

На правах рукописи



Митин Фёдор Васильевич

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ФОРМЫ  
КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(в технике и технологиях)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кабанов Сергей Александрович**

Официальные оппоненты: **Шишлаков Владислав Фёдорович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
проректор по образовательным технологиям  
и инновационной деятельности

**Савочкин Павел Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Военно-космическая академия имени  
А.Ф.Можайского, заместитель начальника кафедры  
передающих, антенно-фидерных устройств и СЕВ

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный научный центр Научно-  
исследовательский институт системных  
исследований Российской академии наук», Москва

Защита состоится 22 января 2020 года в 14.00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.121.03, созданного при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 20 декабря 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 999.121.03,  
д-р техн. наук, профессор



М.В. Буйневич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с «Основными положениями основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу», утверждёнными Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 года № Пр-906 определены главные цели, приоритеты и задачи в области исследования, освоения и использования космического пространства. Среди них создание информационных полей, обеспечивающих непрерывную связь, навигацию, оперативное получение данных наблюдения Земли и атмосферы из космоса, получение данных о космосе, Земле и других небесных телах для развития фундаментальной науки. В связи с этим важной является задача создания таких спутниковых систем, которые будут выполнять поставленные задачи.

Одним из наиболее перспективных видов космических аппаратов (КА), используемых для создания информационных полей являются крупногабаритные трансформируемые рефлекторы (КТР). Создание таких систем является устойчивой тенденцией среди государств, участвующих в освоении космоса. Такими разработками на данном этапе владеют США и Япония. Активные исследования проводят страны ЕС, России и Китая. Но в связи с технической сложностью проблемы, лётные образцы имеют единицы стран.

Для наиболее используемых диапазонов дециметровых и сантиметровых волн возникает потребность в создании антенн диаметром от 10 до 50 м. Для реализации услуг подвижной связи в полосах  $L$  и  $S$  диапазона необходимо использовать системы диаметром более 12 м.

К КТР предъявляют повышенные требования по жесткости конструкции, отсутствию колебаний, обусловленные необходимостью ориентации антенны и обеспечением высокой точности радиоотражающего сетеполотна. Основная проблема таких конструкций заключается в надёжном и плавном их раскрытии после выведения на орбиту, что приводит к решению задачи оптимального управления развёртыванием данного типа КА.

Особую актуальность вопросу придает тот факт, что за последнее десятилетие достигнут огромный прогресс в компьютерной технике, который позволяет выполнять объёмные вычислительные операции за короткое время.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами конструирования и исследованием поведения рефлекторов занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Д.В. Бакулин, С.В. Борзых, В.И. Гуляев, В.Н. Зимин, С.В. Пономарев, В.А. Солоненко, П.П. Телепнев, Н.А. Тестоедов, Д.Б. Усманов, В.И. Халиманович, А.А. Ящук, J.M. Hedgepeth, G. Tibert, C.–Y. Lai, L. Datashvili,

F.W. Kan и др. Также эти вопросы рассмотрены в работах ведущих специалистов предприятий космической отрасли: ЦНИИмаш, НПО имени С.А. Лавочкина, РКЦ "Прогресс", РКК "Энергия", АО "ИСС", ОАО "Корпорация "ВНИИЭМ", Lockheed Missiles and Space Company, Harris Corporation, TRW AstroAerospace, NT Space.

Развитию теории оптимального управления и разработке вычислительных алгоритмов посвящено множество работ известных авторов, среди которых: Р.Э. Беллман, В.Г. Болтянский, А. Брайсон, В.Н. Буков, С.А. Горбатенко, В.И. Гурман, С.А. Кабанов, М.Н. Красильщиков, А.А. Красовский, В.Ф. Кротов, Л.Н. Лысенко, В.В. Малышев, Л.С. Понтрягин, О.А. Толпегин, Р.П. Федоренко, Н.Б. Филимонов, Ф.Л. Черноусько и др.

Однако управляемое раскрытие КТР сводится в большинстве случаев к использованию упруго-деформируемых элементов. Для особо важных разворачиваемых частей применяется ручное управление с отслеживанием состояния системы через видеосвязи и различные датчики. При данных управлениях возникают различные виды колебаний конструкции, вызванные жесткой постановкой раскрываемых элементов на упоры или импульсными управляющими воздействиями. Чем больше размер КА, тем больше амплитуда и время затухающий колебаний. Поэтому автоматическое управление системой создания и поддержания формы КТР является важной задачей, позволяющей оптимизировать этот процесс.

**Объектом исследования** является КТР космического базирования.

**Предмет исследования** составляют методы оптимального управления применительно к решению предложенной задачи.

**Цель исследования** – разработка эффективных методов управления системой раскрытия КТР космического базирования, позволяющих минимизировать колебания, прогибы конструкции в процессе развертывания и поддерживать заданную форму радиоотражающего сетеполотна в процессе эксплуатации.

Согласно поставленной цели были сформулированы следующие **задачи диссертационного исследования**:

- 1) Разработка уточнённых математических моделей процессов раскрытия КТР с учётом колебательности конструкции.
- 2) Разработка алгоритмов оптимального управления раскрытием КТР.
- 3) Разработка математической модели для создания формы радиоотражающего сетеполотна и построение его заданной конфигурации.
- 4) Математическое моделирование процессов раскрытия и настройки подвижных частей КТР с использованием разработанных моделей и алгоритмов.

Данная работа направлена на решение комплекса перечисленных задач и вносит

существенный теоретический и практический вклад в развитие систем управления КТР.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1) Разработаны математические модели различных этапов раскрытия КТР. Отличие разработанных математических моделей от существующих заключается в наличии в них управления, позволяющего воздействовать на систему в зависимости от её состояния, учёта в качестве обобщённых координат угла поворота  $\varphi$  и изгиба  $h$  в случае вращательного, или длины выдвижения  $x$  и длины растяжения-сжатия  $\Delta x_{сж}$  в случае поступательного движения. Это позволяет исследовать параметры колебаний конструкции в процессе развёртывания, рассматривать их  $n$ -ное число собственных частот, а также находить изгиб  $h$  и сжатие  $\Delta x_{сж}$  в любой точке спицы за счёт разделения этих переменных в зависимости от длины и времени.

2) Разработаны алгоритмы коррекции параметров структуры управления для формирования оптимального раскрытия КТР с учётом минимизации колебаний конструкции и высокоточного выполнения терминальных условий.

3) Для сокращения времени перевода КТР из транспортировочного в рабочее состояние предложено два способа совместного раскрытия элементов: 1) использование двигателей на каждую из компонент движения; 2) применение двигателя для вращательной составляющей и возникающей при этом центробежной силы для выдвижения промежуточных звеньев.

4) Разработаны алгоритмы точечной настройки радиоотражающего сетеполотна на основе механики гибких нитей и с использованием уравнений Лапласа для мембраны. При задании симметричного вида фронтальной сети удобно представить сетеполотно как мембрану. При сложной форме такое замещение ведёт к значительным вычислительным трудностям, выгоднее разбить рефлектор на  $n$ -ное (в зависимости от требуемой точности) число сечений в вертикальной плоскости и использовать механику гибких нитей.

