещения захвата ПП от времени

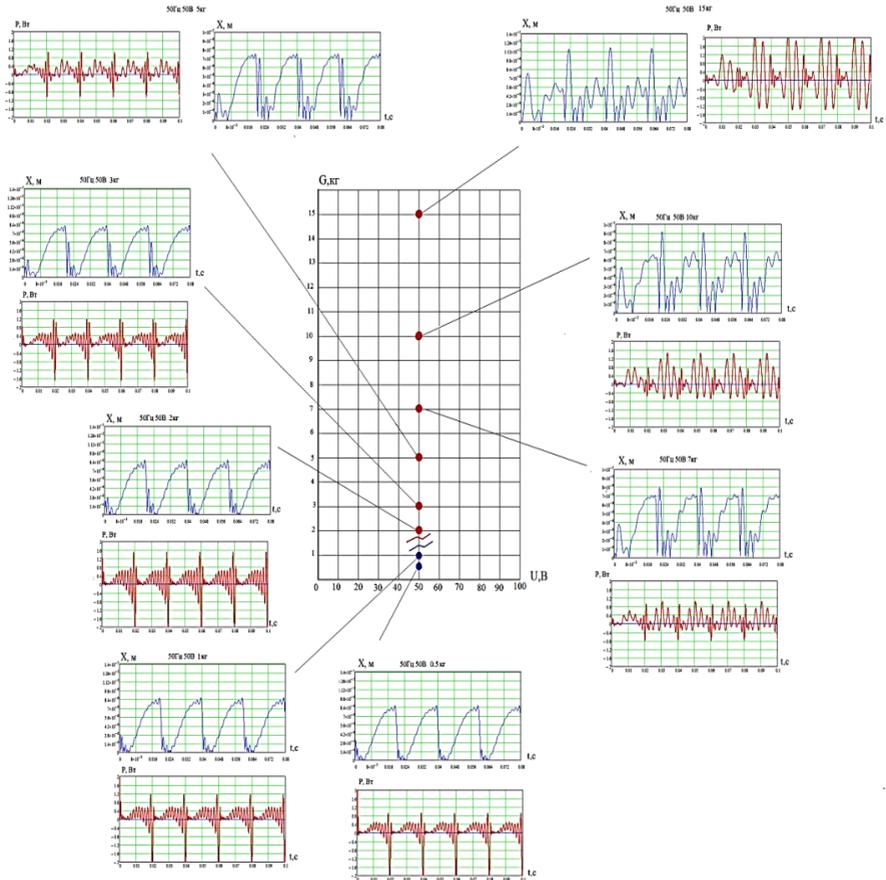


$P_{\text{ср}}$ – средняя механическая мощность

Рисунок 9 – Зависимость механической мощности ПП от времени

По результатам численного анализа определена граница разделения режимов работы ПП, которая при выбранных параметрах расчета находится в интервале от 1,0 до 2,0 кг. При массе груза выше 2,0 кг форма механической мощности ПП теряет периодичность, появляется модуляция

мощности, значение средней механической мощности близко к нулю. В этом случае двигательный режим ПП отсутствует. При амплитуде напряжения $U = 100$ В и частоте сигнала управления $f = 50$ Гц – граница разделения режимов работы расположена в интервале от 2,0 до 3,0 кг.



Синие точки – двигательный режим работы ПП,
красные точки – режим динамического торможения ПП

Рисунок 10 – Схема определения двигательного режима работы ПП

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты работы ПП при нагрузке максимально приближенной к рабочей нагрузке СРДВ, а так же проведен анализ экспериментальных данных и результатов математического расчета, с целью оценки точности построения и работоспособности математических моделей для эффективного проектирования подобного типа конструкций.

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены опытный образец ПП и стенд для его испытаний. Анализ экспериментальных данных показал, что максимальное отрицательное значение силы, приводящей к проскальзыванию захвата относительно штока, совпадает с максимальным отрицательным значением ускорения подвижных частей механической системы ПП.

Результаты экспериментальных исследований зависимости режимов работы ПП при различных параметрах (вес груза, амплитуда напряжения и частота сигнала управления) представлены в таблице 3. Анализ результатов показал, что с увеличением частоты и амплитуды напряжения сигнала управления скорость движения штока с грузом увеличивается, причем при увеличении веса груза скорость движения штока падает практически линейно.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований ПП

f, Гц	20	140	156	150	178	500
U, В	80	140	100	150	80	100
G, кг	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
V, мм/мин	1,2	1,5	1,5	3,0	1,8	9,96
X_ш, мкм*	1,0	0,18	0,16	0,33	0,17	0,33
P, Вт	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,83 \cdot 10^{-3}$

* X_ш – величина перемещения штока за период сигнала управления

Перемещение захвата относительно штока в сторону нагрузки ограничивается силой трения обратного хода захвата F_{fr2} , которая много меньше силы трения прямого хода захвата F_{fr1} , $F_{fr1} \gg F_{fr2}$. Это особенность данного контакта позволяет организовать пошаговый режим движения штока вместе с нагрузкой.

