

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: 24.2.327.03

Соискатель: Прутько Алексей Александрович

Тема диссертации: Оптимальные по расходу топлива траектории переориентации крупногабаритных космических конструкций

Специальность: 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)»

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:

На заседании 20 октября 2022 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, установленным Положением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и принял решение присудить Прутько Алексею Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

Присутствовали: председатель диссертационного совета В.В. Малышев, заместитель председателя диссертационного совета М.Н. Красильщиков, ученый секретарь диссертационного совета А.В. Старков, члены диссертационного совета: В.Т. Бобронников, В.А. Воронцов, В.Н. Евдокименков, А.В. Ефремов, К.А. Занин, А.И. Кибзун, М.С. Константинов, М.М. Матюшин, В.П. Махров, С.Н. Падалко, В.В. Пасынков, В.Г. Петухов, В.Н. Почукаев, В.В. Родченко, Ю.В. Тюменцев.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.327.03, д.т.н., доцент

Начальник
Т.А.



А.В. Старков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.03

на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
(МАИ)

по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20.10.2022 г., протокол № 16

О присуждении **Прутько Алексею Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Оптимальные по расходу топлива траектории переориентации крупногабаритных космических конструкций» по специальности 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)» принята к защите «21» апреля 2022, протокол № 2, диссертационным советом 24.2.327.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ, Московский авиационный институт), 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, приказ о создании совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель, Прутько Алексей Александрович, «15» июня 1992 года рождения. В 2015 г. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по специальности «Прикладные математика и физика». В 2019 году окончил обучение в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)» по направлению подготовки 24.06.01 – «Авиационная и ракетно-космическая техника» (диплом об окончании аспирантуры 107724 4873551, регистрационный номер 19403012 от 16 июля 2019 г.). Справка о сдаче кандидатских экзаменов №281 выдана 18 ноября 2020 г.

В период подготовки диссертации соискатель Прутько Алексей Александрович работал в должности инженера-математика 1 категории в отделе динамики и программного обеспечения системы управления движением и навигации (СУДН) Публичного акционерного общества «Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»).

Соискатель работает в должности инженера-математика 1 категории в отделе динамики и программного обеспечения СУДН ПАО «РКК «Энергии».

Диссертация выполнена в отделе динамики и программного обеспечения СУДН ПАО «РКК «Энергии».

Научный руководитель – гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ПАО «РКК «Энергии», Сумароков Антон Владимирович.

Официальные оппоненты:

1. Назаров Анатолий Егорович – гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, заместитель начальника отдела Акционерного общества «Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина».

2. Симоньянц Ростислав Петрович – гражданин Российской Федерации, кандидат технических наук, доцент, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета)».

Все оппоненты дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ») г. Москва, в своем положительном отзыве, обсужденном на заседании секции научно-технического совета №4 предприятия (протокол №12 от 31.08.2022 г.), подписанном начальником отдела общих научно-технических исследований, доктором технических наук, доцентом А.Б. Захаренко и утвержденным заместителем генерального директора по научной работе, главным конструктором по динамике и прочности, доктором технических наук, профессором В.Я. Гечей, указала, что диссертационная работа Прутько Алексея Александровича на тему «Оптимальные по расходу топлива траектории переориентации крупногабаритных космических конструкций» является законченной научно-квалифицированной работой, содержащей решение актуальной задачи снижения расхода топлива при выполнении угловых маневров орбитальных станций и по своему содержанию, научной новизне и практического ценности соответствует требованиям (п. 9-14) «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Министерства науки и образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Прутько Алексей Александрович, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)».

Соискатель имеет 20 опубликованных работ по теме диссертации, включающих 4 статьи опубликованных в рецензируемых научных изданиях,

входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки РФ, 2 работ в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных SCOPUS, 0 работ в издании, индексируемой в международной реферативной базе данных Web Of Science. Наиболее значимыми научными работами по теме диссертации являются:

Статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК:

1. Использование псевдоспектрального метода для поиска траекторий оптимальных по расходу топлива разворотов Международной космической станции / А. А. Прутько, С. Н. Атрошенко, А. В. Богачев, А. Е. Старченко // Космическая техника и технологии. — 2019. — № 4. — 121—133, (9 с. авт., №1292, перечень ВАК от 22.10.2021).