**Теоретическая значимость диссертационной работы** состоит в разработке математических моделей подвижных элементов КА, методов и алгоритмов оптимального управления раскрытием КТР.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в том, что разработанные модели и полученные результаты позволяют более обоснованно и точно выбрать стратегии управления современных и перспективных конструкций КТР, а значит, повысить качество и оперативность проектных работ, получить более высокие технические характеристики КТР. Созданные алгоритмы оптимизации с коррекцией параметров структуры управления позволяют без затруднений в сходимости при малых вычислительных затратах обеспечивать решение

поставленных задач в режиме реального времени. Материалы диссертации вошли в учебное пособие (Кабанов С.А., Кабанов Д.С., Митин Ф.В. Расчёт аэрогидродинамических характеристик и траекторий подвижных объектов: учебное пособие. СПб. Балт. гос. техн. ун-т. 2019. 159 с.) и использованы при подготовке монографии (Кабанов С.А., Кабанов Д.С. Задачи управления с оптимизацией параметров прогнозирующих моделей. СПб. Балт. гос. техн. ун-т. 2017. 110 с.).

**Внедрение результатов работы.** Разработанные модели, алгоритмы и результаты использованы:

1) При проведении ПНИЭР по теме «Создание высокоэффективной системы беспроводной узконаправленной передачи энергии и информации для управления состоянием объектов космического базирования на основе лазерных и волоконнооптических технологий», в части создания новых технических решений в области конструкции и системы создания и поддержания формы антенны для СБП-ЛВ, отличающиеся от известных более высокими техническими и эксплуатационными характеристиками за счет применения лазерных и волоконнооптических технологий. Идентификационный номер проекта RFMEFI 57715 X 0201.

2) При проведении ПНИ по теме: «Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов» (шифр заявки «2017-14-576-0053-170»). Идентификационный номер проекта RFMEFI57417X0165.

3) При создании реальных изделий в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» – ведущем российском разработчике и производителе спутников связи, телевидения, навигации и геодезии.

4) В лекционных курсах и на практических занятиях по дисциплинам «Системы управления летательными аппаратами», «Проектирование систем управления летательными аппаратами», при курсовом и дипломном проектировании на кафедре И9 «Системы управления и компьютерные технологии» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

**Методы исследования.** Приводимые в диссертации исследования опираются на приложения теоретической механики, теории автоматического регулирования, теории оптимального управления, методы математического моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Математические модели различных этапов раскрытия КТР.
- 2) Алгоритмы коррекции параметров структуры управления для формирования оптимального раскрытия КТР.
- 3) Алгоритмы настройки формы радиоотражающего сетеполотна.

4) Способы одновременного раскрытия элементов КТР.

5) Результаты моделирования процессов раскрытия и настройки формы КТР, позволяющие решать задачи минимизации возникающих колебаний и высокоточного выполнения терминальных условий.

**Достоверность** полученных результатов определяется адекватностью применяемых математических моделей, корректным использованием апробированных численных методов решения и алгоритмов оптимального управления и подтверждается сравнением с известными результатами других исследователей.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы прошли апробацию на следующих отечественных и международных конференциях: XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, 2017); DAAAM International Symposium (г. Задар, Хорватия, 2017, 2018); IV Международная научно-практическая конференция «Инновации в науке и практике» (г. Барнаул, 2017); Общероссийская научно-техническая конференция «Восьмые Уткинские чтения» (Санкт-Петербург, 2018).

**Автором опубликованы** по теме диссертации 16 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 4 работы в сборниках тезисов докладов научно-технических конференций, 5 отчётов о ПНИ и ПНИЭР.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты получены автором самостоятельно, в рамках проведенных им исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 141 наименования и приложения. Объем работы составляет 135 страницы, из них основного текста 131 страница, в том числе 50 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определен объект исследования, сформулирована цель работы, показана ее актуальность. Описаны методы исследований, показаны достоверность, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приведены сведения о реализации результатов и апробации работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор в области моделирования систем создания и поддержания формы КТР. Проанализированы основные направления в области создания КА. Выявлены преимущества и недостатки создания сверхмалых и сверхбольших спутников. Определены основные методы моделирования трансформируемых конструкций. Обозначена важность учёта упругих колебаний и оценена роль математического моделирования в создании подобных систем.

При выборе в качестве объекта исследования КТР рассмотрены основные типы космических рефлекторов и показаны их отличительные особенности. Поддержание заданной формы радиоотражающей поверхности определяет качество передаваемого сигнала.

Для создания эффективной математической модели в настоящее время применяются такие пакеты программ как EULER, Adams, Nastran, ANSYS, Cosmos, Abacus, тем не менее, для создания оптимального алгоритма управления необходимо применение другой программной среды, например, Matlab.

Исходя из результатов теории управления выявлено, что для вычисления управления в реальном времени в процессе движения как функции текущих значений фазовых координат целесообразно использовать алгоритм оптимизации с коррекцией параметров структуры управления.

Поставлена задача для управления раскрытием КТР с использованием тросовой (вантовой) системы поддержания формы (рисунок 1). КТР космического базирования с использованием вантовой системы состоит из КА 1, относительно которого разворачиваются все элементы, солнечных батарей 2, обеспечивающих энергией установку, системы 3, облучающей отражающую поверхность. Также в состав рефлектора входит штанга 4, выдвигающая рефлектор 5 на необходимое расстояние, и сетеполотно 6, формирующие необходимую диаграмму направленности.

Процесс раскрытия рефлектора можно разбить на 8 отдельных этапов: 1) раскрытие спиц рефлектора; 2) доворот рефлектора; 3) раскрытие штанги; 4) выдвижение штанги; 5) выдвижение звеньев спиц; 6) раскрытие концевых звеньев спиц; 7) настройка формы отражающей поверхности; 8) настройка орбитального положения рефлектора.



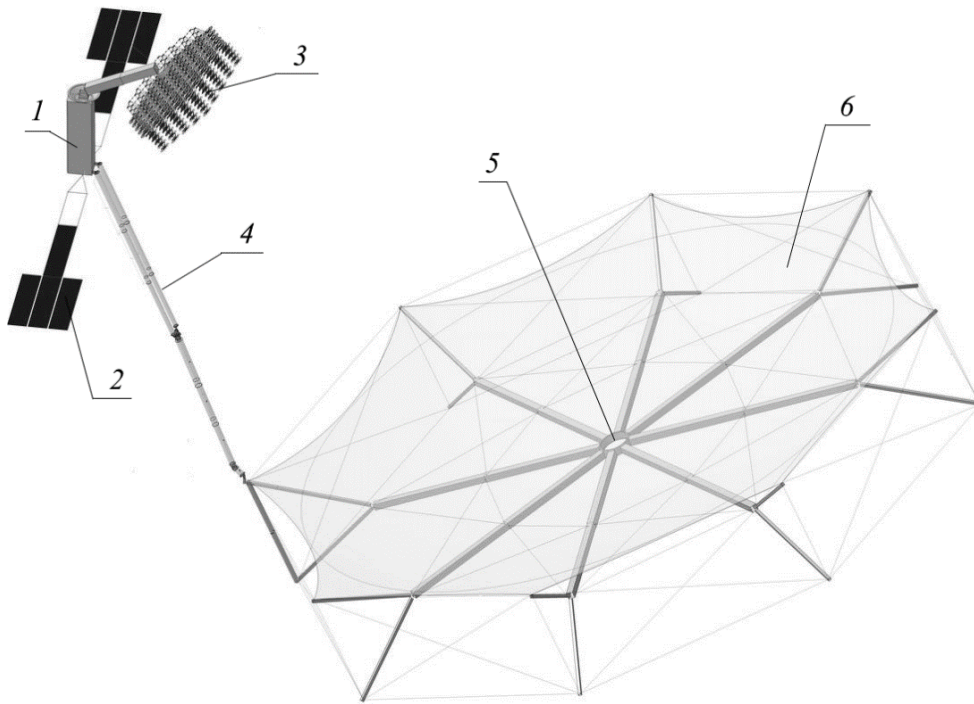


Рисунок 1 – КТР с использованием тросовой (вантовой) системы поддержания формы рефлектора

