

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации Игнатова Александра Ивановича на тему
«Динамика и управление угловым движением космического аппарата,
предназначенного для проведения длительных научных экспериментов»,
представленной к защите по специальности

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)

1 Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и выводов, библиографии и приложения. Общий объём составляет 300 страниц: 276 страниц текста, 126 рисунков, 3 таблицы, 172 источника литературы. По своему объёму и структуре работа соответствует требованиям Положения к оформлению диссертаций. Изложение материала диссертационной работы способствует пониманию предлагаемых решений поставленных в работе задач. Задачи выбраны обоснованно и грамотно и приводят к достижению сформулированной цели работы.

2 Актуальность темы диссертации. Развитие космических технологий, которые дали человечеству сверхчистые материалы, монокристаллы, материалы с уникальными свойствами, требует постоянного совершенствования космической техники и алгоритмов управления ею. Только таким путём можно создать необходимые условия для реализации технологических процессов на борту космического аппарата. Как стало известно ещё в 70-е годы прошлого века, ряд процессов накладывает ограничения на величину и динамику изменения микроускорений в рабочей зоне технологического оборудования. Их принято называть гравитационно-чувствительными процессами. Несмотря на многолетнюю историю, проблема ограничения микроускорений далека от своего решения. Этому есть объективные причины. С одной стороны, разработка новых гравитационно-чувствительных процессов, как правило, сопровождается ужесточением требований по микроускорениям. С другой стороны, миниатюризация космической техники и широкое применение малых космических аппаратов даёт новый импульс развитию этой проблемы, поскольку обеспечение требований по микроускорениям на малом космическом аппарате является существенно более сложной задачей. В этой связи работы по исследованию динамики и управления движением космического аппарата технологического назначения являются важными, актуальными и своевременными.

Достижение цели диссертационной работы происходит путём разработки и исследования законов управления угловым движением космического аппарата, оценки и прогнозирования создаваемых условий проведения экспериментов при реализации законов управления, выбора приборного состава и исполнительных органов системы управления угловым движением космического аппарата. Это затрагивает следующие актуальные вопросы.

- Теоретическая разработка и оптимизация по критерию минимальности микроускорений новых законов управления угловым движением космического аппарата, которые открывают возможности удовлетворения требований по микроускорениям в течение длительного периода времени. (Можно констатировать, что ряд гравитационно-чувствительных процессов, например, выращивание монокристаллов, требует продолжительного интервала времени для реализации. Это определяет актуальность данной задачи).
- Создание модели прогноза микроускорений на проектируемом космическом аппарате позволяет оценить возможность и целесообразность реализации того или иного гравитационно-чувствительного процесса на его борту и обоснованно составить график проведения экспериментов.
- Создание модели оценки микроускорений на космическом аппарате, завершившем стадию активного существования, позволит корректно и адекватно интерпретировать

результаты проведённых на его борту экспериментов, сделать грамотные выводы и выработать рекомендации по дальнейшему совершенствованию условий для реализации гравитационно-чувствительных процессов. Данная модель также может служить экспериментальным подтверждением модели прогноза микроускорений.

- Выбор приборного состава и исполнительных органов системы управления движением космического аппарата направлен на техническую реализацию разработанных теоретических положений, оценок и алгоритмов. Данная задача не только является актуальной с точки зрения эффективной эксплуатации космического аппарата технологического назначения, но и придаёт диссертационной работе ярко выраженный прикладной характер, относя её в разряд технических, а не физико-математических работ.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы, как и её цели, а также основных решаемых в работе задач сомнений не вызывает.

3 Основные результаты работы, степень их обоснованности и научная новизна.

Решение поставленных в диссертационной работе задач привело к получению соискателем новых научных результатов. Разработанная для режима орбитальной ориентации космического аппарата методика расчёта минимального уровня микроускорений на основе модели прогноза позволяет определять возможность и целесообразность проведения различных гравитационно-чувствительных процессов на конкретном космическом аппарате и формировать динамические свойства такого космического аппарата на этапе раннего проектирования. Это является важным техническим инструментом для решения задачи обеспечения выполнения требования по микроускорениям в зоне размещения экспериментального оборудования на космическом аппарате технологического назначения.

Представленная методика обоснована анализом углового движения модельного космического аппарата в режиме его орбитальной ориентации, близкой к гравитационно устойчивой. Таким образом, можно констатировать, что в работе представлена модель прогноза микроускорений, основанная на широко используемых режимах ориентации и применении реальных гироскопических и магнитных исполнительных органов.