Представлены результаты решения задачи оптимального по расходу топлива разворота МКС, при решении которой использовался псевдоспектральный метод Лобатто. Приведены результаты моделирования на наземном комплексе отработки и результаты статистического моделирования, показавшие значительную экономию топлива и ресурса двигателей ориентации.

2. Моделирование сил и моментов сил набегающего потока атмосферы в целях верификации динамических режимов системы управления движением и навигации МКС и синтеза оптимального управления / С. Н. Атрошенко, А. А. Прутько, А. Н. Крылов [и др.] // Космическая техника и технологии. — 2017. — № 4. — 72—88, (12 с. авт., №1144, перечень ВАК по группам спец.).

Представлена зеркально-диффузная модель обтекания МКС набегающим потоком. Представлены результаты моделирования выполнения разворота по оптимальной циклограмме включений двигателей, и показано существенное влияние аэродинамики при управлении без обратной связи.

3. Прутько А. А. О нагрузках на элементы конструкции многоцелевого лабораторного модуля на автономном участке полета / А. А. Прутько, А. В. Сумароков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2017. — № 2. — 123—128, (12 с. авт., №365, перечень ВАК по группам спец.)

Представлена модель нагрузок, основанная на модальной форме упругой модели космического аппарата, которая использовалась для расчета возникающих нагрузок в критических элементах при выполнении оптимальных разворотов МКС по циклограмме включений двигателей.

4. Прутько А. А. Использование спектральных методов для анализа собственных частот колебаний конструкции МКС и амплитуды шумов измерителя угловой скорости / А. А. Прутько, А. В. Сумароков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2018. — № 4. — 59—68, (6 с. авт., №365, перечень ВАК по группам спец.)

Представлены результаты анализа собственных частот колебаний конструкции МКС, и приведено сравнение с теоретическими основными

частотами колебаний, возникновение резонанса которых не допускается на МКС при помощи ограничений на включения реактивных двигателей.

Статьи в журналах, индексируемых в иностранных библиографических и реферативных базах данных (SCOPUS, Web Of Science):

1. Prut'ko A.A. Optimal control of large space construction maneuvers / A. A. Prut'ko, S. N. Atroshenkov // 2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — 2018. — P. 1—4. (SCOPUS)

2. Prut'ko A.A. Search for optimal propellant cyclograms of jet engines firing for large-sized spacecraft reorientations / A. A. Prut'ko // 2021 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — 2021. — P. 1—3. (SCOPUS)

В диссертационной работе отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты, представленные в диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

1. **Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», ведущая организация. Отзыв положительный.**

По диссертации и автореферату можно высказать следующие замечания:

1. В диссертации и автореферате несколько раз упоминается, что реализация предлагаемых профилей поворота должна осуществляться при выключенном режиме Pulse-Train, который обеспечивает снижение нагрузок на элементы конструкции станции. При этом из автореферата не полностью понятен алгоритм работы в этом режиме (не приведено его описание) и как соотносятся полученные при поворотах предложенным способом нагрузки с нагрузками, при работе в этом режиме, особенно с учетом влияния ошибок ориентации и угловой скорости.

2. В автореферате указано, что при постановке задачи оптимального управления величина тяги двигателя может изменяться непрерывно, при этом сами двигатели имеют релейный характер работы, и в диссертации об этом сказано. Из автореферата не понятно, как осуществляется переход к дискретной модели управления двигателями.

3. В автореферате имеются отдельные опечатки, например на странице 13 в слове «входящей», в п. 6 Заключения, в слове «эксперимент», и другие мелкие недочеты.

2. **Назаров Анатолий Егорович**, официальный оппонент, доктор технических наук. **Отзыв положительный**, заверен заместителем генерального директора по персоналу и общим вопросам АО «НПО Лавочкина» И.В. Шолоховой.