В результате численного моделирования пошагового режима работы ПП определено, что при резком сбросе напряжения на пьезопакете ПП (отрицательный фронт смещения) образуется отрицательное ускорение, которое дает появление силы F_d с отрицательным знаком. В такой зоне сила F_d может превышать вес груза и силу трения, что приводит к нарушению контакта «Захват-шток» и перемещению захвата относительно штока. При снижении силы F_d контакт «Захват-шток» восстанавливается. Происходит пошаговый режим работы ПП.

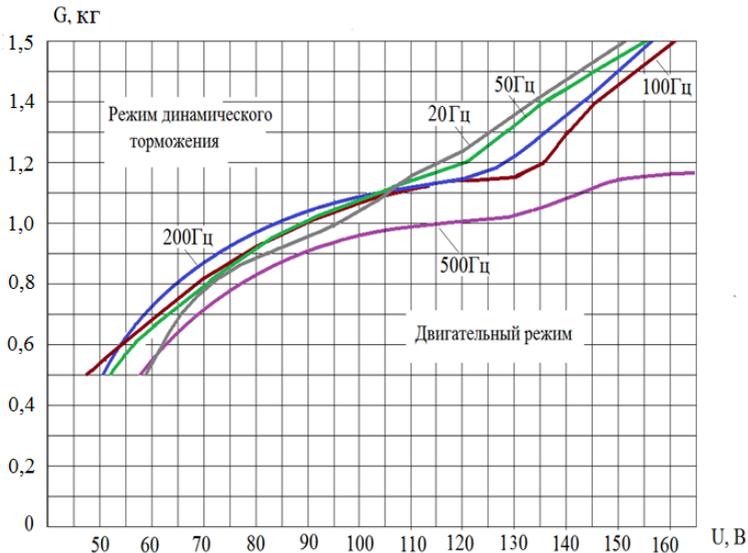
Анализ теоретических и экспериментальных расчетов показал, что сила F_d является определяющей в организации пошагового режима ПП. Величина силы F_d зависит от максимального смещения колебательной системы ПП и от времени отрицательного фронта сигнала управления. Регулирование силы F_d возможно амплитудой напряжения сигнала управления.

В результате экспериментальных исследований ПП выявлены диапазоны его устойчивой работы при разной нагрузке (вес груза) с учетом параметров управляющего сигнала (амплитуда напряжения и частота сигнала) (рисунок 11).

Двигательный режим работы ПП характеризуется устойчивым подъемом груза при превышении силы F_d над весом груза и силой трения подвижных частей ПП. На рисунке 11 а двигательный режим расположен ниже разделительной зоны равновесия.

Режим динамического торможения характеризуется устойчивым опусканием груза при превышении веса груза и силы трения подвижных частей ПП над силой F_d . На рисунке 11 а режим динамического торможения расположен выше разделительной зоны равновесия.

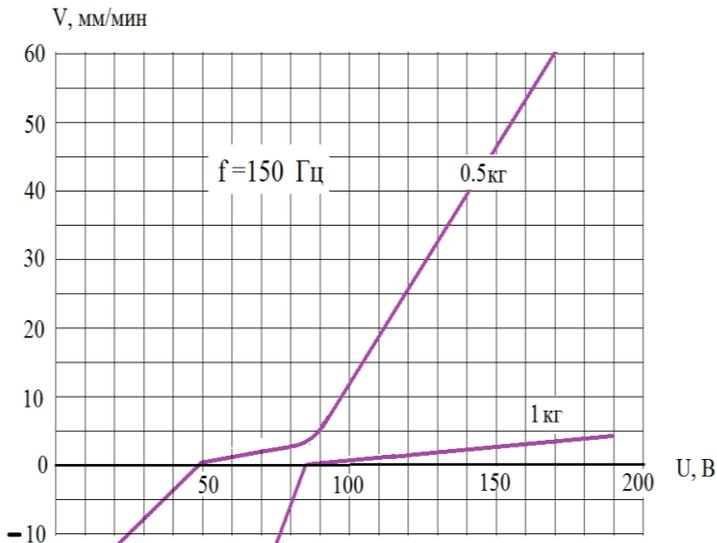
Разделительная зона равновесия характеризуется равенством силы F_d и веса груза с силой трения подвижных частей ПП. При этом скорость перемещения груза равна нулю. На рисунке 11 б показаны зависимости скорости движения штока от амплитуды напряжения сигнала управления. Кривые, представленные на рисунке 11 б, показывают увеличение скорости движения штока с увеличением амплитуды напряжения сигнала управления. Но с увеличением веса груза скорость движения штока снижается: при одинаковых параметрах сигнала управления (частота $f = 150$ Гц, амплитуда питающего напряжения $U = 100$ В) и весе груза 0,5 кг скорость движения штока составляет 12 мм/мин, а при весе груза 1,0 кг – составляет 2 мм/мин.