В общем виде задача раскрытия КТР на каждом этапе решается за счёт воздействия на конструкцию актюаторов – исполнительных устройств системы управления. В настоящее время развёртывание различных видов крупногабаритных рефлекторов (ферменных, зонтичных, кольцевых и др.) производится за счёт энергии пружин или деформированных упругих элементов. Альтернативой классическим системам раскрытия могут являться автоматические системы, в которых энергия для развёртывания элементов рефлектора производится за счёт приводов, в частности электрической машины. Применение данного вида актюатора позволит активно управлять процессом раскрытия, уменьшить колебания и прогибы конструкции КТР.

Для приведения КТР на орбите в рабочее состояние нужно развернуть его элементы из сложенного транспортировочного положения. При этом необходимо разработать математические модели разведения и выдвижения спиц, а также настройки сетеполотна. На весь процесс раскрытия рефлектора накладываются ограничения по точности, времени, управлению.

Задача состоит в нахождении управления, обеспечивающего перевод системы в конечное состояние при минимизации колебаний конструкции и поддержание фронтальной части радиоотражающей поверхности с требуемой точностью.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели раскрытия и настройки КТР.

В зависимости от этапа раскрытия под исследуемым объектом принимается спица, штанга, поверхность сетеполотна. Ввиду того что конструкция состоит из нескольких узлов, раскрытие происходит поэтапно. На каждом этапе решается своя

задача, и соответственно каждый этап описывается различными дифференциальными уравнениями. Разработаны математические модели раскрытия КТР с учётом продольной и поперечной деформации, наличия упоров и фиксаторов, диссипативных сил. Данные модели позволяют активно управлять развёртыванием конструкции, учитывая весь спектр собственных частот колебаний на выбранном расстоянии от начала закреплённого конца раскрывающегося элемента.

Вращательное движение встречается при раскрытии штанг и спиц. Математические модели динамики, описанные системой дифференциальных уравнений, на всех этих этапах аналогичны друг другу, а конструкции отличаются только массогабаритными параметрами.

Система дифференциальных уравнений для определения прогиба спицы  $h$  при её повороте на угол  $\varphi$  имеет вид  $\dot{\mathbf{X}}_p = f(\mathbf{X}_p, u, t)$ , где  $\mathbf{X}_p = (\varphi \ \omega \ h \ V_{изг})^T$  – вектор состояния процесса раскрытия, или

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{M_{\Pi}(U_1) - M_{тр} - M_{упор}(\varphi, \omega) - M_{\phi}(\varphi, \omega)}{I}, \\ \dot{h} &= V_{изг}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{изг} = -\frac{EI_{изг}}{\rho S} \frac{\partial^4 h}{\partial l^4} - \gamma \frac{EI_{изг}}{\rho S} \frac{\partial^4 V_{изг}}{\partial l^4} + \frac{2}{\rho S} \frac{\partial M(U_1, \varphi, \omega)}{\partial l},$$

где  $M_{упор} = (k_{упр_{упор}} \Delta\varphi + c_{демпф_{упор}} \dot{\varphi}) H_{упор}(\Delta\varphi)$ ,  $M_{\phi} = (k_{упр_{\phi}} \Delta\varphi + c_{демпф_{\phi}} \dot{\varphi}) H_{\phi}(\Delta\varphi)$ ,

$M_{\Pi} = \frac{m_{\text{э}} p E_0 U_1}{\omega_1 X_c} \sin \mathcal{G}$ . С учётом функций Крылова значения  $\partial^4 h / \partial l^4$ , исходя из

граничных условий при  $l=0$  и  $l=a$ , определяются как  $\frac{\partial^4 h}{\partial l^4} = \frac{\rho S \omega_{изг}^2}{EI_{изг}} \sin(\omega_{изг} t)$ . За

управление принимается напряжение питания электрического двигателя  $U_1$ .

В уравнениях (1)  $V_{изг}$  – линейная скорость изгиба спицы;  $M_{\Pi}$  – полезный момент, создаваемый бесколлекторной машиной;  $m_{\text{э}}$  – число фаз ротора;  $p$  – число пар полюсов магнитного поля,  $E_0$  – действующее значение ЭДС на обмотке статора,  $X_c$  – синхронное сопротивление ( $X_c = X_{\sigma} + X_a$ , где  $X_{\sigma}$  и  $X_a$  – индуктивные сопротивления рассеяния и реакции якоря соответственно),  $\omega_1$  – угловая скорость вращения ротора двигателя,  $\mathcal{G}$  – угол рассогласования (между  $U_1$  и  $E_0$ , для двигателя находится в пределах  $[0, \pi/2]$ );  $M_{тр}$  – момент трения;  $M_{упор}$  – момент,

создаваемый упором;  $M_\phi$  – момент, создаваемый фиксатором;  $k_{\text{упр упор}(\phi)}$  – коэффициент жесткости упругой компоненты модели упора (фиксатора);  $c_{\text{демпф упор}(\phi)}$  – коэффициент демпфирования вязкой компоненты модели упора (фиксатора);  $\Delta\phi = \phi - \phi_f$  – относительный угол, соответствующий моменту  $t_f$  установки на упор (фиксатор) спицы при достижении конечного угла раскрытия  $\phi_f$ ;  $H_{\text{упор}}(\Delta\phi)$  – функция, которая принимает значение 1 (при  $\Delta\phi > 0$ ) или 0 (при  $\Delta\phi < 0$ );  $H_\phi(\Delta\phi)$  – функция, которая принимает значение 1 (при  $\Delta\phi < 0$ ) или 0 (при  $\Delta\phi > 0$ ) при условии, что спица уже достигла  $\phi_f$ , то есть  $H_{\text{упор}}(\Delta\phi)$  был равен 1;  $\gamma$  – коэффициента затухания,  $E$  – модуль упругости (Юнга);  $\rho$  – плотность материала,  $\omega_{\text{сизг}}$  – первая собственная частота колебаний. Для решения данной системы уравнений необходимо выполнить интегрирование как по времени, так и по длине.

Поступательное движение встречается на этапах выдвижения спиц и штанг. По аналогии с вращательным движением система дифференциальных уравнений, описывающих динамику выдвижения спицы, имеет вид  $\dot{\mathbf{X}}_в = f(\mathbf{X}_в, u, t)$ , где  $\mathbf{X}_в = (x \ V \ \Delta x_{\text{сж}} \ V_{\text{сж}})^T$  – вектор состояния процесса выдвижения, или

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V, \\ \dot{V} &= \frac{F_{\text{п}}(U_1) - F_{\text{тр}} - F_{\text{упор}}(x, V) - F_\phi(x, V)}{m_{\text{выдв}}}, \\ \Delta \dot{x}_{\text{сж}} &= V_{\text{сж}}, \\ \dot{V}_{\text{сж}} &= -\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \Delta x_{\text{сж}}}{\partial x^2} - \gamma \frac{E}{\rho} \frac{\partial V_{\text{сж}}}{\partial x} - \frac{F(U_1, x, V)}{\rho S}. \end{aligned} \quad (2)$$

С учётом функций Крылова значение  $\partial^2 \Delta x_{\text{сж}} / \partial x^2$ , исходя из граничных условий при  $x = 0$  и  $x = x_{\text{выдв}}$ , равно  $\frac{\partial^2 \Delta x_{\text{сж}}}{\partial x^2} = \frac{\rho \omega_{\text{продк}}^2}{E} \sin(\omega_{\text{продк}} t)$ .