Важной проблемой при реализации длительных гравитационно-чувствительных процессов, таких как выращивание монокристаллов, является длительное обеспечение требований по микроускорениям. Гироскопические исполнительные органы за длительный период времени могут увеличить собственный кинетический момент настолько, что ориентация с их помощью станет неэффективной. При этом снижение накопленного кинетического момента влечёт за собой необходимость использования других исполнительных органов системы управления движением, например, жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Однако работа таких исполнительных органов нарушит требования по микроускорениям и может привести к нештатному протеканию гравитационно-чувствительного процесса. Для решения данной проблемы соискатель разработал закон управления гироскопическими исполнительными органами, который, кроме поддержания требуемой ориентации космического аппарата, ограничивает накопление собственного кинетического момента этими исполнительными органами. В работе проведено исследование устойчивости гравитационного режима ориентации и предложены два варианта закона управления для реализации в окрестности устойчивого и неустойчивого невозмущённого движений. Соискателем была разработана численно-аналитическая методика выбора параметров закона управления для всех вариантов его реализации.

Данный результат имеет высокое практическое значение, поскольку позволяет использовать для поддержания ориентации космического аппарата гироскопические исполнительные органы длительный период времени без необходимости снижения их собственного кинетического момента. Тем самым обеспечивается длительное выполнение

требований по микроускорениям, что крайне важно для реализации ряда гравитационно-чувствительных процессов.

Указанные практические результаты работы обоснованы теоретическими исследованиями, которые также содержат новые научные положения. Изучение установившихся режимов угловых движений космического аппарата, близких к периодическим, с помощью их аппроксимации последовательностью периодических решений модифицированных уравнений движения привело к разработке соискателем методики численного параметрического исследования устойчивости этих режимов. Данная методика позволяет осуществлять подбор параметров законов управления угловым движением космического аппарата для эффективного контроля этого движения и реализации заданных режимов ориентации.

Для режима одноосной магнитной ориентации осесимметричного космического аппарата в работе доказано существование периодических решений модифицированных уравнений движения в предположении справедливости известной модели IGRF магнитного поля Земли. Это привело к разработке закона управления магнитными исполнительными органами системы управления движением космического аппарата, реализующего режим одноосной солнечной ориентации при наличии постоянного гиросtatического момента и отсутствии возможности изменения положения панелей солнечных батарей относительно корпуса космического аппарата.

В рамках решения поставленной в диссертационной работе задачи проведения обоснованного выбора параметров схемы расположения и характеристик гироскопических исполнительных органов системы управления движением космического аппарата был получен ряд новых результатов. В частности, разработана методика выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик двигателей-маховиков, повышающая эффективность реализации рассмотренных в работе режимов углового движения космического аппарата. В рамках данной методики получены аналитические зависимости для выбора геометрических параметров системы двигателей-маховиков при схеме их расположения в виде «четырёхугольной пирамиды». Также на базе метода продолжения по параметру был предложен и обоснован способ расчёта и построения особых поверхностей систем безупорных гиродинов, позволяющий реализовать выбор геометрических параметров схемы расположения гиродинов.

Таким образом, можно отметить, что научной новизной обладают следующие основные результаты, полученные автором.

1 Методика численного параметрического исследования устойчивости установившихся режимов угловых движений космического аппарата, близких к периодическим, на основе их аппроксимации последовательностью периодических решений модифицированных уравнений движения.

2 Доказательство существования периодических решений модифицированных уравнений движения осесимметричного космического аппарата для режима одноосной магнитной ориентации в предположении справедливости модели IGRF магнитного поля Земли.

3 Методика расчёта минимального уровня микроускорений в заданной точке внутренней среды космического аппарата на основе модели прогноза для режима орбитальной ориентации, близкой к гравитационно устойчивой.

4 Законы управления режимом орбитальной ориентации космического аппарата с помощью гироскопических исполнительных органов, ограничивающие накопление их собственного кинетического момента и позволяющие проводить его снижение, обеспечивающие орбитальную ориентацию космического аппарата в окрестности гравитационно устойчивого и неустойчивого невозмущённых движений и включающие численно-аналитическую методику выбора параметров законов управления для всех вариантов его реализации.

5 Закон управления угловым движением космического аппарата с помощью магнитных исполнительных органов в режиме солнечной ориентации при наличии постоянного

гиростатического момента и отсутствии возможности изменения положения панелей солнечных батарей относительно корпуса космического аппарата.