а)

а) границы режимов устойчивой работы ПП при разных частотах воздействия от амплитуды управляющего напряжения

Рисунок 11, а – Экспериментальные зависимости скорости от величины наибольшего напряжения питания ПП на основе пакета АПМ-2-22



б)

б) зависимости скорости движения штока от амплитуды управляющего напряжения

Рисунок 11, б – Экспериментальные зависимости скорости от величины наибольшего напряжения питания ПП на основе пакета АПМ-2-22:

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Поставлена задача о напряженно-деформированном состоянии формообразующей структуры крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами прецизионной системы регулирования формы отражающей поверхности, учитывающая геометрическую нелинейность формообразующей системы, нелинейность контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезопривода, вязкоупругое деформирование самих вант и позволяющая прогнозировать состояние системы в период всего срока активного существования космического аппарата.

2. Разработана электроупругая модель активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов космических аппаратов, учитывающая геометрическую нелинейность формообразующей системы, нелинейность контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезопривода и вязко-упругость деформирования самих вант с рассмотрением корректировки длин вант как динамический процесс.

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

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

5. Получены новые экспериментальные данные процесса регулирования формы отражающей поверхности рефлектора с вантовой формообразующей структурой на специально разработанном стенде, учитывающем нелинейность жесткости тыльной и фронтальной сетей рефлектора.

6. Исследованы зоны устойчивой работы пьезопривода типа «Захват», характеризующие двигательный режим и режим двигательного торможения, а также зоны неустойчивой работы в зависимости от частоты воздействия.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список работ, опубликованных в журналах, включенных Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Азин А. В. Моделирование контактного взаимодействия элементов пьезоэлектрического двигателя / А. В. Азин, **С. А. Кузнецов**, С. А. Пономарев, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен // Космические аппараты и технологии. – 2019. – Т. 3, № 4 (30). – С. 222–229. – DOI 10.26732/2618-7957-2019-4-222-229. – 0.73 / 0.14 а.л.

2. Азин А. В. Математическое моделирование процесса работы пьезодвигателя типа «Захват» / А. В. Азин, **С. А. Кузнецов**, С. А. Пономарев, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен // Космические аппараты и технологии. – 2019. – Т. 3, № 3 (29). – С. 164–170. – DOI 10.26732/2618-7957-2019-3-164-170. – 0.59 / 0.22 а.л.

3. Бельков А. В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций космических антенных рефлекторов / А. В. Бельков, С. В. Белов, А. П. Жуков, М. С. Павлов, С. В. Пономарев, **С. А. Кузнецов** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 62. – С. 5–18. – DOI: 10.17223/19988621/62/1. – 0.63 / 0.21 а.л.

Web of Science: Belkov A. V. Method for calculation of the stress-strain state for cable-membrane space reflector structures / A. V. Belkov, S. V. Belov, A. P. Zhukov, M. S. Pavlov, S. V. Ponomarev, **S. A. Kuznetsov** // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta-Matematika i mekhanika –Tomsk state university journal of mathematics and mechanics. – 2019. – № 62. – С. 5–18.

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science:

4. Belov S. Numerical modeling of space umbrella-type mesh reflector [Electronic resource] / S. Belov, A. Belkov, A. Zhukov, M. Pavlov, **S. Kuznetsov**, S. Ponomarev // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 221 : XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS-2019). Tomsk, Russian Federation, June 24–28, 2019. – Article number 01004. – 8 p. – DOI: 10.1051/epjconf/201922101004. – URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2019/26/epjconf_epps2018_01004.pdf (access date: 26.12.2019). – 0.4 / 0.08 а.л.

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

5. Azin A. Alignment of distributed oscillation systems in piezo motors [Electronic resource] / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev, **S. Kuznetsov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1145, i. 1 : XV International Conference of Students and Young Scientists «Prospects of Fundamental Sciences Development». Tomsk, Russian Federation, April 24–27, 2018. – Article number 012007. – 8 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/1145/1/012007. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1145/1/012007/pdf> (access date: 26.12.2019). – 0.50 / 0.10 а.л.

6. Azin A. Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system [Electronic resource] / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev, N. Maritsky, **S. Kuznetsov**, // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2103 : 10th All-Russian Conference on Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics, FAPMM 2018. Tomsk, Russian Federation, September 03–05, 2018. – Article number 020001. – 9 p. – DOI: 10.1063/1.5099865. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5099865?class=pdf> (access date: 26.12.2019). – 0.33 / 0.06 а.л.