В системе дифференциальных уравнений (2)  $x$  – длина выдвижения спицы;  $V$  – линейная скорость выдвижения спицы;  $F_{\text{п}}$  – полезная сила;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения,  $F_{\text{упор}}$  – сила, создаваемая упором;  $F_\phi$  – сила, создаваемая фиксатором;  $m_{\text{выдв}}$  – масса выдвигаемой части;  $\Delta x_{\text{сж}}$  – продольная деформация;  $V_{\text{сж}}$  – линейная скорость сжатия спицы.

Для выбранного типа рефлектора применена механика гибких нитей и методика, основанная на уравнении Лапласа для мембраны, для определения формы и

настройки радиоотражающего сетеполотна. В случае симметричного заданного вида фронтальной сети удобнее использовать уравнения Лапласа. Для случая произвольного вида поверхности – механику гибких нитей. Полученные уравнения позволяют рассчитывать усилие оттяжки для нитей из разных материалов и при разных начальных условиях натяжения.

Выбраны актюаторы, позволяющие в процессе функционирования КТР поддерживать и изменять форму радиоотражающей поверхности. В качестве таких исполнительных механизмов рассмотрено применение пьезоактюаторов и двигателя постоянного тока (ДПТ).

С целью уменьшения времени выведения аппарата в рабочее положение предложено осуществлять одновременное развёртывание нескольких звеньев КТР. Для задачи раскрытия спицы и одновременного выдвижения одного звена спицы составлена математическая модель с учётом растяжения материала, продольной и поперечной деформации

$$\begin{aligned}
 \dot{\phi} &= \omega, \\
 \dot{\omega} &= \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{тр}} - M_{\text{упор}} - M_{\text{ф}}}{I}, \\
 \dot{h} &= \frac{Ml^2}{2EI_{\text{изг}}}, \\
 \dot{x} &= V, \\
 \dot{V} &= \frac{F_{\text{п}} - F_{\text{тр}} - F_{\text{упор}} - F_{\text{ф}}}{m}, \\
 \Delta \dot{x}_{\text{сж}} &= \frac{Fx}{ES}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Применение математических моделей (1) и (2) для совместного раскрытия является недопустимым, так как при их выводе было сделано допущение, что растяжения материала не происходит, а все моменты инерции являются постоянными величинами. Поэтому в уравнениях 3 и 6 системы (3) записаны упрощённые выражения для поперечной и продольной деформации, это позволяет определить среднюю линию возникающих колебаний, но не даёт возможности исследовать  $n$ -ное количество собственных частот и время затухания. Тем не менее, уменьшение значений  $h$  и  $\Delta x_{\text{сж}}$  позволяет уменьшить возникающие колебания. Следовательно, задача оптимизации управления совместного развёртывания приводит к минимизации колебаний конструкции.

**В третьей главе** представлено решение задачи управления раскрытием и настройки КТР с использованием алгоритмов оптимального управления.

Исследованы математические модели при различных массогабаритных

характеристиках элементов. Сделаны выводы о корректности предполагаемых математических моделях. Производится решение задач управления с помощью различной структуры ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференцирующего). Для всех этапов использование ПИД-регулятора является недостаточным для обеспечения необходимой точности и качества регулирования системы. Поэтому предложено использование принципов оптимального управления.

Для каждого из рассмотренного этапа поставлена задача управления с учётом ограничений на вектора состояния и управления, определены граничные условия. Для полностью наблюдаемого процесса выбран целевой функционал, подлежащий минимизации и определяющий эффективность процесса раскрытия. Выявлены структуры управления.

В качестве одного из возможных подходов к решению задачи синтеза оптимального управления предложена разработка алгоритма оптимизации раскрытия с коррекцией параметров структуры управления. Применение данного алгоритма приводит к возможности решать задачу оптимального управления в режиме реального времени, а также значительно упростить вычисления.

Для вращательного и поступательного видов движения в качестве целевого рассмотрен интегро-терминальный функционал:

$$J = V_f(\mathbf{X}_{p(b)}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(\mathbf{X}_{p(b)}, u, t) dt,$$

где  $V_f = 0.5[\mathbf{X}_{p(b)}(t_f) - \mathbf{X}_{p(b)f}]^T \boldsymbol{\rho} [\mathbf{X}_{p(b)}(t_f) - \mathbf{X}_{p(b)f}]$ ;  $f_0 = \frac{1}{2} \frac{h^2}{k_p^2}$  ( $f_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta x_{сж}^2}{k_b^2}$ );

$\boldsymbol{\rho} = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$ ,  $k_p$ ,  $k_b$  – коэффициенты;  $\mathbf{X}_{p f} = (\varphi_f \omega_f h_f V_{изг f})^T$ ,  $\mathbf{X}_{в f} = (x_f V_f \Delta x_{сж f} V_{сж f})^T$  – заданные конечные значения соответствующих переменных.

Гамильтониан системы принимает вид  $H = P^T f + f_0$ , где  $P = [P_\varphi P_\omega P_h P_{V_{изг}}]^T$ , ( $P = [P_x P_V P_{\Delta x_{сж}} P_{V_{сж}}]^T$ ) – вектор сопряжённых переменных. На управление наложено ограничение  $|U_1| \leq U_{1\max}$ , оно определяется из условия  $\partial H / \partial U_1 = 0$ :

$$U_1(t) = \frac{M_{тр}(t)}{A} - P_\omega(t) \frac{4E^2 I_{изг}^2 k_p^2}{IA} - P_{V_{изг}}(t) \frac{8E^2 I_{изг}^2 k_p^2}{A\rho S R_{дв}}$$

для вращательного вида движения, и

$$U_1(t) = \frac{F_{тр}(t)}{B} + P_{V_{сж}}(t) \frac{E^2 S^2 k_b^2}{\rho S l^2 B} - P_V(t) \frac{E^2 S^2 k_b^2}{m_{вдв} l^2 B}$$

для поступательного при  $|U_1| < U_{1\max}$  или  $U_1 = U_{1\max} \text{sign} U_1$  при  $|U_1| \geq U_{1\max}$ , где

$$A = \frac{m_3 p E_0}{\omega_1 X_c} \sin \vartheta, \quad B = k_f \frac{m_3 p E_0}{\omega_1 X_c} \sin \vartheta.$$

Для выбранных актюаторов выявлены структуры управления:  $e_n(t) = e_{n\max} \text{sign} P_U(t)$  – для пьезоактюатора,  $U_a(t) = U_{a\max} \text{sign} P_{I_a}(t)$  – для ДПТ. Здесь  $e_n$  – напряжение от источника электродвижущей силы, принятое за управление,  $U_a$  – внешнее напряжение, принятое за управление;  $e_{n\max}$  и  $U_{a\max}$  – максимально допустимые значения соответствующих переменных;  $P_U$  и  $P_{I_a}$  – сопряженные переменные.