Замечания к работе:

1. Не представлено, каким образом определяется требуемое количество точек коллокации при расчете оптимальных траекторий.

2. Не детализирован порядок поиска оптимального решения при использовании разработанного программно-алгоритмического обеспечения.

3. Нет строгого обоснования оптимальности получаемых решений задачи с учетом возможности случая многоэкстремальности.

3. **Симоньянц Ростислав Петрович**, официальный оппонент, кандидат технических наук, доцент. **Отзыв положительный**, заверен заместителем начальника управления кадров МГТУ им. Н.Э. Баумана А.Г. Матвеевым.

Замечания:

1. Расчет оптимальных траекторий происходит специалистами заранее на Земле, что позволяет использовать только запланированные развороты по имеющимся траекториям в ограниченном количестве. А разработка новых траекторий требует некоторой подготовки и времени.

2. Не приведено обоснование, каким образом косвенно снижается расход топлива при использовании квадратичного функционала.

3. Управляющий момент двигателей задается гладкой функцией с непрерывно задаваемым значением, что снижает точность получаемого результата.

4. **Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан доцентом кафедры математического моделирования в космических исследованиях факультета космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н. И.А. Самыловским, заверен деканом факультета космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н. В.В. Сазоновым.

Замечания:

1. В текст автореферата следовало бы включить ссылки на конкретные работы сторонних авторов и в целом более подробно отразить попытки теоретических исследований по теме. Так, на стр. 3 автореферата упоминается, что «в работах отечественных и зарубежных авторов часто исследуются решения задачи оптимальной по быстродействию и расходу топлива переориентации КА, но часто при рассмотрении частных случаев разворотов вокруг оси Эйлера». Между тем поиск в сети Интернет позволяет довольно быстро найти статьи

(например, U. Lee and M. Mesbahi, «Quaternion-based optimal spacecraft reorientation under complex attitude constrained zones», in AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. AAS/AIAA, 2013), в которых также приводятся примеры работы и с более сложными случаями вращения.

2. Вероятно, следовало бы аккуратнее сформулировать новизну в части использования псевдоспектральных методов. Поиск в сети Интернет приводит, например, к работе George A. Boyarko, Marcello Romano and Oleg A. Yakimenko, «Time-Optimal Reorientation of a Spacecraft using a Direct Optimization Method Based on Inverse Dynamics» (<https://core.ac.uk/download/pdf/36738574.pdf>), в которой используется и кватернионная форма кинематических уравнений, и псевдоспектральный метод (Гаусса).

3. Представленный в работе псевдоспектральный метод назван по фамилии французского математика Радо. Радау - некорректная адаптация на русский язык.

4. В работе не представлены иные развороты МКС кроме разворотов из положения «на разгон» в положение «на торможение». При этом существуют такие ориентации во время стыковок, когда российский сегмент «направлен в сторону Земли».

5. **Акционерное общество «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан начальником отдела организационно-методической координации научных функций Центра, заведующим аспирантурой, ученым секретарем НТС АО «НПЦАП», д.т.н., профессором В.М. Никифоровым, заверен начальником отдела кадров АО «НПЦАП» М.А. Муравьевым.

В качестве недостатков работы следует отметить:

1. Автором проделана работа по разработке оптимальных циклограмм включений работы двигателей для проведения оптимальных маневров переориентации, которые в итоге не могут быть применены в настоящее время на МКС. С другой стороны, полученный отрицательный результат показывает возможность улучшения системы управления ориентацией для возможности использования таких циклограмм.

6. **Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Техномаш» имени С.А. Афанасьева»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан начальником отдела Конструкторского бюро АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», к.т.н. Е.В. Кочкиным, заверен ученым секретарем НТС АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», к.т.н. Д.А. Муртазиным.

К замечаниям к автореферату следует отнести некоторые орфографические неточности.