7. Azin A. Design issues of the piezo motor for the spacecraft reflector control system [Electronic resource] / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev, **S. Kuznetsov** // MATEC Web of conferences. – 2018. – Vol. 158 : 6th International Forum for Young Scientists on Space Engineering 2018. Tomsk, Russian Federation, April 26–28, 2018. – Article number 01005. – 4 p. – DOI: 10.1051/mateconf/201815801005. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/17/mateconf_se2018_01005.pdf (access date: 26.12.2019) – 0.23 / 0.04 а.л.

Публикации в прочих научных журналах:

8. Азин А. В. Моделирование режимов работы линейных пьезоэлектрических двигателей / А. В. Азин, **С. А. Кузнецов**, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен // Решетневские чтения : материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 11–15 ноября 2019 г. – Красноярск, 2019. – Ч. 1. – С. 74–75. – 0.13 / 0.05 а.л.

9. Азин А. В. Согласование распределенных колебательных систем пьезодвигателей / А. В. Азин, **С. А. Кузнецов**, С. В. Рикконен // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 24–27 апреля 2018 г. – Томск, 2018. – Т. 3. – С.13–15. – 0.20 / 0.04 а.л.

10. Азин А. В. Регулирование формы отражающей поверхности вантово-оболочечных конструкций космических антенных рефлекторов / А. В. Азин, С. В. Белов, **С. А. Кузнецов**, Н. Н. Марицкий // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 24–27 апреля 2018 г. – Томск, 2018. – Т. 3. – С.31–33. – 0.20 / 0.05 а.л.

11. Азин А. В. Разработка прецизионных приводов для систем регулировки формы отражающей поверхности рефлектора космического аппарата / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, Н. Н. Марицкий, **С. А. Кузнецов** // Решетневские чтения : материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 12–16 ноября 2018 г. – Красноярск, 2018. – Ч.1. – С. 67–69. – 0.33 / 0.08 а.л.

12. Пономарев С. В. Разработка автономного натяжителя вантовых элементов рефлектора космического аппарата / С. В. Пономарев, **С. А. Кузнецов**, С. В. Рикконен, А. В. Азин, А. М. Храмцов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ–2018) : сборник трудов X Всероссийской научной конференции, посвященной 140-летию ТГУ и 50-летию Научно-исследовательского института прикладной математики и механики ТГУ. Томск, 03–05 сентября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 105–107. – 0.21 / 0.06 а.л.

13. Азин А. В. Особенности применения двухконтурных упругих преобразователей в пьезоприводах типа «Захват» / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, Н. Н. Марицкий, **С. А. Кузнецов** // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ–2018) : сборник трудов X Всероссийской научной конференции, посвященной 140-летию ТГУ и 50-летию Научно-исследовательского института прикладной математики и механики ТГУ. Томск, 03–05 сентября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 140–141. – 0.16 / 0.03 а.л.

14. Азин А. В. Экспериментальные исследования режимов работы физической модели линейного пьезопривода / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, **С. А. Кузнецов** // Решетневские чтения : материалы XXI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск, 08–11 ноября 2017 г. – Красноярск, 2017. – Ч. 1. – С. 59–60. – 0.16 / 0.04 а.л.

15. Халиманович В. И. Разработка технических решений платформы космических аппаратов для системы персональной подвижной спутниковой

связи в интересах шанхайской организации сотрудничества / В. И. Халиманович, А. В. Кузовников, С. В. Единосяк, А. В. Яковлев, **С. А. Кузнецов** // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск, 09–12 ноября 2016 г. – Красноярск, 2016. – Ч. 1. – С. 58–59. – 0.17 / 0.11 а.л.

16. Халиманович В. И. Разработка концепции системы персональной подвижной спутниковой связи для шанхайской организации сотрудничества / В. И. Халиманович, А. В. Кузовников, С. В. Единосяк, К. Г. Охоткин, **С. А. Кузнецов** // Решетневские чтения : материалы XIX Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 10–14 ноября 2015 г. – Красноярск, 2015. – Ч.1. – С. 258–259. – 0.24 / 0.18 а.л.

17. Халиманович В. И. Разработка системы персональной подвижной спутниковой связи для Шанхайской организации сотрудничества / В. И. Халиманович, А. В. Кузовников, С. В. Единосяк, К. Г. Охоткин, **С. А. Кузнецов** // Решетневские чтения : материалы XVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 11–14 ноября 2014 г. – Красноярск, 2014. – Ч.1. – С. 202–203. – 0.08 / 0.06 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
Заказ № 6079 от «20» февраля 2020 г. Тираж 100 экз.
г. Томск Московский тр.8 тел. 53-15-28