Для реализации совместного раскрытия элементов предложено два варианта: использование двигателей на вращательную и поступательную составляющую движения или использование двигателя для раскрытия спицы и возникающей центробежной силы для выдвигания её звеньев.

Решение задачи с использованием принципа максимума позволило выявить структуру оптимального управления для каждого рассматриваемого этапа. При использовании в качестве параметров переключения структуры управления моменты времени  $\tau_i$ , структура управления будет выглядеть как

$$u(t) = u_1(t) + \Delta u_i^T(t) l(t, \tau_i),$$

где  $i = \overline{1, r}$ ,  $i$  – номер участка структуры управления,  $r$  – количество переключений управления в структуре,  $l^T(t, \tau_i) = [l(t, \tau_1) l(t, \tau_2) \dots l(t, \tau_r)]$ ,  $\Delta u_i = -u_i + u_{i+1}$ ,  $u_i(t) = u_1(t)$  при  $t < \tau_1$ . Здесь  $u_i$  и  $u_{i+1}$  – управления на предыдущем и последующем участках этой структуры относительно  $\tau_i$  соответственно, а  $l(t, \tau_i)$  – единичные функции. Так для раскрытия, выдвигания спицы и выбранных актюаторов  $r = 2$ , а управление  $u_i$  меняется между предельными значениями разного знака.

**В четвёртой главе** представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов управления.

Для удобства обозначим:  $t_f = T_f + t_{\text{затух}}$ ,  $T_f$  – время раскрытия по углу разворота  $\varphi$  и угловой скорости разворота  $\Omega$ ,  $t_{\text{затух}}$  – время затухания колебаний спицы после постановки её на упор и фиксатор. Исходя из полученных данных, необходимо выбирать время разворота спицы по углу разворота  $\varphi$  и угловой скорости разворота  $\Omega$  в пределах от 356 до 1369 с. При этом с увеличением  $T_f$  вид оптимального управления будет изменяться, например, от релейного переключения

до управления с линейным участком убывания (рисунок 2). Кривая 1 –  $T_f = 356$  с,  $t_f = 936$  с; кривая 2 –  $T_f = 360$  с,  $t_f = 940$  с; кривая 3 –  $T_f = 368$  с,  $t_f = 948$  с; кривая 4 –  $T_f = 380$  с,  $t_f = 960$  с; кривая 5 –  $T_f = 506$  с,  $t_f = 1200$  с.

Расчёты показали, что управление раскрытием с максимальным быстродействием приводит к заметному увеличению времени затухания  $t_{\text{затух}}$  колебаний. Поэтому целесообразно применять алгоритм коррекции структуры управления, в которой переход между предельными значениями управлений разных знаков осуществляется по плавно изменяющейся кривой. Происходит плавный переход от одного предельного управления к другому с противоположным знаком.

На рисунке 3 представлены характеристики динамики развёртывания полностью раскрытой спицы при применении алгоритма коррекции параметров структуры управления для рассмотренного случая  $T_f = 368$  с (кривая 3 на рисунке 2) с выходом в конечное положение  $\mathbf{X}_p(t_f)$  за  $t_f = 948$  с.

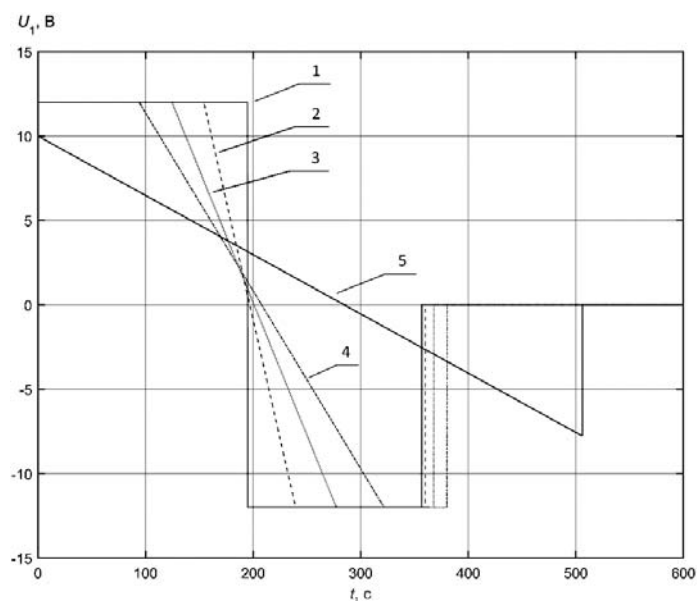


Рисунок 2 – Набор кривых  $U_1(t)$

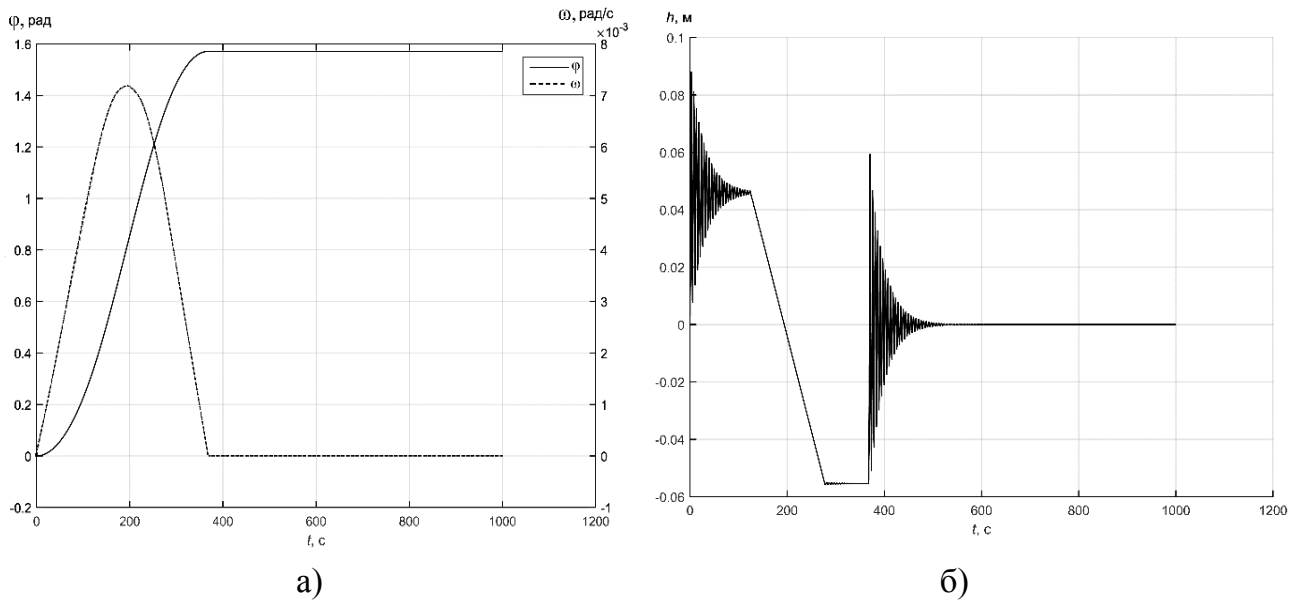
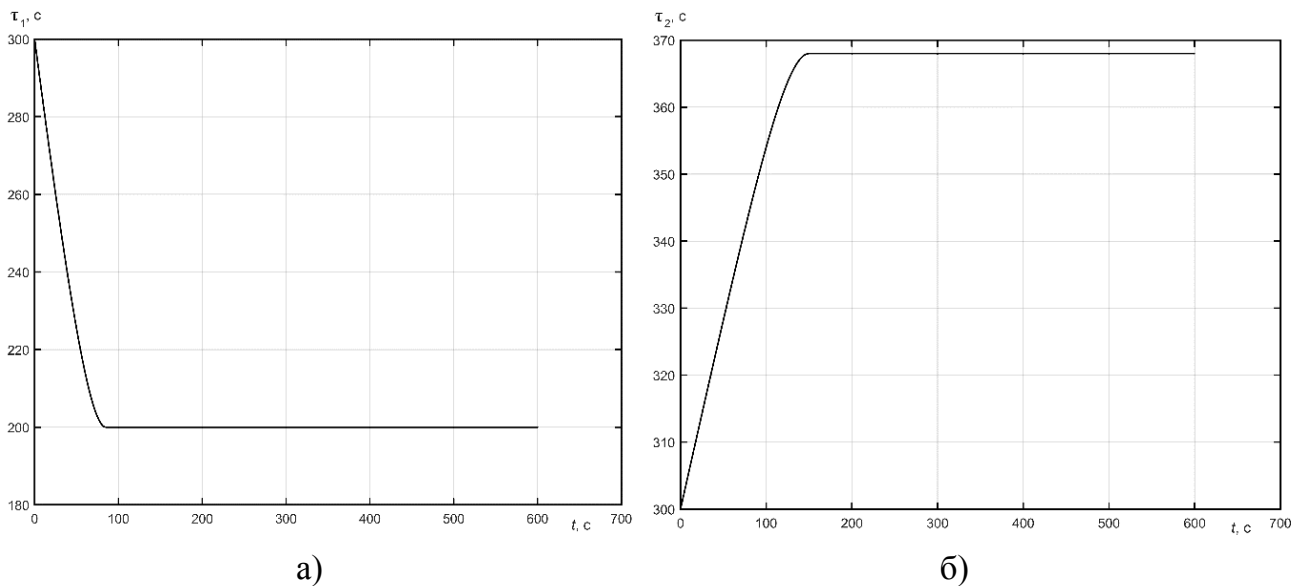