7. **Акционерное общество «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан ведущим конструктором сектора отдела К103 КБ «Салют» им. В.М. Мясищева АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», к.ф.-м.н. А.А. Давыдовым, заверен первым заместителем генерального конструктора КБ «Салют» АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», д.т.н., проф. А.В. Владимировым.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Как следует из автореферата, автором была реализована модель действующих на МКС аэродинамических сил и моментов, и дана оценка влияния данных возмущений в рассматриваемой задаче. При этом в автореферате отсутствуют материалы, иллюстрирующие полученное с учетом аэродинамических возмущений решение и его модельную реализацию. Сравнительная оценка реализаций таких решений с имеющимися в автореферате с точки зрения расхода топлива позволила бы сделать более аккуратный вывод о возможности исключения учета влияния атмосферы.

2. Минимизируемый функционал явным образом включает вектор управления, определяющий величину создаваемых двигателями ориентации управляющих моментов. При этом минимизация второго ресурсного ограничения - количества включений двигателей происходит неявным образом. В автореферате приводятся результаты, показывающие сокращение числа включений при использовании предлагаемых траекторий. Вместе с тем, не приводятся материалы, поясняющие и подтверждающие надежность полученных результатов в части сокращения количества включений двигателей ориентации МКС.

3. На странице 15, при перечислении варьируемых параметров, упоминается параметр атмосферы C^F , описание которого в автореферате не приведено.

8. **Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан старшим научным сотрудником отдела 67 АО «НИИЭМ», к.т.н. В.А. Шляконовым, заверен заместителем генерального директора по космическим системам, главным конструктором по космической технике АО «НИИЭМ», к.т.н. Р.С. Салиховым.

В качестве замечаний можно отметить, что таблица 2, демонстрирующая сравнительные характеристики разработанных траекторий и штатных алгоритмов разворота выглядела бы более наглядно, если бы в ней было приведено не только количество включений двигателей ориентации, но и общая длительность их работы при выполнении разворота.

9. **Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан начальником отдела 10403 АО «ЦНИИмаш», к.т.н. В.С. Лобановым,

начальником сектора отдела 10403 АО «ЦНИИмаш», к.т.н. Н.В. Тарасенко, заверен главным ученым секретарем АО «ЦНИИмаш», д.т.н. В.Ю. Ключниковым.

По материалам автореферата диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. В материалах автореферата не отражено влияние упругих элементов конструкции на параметры движения МКС при оптимальном программном развороте.

2. Не приведены оценки дополнительной загрузки бортового компьютера полученными алгоритмами вычисления оптимальных траекторий и возможности проведения автономных вычислений оптимальных траекторий и циклограмм включения двигателей на борту перспективной орбитальной космической станции.

10. **Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан главным научным сотрудником ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н. Г.К. Боровиным, заверен ученым секретарем ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н. А.А. Давыдовым.

В качестве замечания к работе можно отметить то, что из автореферата не следует: проводилось ли статистическое моделирование углового движения станции при варьировании одновременно всех параметров оптимизации. Результаты такого моделирования были бы весьма полезны при оценке разработанного алгоритма управления.

11. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан старшим научным сотрудником заведующей лабораторией прикладного интегрирования МФТИ, к.ф.-м.н. Н.А. Завьяловой, заверен ученым секретарем ученого совета МФТИ Е.Г. Евсеевым.

Замечания:

1. Присутствуют несущественные опечатки, например, неправильно написана фамилия математика Радо.

2. Модель гравитационного момента, используемая в работе, является достаточно простой. Такое приближение может привести к существенным ошибкам (до 5 градусов за один оборот МКС вокруг Земли).

3. Минимумы функционалов, исследуемых в работе, отвечают минимумам расхода топлива лишь при условии равенства евклидовых норм столбцов матрицы T^{th} . Однако этого не указано в рассматриваемом автореферате.

4. Из автореферата не ясно, какие значения N и N_m использовал автор, а также не ясно, с достаточной ли точностью были аппроксимированы уравнения на сетке по времени.