Рисунок 3 – Характер динамики раскрытия спицы:

а) график  $\Phi(t)$  и  $\Omega(t)$ ; б) график  $h(t)$ 

На рисунке 4 представлены графики зависимости управления моментами переключений  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . При этом  $\tau_1$  стремится к оптимальному времени смены предельных значений управления  $U_1$ , а  $\tau_2$ , что характерно, стремится к конечному времени, при котором система достигает заданных значений.

Рисунок 4 – График а)  $\tau_1$  и б)  $\tau_2$ 

Структура сигнала управления  $U_1$  для поступательного движения представляется линейной функцией  $U_1 = a \cdot t + b$ , где  $a$  и  $b$  коэффициенты. В качестве оптимизируемых параметров выбраны не моменты переключения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  а коэффициенты  $a$  и  $b$ . Переходные процессы при данном управлении представлены на рисунке 5.



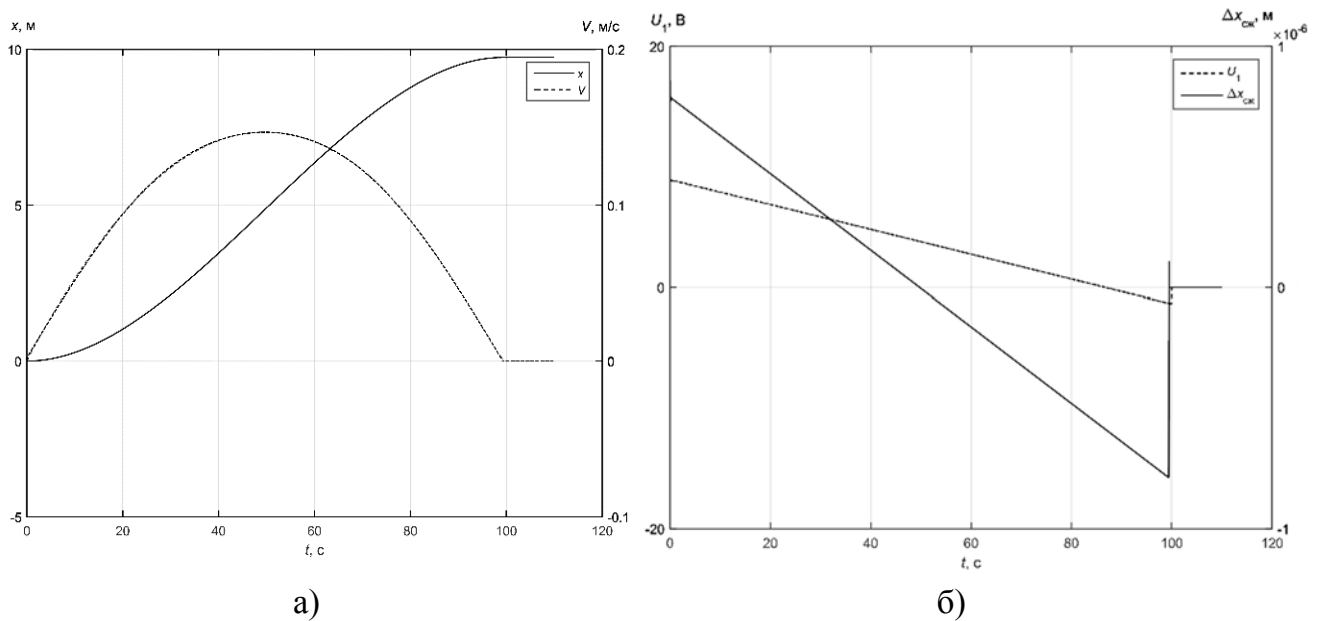


Рисунок 5 – Характер динамики раскрытия спицы:

а) график  $x(t)$  и  $V(t)$ ; б) график  $\Delta x_{сж}(t)$  и  $U_1(t)$

Важным достоинством алгоритма является высокая сходимость метода при произвольном выборе значений  $\tau_i$  из интервала оптимизации и неизменной их последовательности при различных конечных условиях. В отличие от коррекции моментов времени переключения структуры  $\tau_i$  параметры  $a$  и  $b$  необходимо выбирать в небольшом диапазоне от оптимальных значений.

Для настройки формы радиоотражающего сетеполотна НИЛ РИУС и студенческим КБ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова был изготовлен макет фасеты КТР (рисунок 6).