5. Верификация, проведенная автором, не подтверждает оптимальности предлагаемого подхода.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, компетентностью, имеющимся у них большим опытом в области управления движением космических аппаратов и оптимального управления, в том числе, в области соответствующей паспорту специальности 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)» и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» является ведущей организацией ракетно-космической промышленности по созданию космических аппаратов гидрометеорологического и океанографического направления и космических комплексов на их основе, космических аппаратов для мониторинга окружающей среды, для фундаментальных научных исследований, а также, в том числе, занимаются разработкой систем управления движением спутников. Заключение по диссертационной работе обсуждено и подписано учеными Гечей В.Я. и Захаренко А.Б., которые являются докторами технических наук, являются действительными членами академии электротехнических наук Российской Федерации. Геча В.Я. – автор более 70 работ, в том числе и в зарубежных журналах. Захаренко А.Б. является автором более 60 работ и является обладателем более 20 патентов на изобретения.

Назаров Анатолий Егорович – автор более 20 работ, имеет патенты на изобретение, доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», член редакционной коллегии журнала «Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина». Известный ученый в области баллистико-навигационных исследований орбит, межпланетных траекторий космических аппаратов, в том числе занимается решением задач оптимизации траекторий перелётов.

Симоньянц Ростислав Петрович – автор 20 работ, 14 статей из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых ВАК. Является автором патента на изобретение. Симоньянц Р.П. – кандидат технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», специалист в области управления и стабилизации космических аппаратов, а также в области оптимального управления.

В дискуссии приняли участие:

Фамилия, имя, отчество	Ученая степень, шифр специальности в совете
Малышев Вениамин Васильевич	д.т.н., проф., 2.5.16
Матюшин Максим Михайлович	д.т.н., проф., 2.5.16
Евдокименков Вениамин Николаевич	д.т.н., проф., 2.3.1
Тюменцев Юрий Владимирович	д.т.н., доц., 2.3.1
Бобронников Владимир Тимофеевич	д.т.н., проф., 2.3.1
Константинов Михаил Сергеевич	д.т.н., проф., 2.5.16
Петухов Вячеслав Георгиевич	д.т.н., чл.-корр. РАН, 2.5.16
Хатунцева Ольга Николаевна	д.ф.-м.н., ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия»

Диссертационный совет отмечает, что **наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем**, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Решена задача поиска оптимизирующих расход топлива траекторий переориентации Международной космической станции при управлении на реактивных двигателях при помощи коллокационного псевдоспектрального метода Лобатто.
2. Решена задача поиска оптимизирующих расход топлива циклограмм включений двигателей для выполнения переориентаций Международной космической станции при помощи псевдоспектрального мультиинтервального метода Радау.

Новизна полученных результатов заключается в том, что:

1. Впервые были применены псевдоспектральные методы для приведения оптимизационных задач управления переориентацией при помощи реактивных двигателей ориентации, имеющих релейную выходную характеристику, к задачам нелинейного математического программирования.
2. Впервые на МКС под управлением российского сегмента были применены траектории переориентации орбитальной станции, оптимизирующие расход топлива и сокращающие количество включений двигателей для сохранения их ресурса, которые были получены лично диссертантом.
3. Впервые были получены циклограммы включений двигателей для выполнения разворотов Международной космической станции при помощи мультиинтервального псевдоспектрального метода Радау.

Теоретическая значимость заключается в разработанном подходе решения задачи оптимальной переориентации Международной космической станции при управлении на двигателях ориентации объединённой двигательной установки российского сегмента тягой 10-14 кгс при помощи мультиинтервального псевдоспектрального метода Радау, который позволяет более аккуратно получить решение в необходимых интервалах времени, таких как периоды работы двигателей.