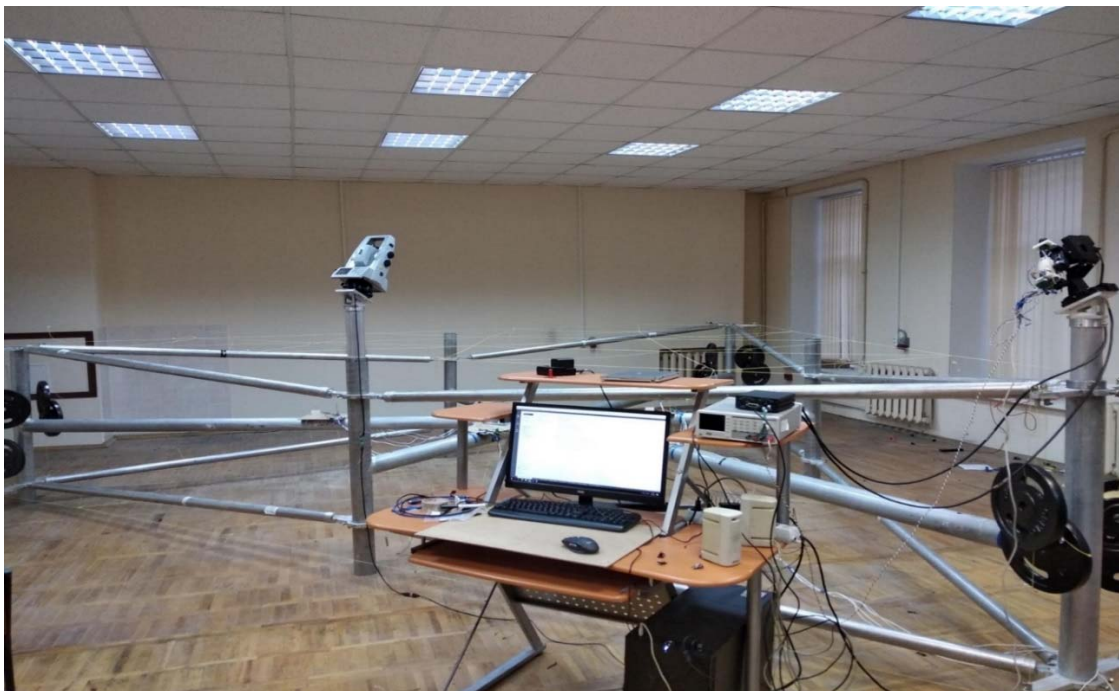


Рисунок 6 – Макет фасеты КТР

На данное фасете было установлено 3 ДПТ, которые задавали необходимую форму. Настройка каждого актюатора происходила поочерёдно. Используя методику на основе уравнения Лапласа для мембраны, были определены необходимые усилия и длины в вантах, соединяющих фронтальную и тыльную сети, для создания желаемой радиоотражающей поверхности.

Применение алгоритма коррекции параметров структуры управления позволило более чем в два раза сократить время настройки по сравнению с ПИД-регулятором, а также прийти в заданное значение без перерегулирования, что соответствует результатам моделирования. Ввиду плавного подхода к конечному значению удалось повысить энергоэффективность использования ДПТ. Выигрыш в затратах мощности при управлении одним актюатором составил  $\approx 15\%$  (0.495 Вт против 0.583 Вт).

Данные эксперимента позволяют сделать вывод о возможности уменьшения ёмкости источников питания за счёт уменьшения потребления мощности актюаторов. Это позволит уменьшить массогабаритные размеры энергонакопительных элементов и освободить место для полезной нагрузки.

Использование алгоритма оптимального управления для настройки формы радиоотражающего сетеполотна за счет регулирования пьезоактюатора и ДПТ позволяет значительно ускорить этот процесс и, как следствие, поддерживать заданную форму сетеполотна с необходимой точностью.

При реализации совместного раскрытия элементов с использованием алгоритма с коррекцией параметров структуры для случая применения двигателей на вращательную и поступательную составляющую движения удалось решить поставленную задачу. Отличие в управлении от отдельно рассмотренных этапов незначительны, изменение момента инерции приводит к увеличению времени работы двигателя на верхнем предельном ограничении на вращательную составляющую движения.

Для случая использования центробежной силы для выдвигания промежуточного звена спицы выяснилось, что при заданных ограничениях на вектор управления  $|U_1| \leq U_{1\max}$ ,  $U_{1\max} = 12$  В, не удастся решить поставленную задачу. При увеличении максимального управления не удаётся выдвинуть спицу более чем на 5 м, при этом по углу разворота  $\varphi$  спица бьётся об упор и возникает длительный колебательный процесс. Исследования показали, что при заданных ограничениях плавная постановка на упор как для вращательного, так и для поступательного вида движения возможна при конечных значения  $\varphi_f = \pi/2$  рад и  $x_f = 0.28$  м (рисунок 7). Для решения поставленной задачи необходимо либо изменять конструкцию КТР, либо применять более мощные исполнительные устройства.

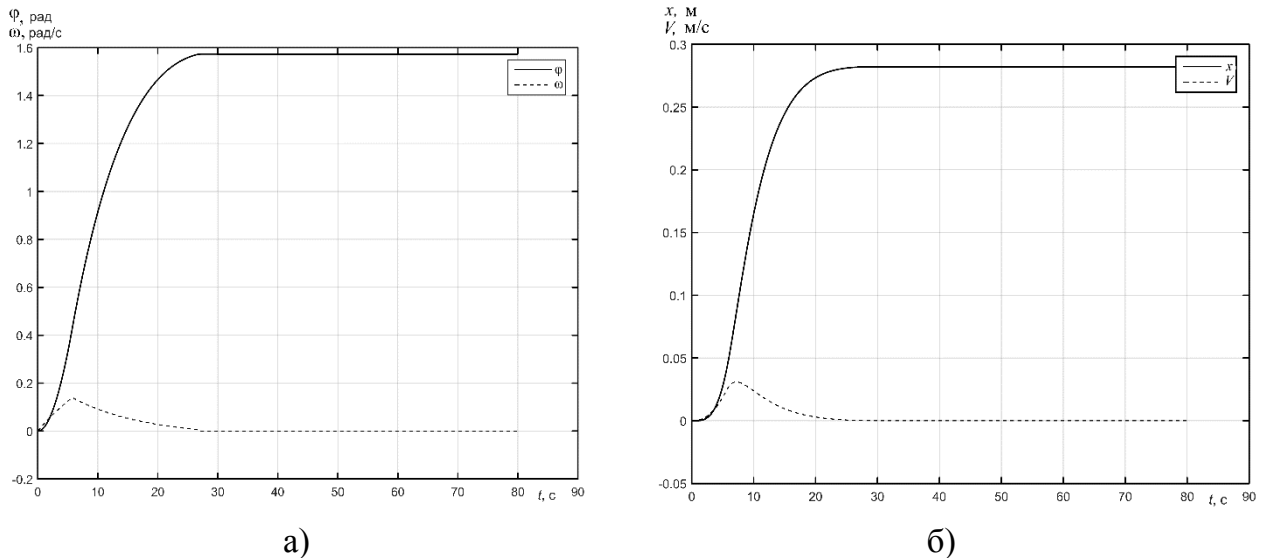


Рисунок 7 – Характеристики раскрытия и выдвижения элементов конструкции:

а)  $\varphi(t)$  и  $\omega(t)$ , б)  $x(t)$  и  $V(t)$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных исследований решена актуальная научно-техническая задача управления системой создания и поддержания формы крупногабаритной трансформируемой конструкции космического базирования.

Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1) Предложен комплексный подход к анализу динамики развёртывания и настройки КТР на основе совокупности разработанных математических моделей. Он позволяет на основе уравнений Лагранжа II-го рода упорядочить построение математических моделей для различных типов КА.

2) Разработаны уточнённые математические модели процессов раскрытия подвижных частей КТР космического базирования. Системы дифференциальных уравнений, описывающие раскрытие КТР, возможно применять для конструкций с различными параметрами, от изменения материала, массы, габаритов до выбора управляющего органа. Она является универсальной и может применяться при решении широкого круга задач. Данные модели позволяют рассматривать  $n$ -ное число собственных частот колебаний спицы, а также находить изгиб  $h$  и сжатие  $\Delta x_{сж}$  в любой точке спицы за счёт разделения этих переменных в зависимости от длины и времени.

3) Разработаны алгоритмы настройки формы радиоотражающего сетеполотна. Для выбранного типа рефлектора применена методика на основе механики гибких нитей и методика, основанная на уравнении Лапласа для мембраны. В зависимости от вида рабочей поверхности и требуемой точности выбирается один из рассмотренных

подходов. Полученные уравнения позволяют рассчитывать усилие оттяжки для нитей из разных материалов и при разных начальных условиях натяжения.

4) Предложено два способа совместного раскрытия элементов КТР для уменьшения времени выведения аппарата из транспортировочного в рабочее положение. Первый способ – использование двигателей на каждую из компонент движения. Второй способ – применение двигателя для вращательной составляющей и возникающей при этом центробежной силы для выдвижения промежуточных звеньев. Получены результаты, позволяющие в зависимости от конструкции выбирать наиболее оптимальный вариант.

5) Разработаны алгоритмы оптимального управления созданием и поддержанием формы КТР. Для всех этапов применение разработанных алгоритмов позволяет добиться необходимой точности и качества регулирования системы. Алгоритм коррекции параметров структуры управления обеспечивает высокую сходимость решения задачи. Для отдельных этапов разработанные алгоритмы на порядок превосходят показатели ПИД-регуляторов. Полученные результаты показывают, что удаётся плавно подойти к механизму упора и фиксации. Вследствие этого, они не влияют на переходные процессы в системе, что позволяет минимизировать продольные и поперечные колебания.

6) Полученные результаты использованы при проведении научно-исследовательских работ в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева».

Для дальнейших работ поставлена задача учёта в математической модели всех видов колебаний (продольных, поперечных, крутильных). При эксплуатации реальных объектов присутствуют различные люфты и зоны нечувствительности в соединениях звеньев. Учёт этих параметров позволит более точно моделировать поведение системы.

Для этапа настройки сетеполотна сформулирована задача управления несколькими актюаторами одновременно. Это позволит минимизировать уход соседних точек, возникающий при поточечной регулировке.

Дальнейшего исследования требует задача совместного раскрытия элементов, позволяющая выполнять развёртывания конструкции за меньшее время. Так как при этом возникает проблема оценки заданных ограничений и выбора массогабаритных параметров всей системы.

Ввиду наличия различных возмущений в реальных условиях необходимо апробировать разработанные алгоритмы управления при их наличии. Учитывая вышесказанное, определены задачи фильтрации данных и минимизации энергетических затрат на измерения.

**СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Кабанов С.А., Емельянов В.Ю., Митин Ф.В. Оптимизация динамики системы создания формы крупногабаритных трансформируемых антенн космического базирования // Вопросы радиоэлектроники. 2016. Серия ОТ. Вып. 8. С. 54–58.
2. Митин Ф.В. Разработка и анализ математической модели поступательного движения трансформируемых космических конструкций // Вопросы радиоэлектроники. 2017. Вып. 7. С. 121–125.
3. Кабанов С.А., Кривушов А.И., Митин Ф.В. Моделирование совместного раскрытия элементов крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 5 (54). С. 130–151.
4. Кабанов С.А., Зимин Б.А., Митин Ф.В., Леканов А.В. Применение механики гибких нитей для настройки и определения формы радиоотражающего сетеполотна в одной плоскости // Радиопромышленность. 2018. Т. 28, № 3. С. 23–30.
5. Кабанов С.А., Митин Ф.В., Кривушов А.И., Улыбушев Е.А. Управление пьезоактюатором для настройки отражающей поверхности рефлектора космического базирования // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 111–116.

**Публикации в изданиях, входящих в Web of Science и Scopus**

6. Mitin F., Krivushov A. Control deployment of mobile units of large-sized spacecraft, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, 2017, Vienna, Austria. PP. 0773–0779.
7. Mitin F., Krivushov A. Application of Optimal Control Algorithm for DC Motor, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, 2018, Vienna, Austria. PP. 0762–0766.

**Публикации в других изданиях**

8. Кабанов С.А., Митин Ф.В. Алгоритмы оптимального управления крупногабаритным трансформируемым рефлектором космического базирования. Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ. 2017. С. 147–149.
9. Кабанов С.А., Митин Ф.В., Кривушов А.И. Математическая модель раскрытия крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования. Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ. 2017. С. 149–151.
10. Митин Ф.В., Кривушов А.И. Построение математической модели рефлектора космического базирования для настройки его орбитального положения // Инновации в науке и практике / Сборник статей по материалам IV международной научно-практической конференции (19 декабря 2017 г., г. Барнаул) в 4 ч. Ч. 1. Уфа: Изд. Дендра. 2017. С. 42–51.
11. Кабанов С.А., Митин Ф.В. Управление системой развёртывания и настройки крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования // Восьмые Уткинские чтения: труды общерос. науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 2019. С. 222–227.

**Отчёты по ПНИ и ПНИЭР**

12. Создание высокоэффективной системы беспроводной узконаправленной передачи энергии и информации для управления состоянием объектов космического базирования на основе лазерных и волоконнооптических технологий [Текст]: отчёт о ПНИ (промежуточ.): БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; рук. Страхов С.Ю.; исполн.: Баленко А.С. [и др.] СПб. 2015. 790 с. Библиогр.: с. 655-700. № АААА-Б16-216062070015-0.

13. Создание высокоэффективной системы беспроводной узконаправленной передачи энергии и информации для управления состоянием объектов космического базирования на основе лазерных и волоконнооптических технологий [Текст]: отчёт о ПНИиЭР (промежуточ.): БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; рук. Матвеев С.А.; исполн.: Васильев А.Н. [и др.] СПб. 2016. 1383 с. Библиогр.: с. 578-587. № АААА-Б17-217091320002-1. Инв. №2/2016.5508-1.

14. Создание высокоэффективной системы беспроводной узконаправленной передачи энергии и информации для управления состоянием объектов космического базирования на основе лазерных и волоконнооптических технологий [Текст]: отчёт о ПНИиЭР (заключ.): БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; рук. Матвеев С.А.; исполн.: Васильев А.Н. [и др.] СПб. 2017. 1523 с. Библиогр.: с. 444-447. № АААА-А16-116021850014-9. Инв. № Н-34.М-И4-5508.1.2017.

15. Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов [Текст]: отчёт о ПНИ (промежуточ.): БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; рук. Матвеев С.А.; исполн.: Яковенко Н.Г. [и др.] СПб. 2017. 439 с. Библиогр.: с. 404-434. № АААА-А17-117121950088-5. Инв. № Н-32.М-И8-7509.1.2017.

16. Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов [Текст]: отчёт о ПНИ (промежуточ.): БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; рук. Матвеев С.А.; исполн.: Рудыка С.А. [и др.] СПб. 2018. 484 с. Библиогр.: с. 360-365. № АААА-А17-117121950088-5. Инв. № Н-89.М-И8-7509.2.2018.