Практическая значимость работы заключается в существенном сокращении расхода топлива и в экономии ресурса двигателей ориентации при разворотах Международной космической станции по сравнению с используемым бортовым алгоритмом управления ориентацией систем управления движением и навигации российского сегмента, который осуществляет пространственный разворот по кратчайшей траектории вокруг оси эйлера поворота между исходным и требуемым положениями ориентации. Для поиска траекторий переориентации, оптимизирующих расход топлива, диссертантом был разработан программный пакет, в котором использованы псевдоспектральные методы для численного решения задачи оптимизации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается следующими актами о внедрении результатов диссертации:

1. Акт от 14.09.2021 о внедрении результатов диссертационной работы Прутько А.А. в производственную деятельность ПАО «РКК «Энергия» в части использования оптимальных по расходу топлива траекторий управления ориентаций Международной космической станции в рамках космического эксперимента «Летная отработка процесса управления разворотами МКС с использованием реактивных двигателей РС МКС с минимальным расходом топлива и учетом ограничений по нагрузкам на конструкцию МКС».

2. Акт от 14.03.2022 №5.01-05/1811 о внедрении результатов диссертационной работы Прутько А.А. в части постановки задачи оптимального управления и постановки задачи нелинейного математического программирования при помощи псевдоспектральных методов Лобатто и Радау, а также в методах их численного решения при помощи программного пакета MATLAB и языка программирования Python, которые применяются в учебном процессе студентов МФТИ на кафедре «аэрофизической механики и управления движением» в рамках читаемых курсов «Семинар по управлению движением и навигации космических аппаратов» и «Проектирование оптимальных систем управления угловым движением КА».

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в организациях, осуществляющих разработку систем управления движением космических аппаратов, таких как ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО Лавочкина»,

АО «НПЦАП», АО «ИСС», а также при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для перспективной российской орбитальной станции и других крупногабаритных космических аппаратов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что основные положения диссертации опираются на современный математический аппарат и согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации. Соискателем разработаны и используются корректные математические модели и алгоритмы. В рамках исследования автором грамотно применены общие и специальные методы численного решения задач оптимального управления угловым движением космических аппаратов на околоземной орбите и верификации полученных результатов, в том числе методом математического моделирования. Результаты работы были подтверждены анализом телеметрической информации, полученной в рамках летных испытаний разработанных соискателем траекторий разворотов на борту Международной космической станции.

В ходе защиты были высказаны следующие критические замечания:

- в работе не рассмотрен вопрос управления ориентацией на гиродинах или маховиках;
- следовало привести более точное математическое обоснование выбранных критериев качества при постановке задаче оптимизации.

Соискатель Прутько А.А. ответил на задаваемые вопросы и привел собственную аргументацию:

- на российском сегменте МКС нет возможности управлять ориентацией при помощи гиродинов, в то время как на американском сегменте гиродины используются в основном только для поддержания ориентации. В дальнейшем этот вопрос будет проработан при разработке системы управления ориентацией, например, на российской орбитальной станции;
- основной задачей работы являлось сокращение расхода топлива при проведении типовых разворотов МКС по сравнению с разворотом по кратчайшей траектории. В работе в действительности происходит поиск локальных минимумов задачи оптимизации без поиска глобального минимума. При этом использовались функционалы, которые косвенно сокращают расход топлива. Тем не менее полученные траектории переориентаций МКС значительно сокращают расход топлива и экономят ресурс двигателей ориентации, что позволяет сделать вывод, что поставленная задача была достигнута. А полученные замечания будут учтены в дальнейшем исследовании.

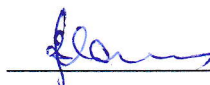
В диссертационной работе все заимствованные материалы представлены со ссылкой на автора или источник. Тем самым работа удовлетворяет п.14 Положения о присуждении ученых степеней.

На заседании 20 октября 2022 г. диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, и принял решение за **новые научно-обоснованные технические решения**, имеющие существенное значение для развития космической отрасли страны в части сокращения расхода топлива и сохранения ресурса двигателей ориентации при проведении переориентаций крупногабаритных орбитальных станций и присудить Прутько Алексею Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)», участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета

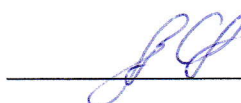
24.2.327.03, д.т.н., профессор



В.В. Малышев

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.327.03, д.т.н., доцент



А.В. Старков

«20» октября 2022 г.

Начальник отдела УДС МАИ