6 Методика выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик двигателей-маховиков, включающая аналитические зависимости для такого выбора в случае расположения системы двигателей-маховиков по схеме «четырёхугольная пирамида».

7 Способ расчёта и построения особых поверхностей систем безупорных гироскопов, основанный на методе продолжения по параметру, позволяющий реализовать выбор геометрических параметров схемы расположения гироскопов.

В целом научные положения, выносимые на защиту, рекомендации и выводы, сделанные соискателем по итогам выполнения диссертационной работы, являются обоснованными, логичными и не содержат противоречий.

4 Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается соответствием полученных положений теоретических исследований данным проведённого численного моделирования и лётных испытаний, а также сравнением с результатами, опубликованными другими авторами по схожим проблемам.

В этой связи хочется отметить, что при получении собственных результатов научных исследований мною также были проверены и использованы полученные автором результаты. Так, в работе: *Sedelnikov, A.V. Classification of microaccelerations according to methods of their control / A.V. Sedelnikov // Microgravity Science and Technology. – 2015. – Vol. 27. – № 3. – P. 245–251* использовались оценки квазистатистических микроускорений на проектируемом искусственном спутнике Земли, предназначенном для проведения космических экспериментов в области микрогравитации, полученные в результате реализации трёх режимов вращательного движения спутника: пассивная гравитационная ориентация, активная гравитационная ориентация и одноосная солнечная ориентация и опубликованные в работе: *Игнатов, А.И. Режимы вращательного движения ИСЗ с малым уровнем остаточных микроускорений / А.И. Игнатов, В.В. Сазонов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-5. – С. 2195–2197.*

В работе: *Sedelnikov, A.V. Technologies for Increasing the Control Efficiency of Small Spacecraft with Solar Panels by Taking into Account Temperature Shock / A.V. Sedelnikov, A.S. Nikolaeva, V.V. Serdakova, E.S. Khnyryova // Technologies. – 2024. – Vol. 12. – № 10. – 207* использована идея выбора параметров системы двигателей-маховиков, позволяющая реализовать режим солнечной ориентации без проведения снижения собственного кинетического момента этих двигателей в течение всего времени полёта и опубликованная в работе: *Игнатов, А.И. Реализация режима солнечной ориентации космического аппарата с помощью системы двигателей-маховиков / А.И. Игнатов, Г.А. Иванов, Е.С. Коломиец, Е.В. Мартыненко // Космические исследования. – 2023. – Т. 61. – № 2. – С. 143–156.*

Есть и другие примеры. Таким образом, достоверность результатов работы, с моей точки зрения, сомнений не вызывает.

5 Практическая значимость работы вытекает из полученных автором результатов и может быть использована как при решении глобальных задач, например, проектирования космического аппарата технологического назначения, реализующего заданный уровень микроускорений, так и локальных задач, связанных с оптимизацией состава и компоновки гироскопических и магнитных исполнительных органов системы управления движением космического аппарата с целью длительного удовлетворения требований по микроускорениям при проведении гравитационно-чувствительных процессов на его борту.

- Разработанная методика расчёта минимального уровня микроускорений на основе модели прогноза позволяет произвести компоновку технологического оборудования на стадии формирования проектного облика космического аппарата.
- Построенные законы управления с использованием гироскопических и магнитных исполнительных органов позволяют реализовать режимы ориентации космического аппарата без необходимости периодического снижения собственного кинетического момента гироскопических исполнительных органов, выполняя тем самым требования по микроускорениям в течение длительного интервала времени.
- Методика выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик двигателей-маховиков и способ расчёта и построения особых поверхностей систем безупорных гиродинов позволяют оптимизировать выбор состава и схемы расположения исполнительных органов для эффективной реализации заданных режимов ориентации космического аппарата.

Это подтверждается двумя актами внедрения результатов работы соискателя в деятельность предприятий ракетно-космической отрасли, которые использовались на этапах эскизного проектирования при разработке систем ориентации различных космических аппаратов и разгонных блоков, как уже созданных, так и вновь создаваемых в АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева» и в ООО «Спутникс». Полученные в диссертационной работе результаты можно использовать при разработке изделий ракетно-космической техники на таких предприятиях как ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева», АО «РКЦ «Прогресс», АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева, АО «НПО Лавочкина», АО «ВПК «НПО машиностроения» и других предприятиях ракетно-космической отрасли.

Результаты исследований, представленные в рамках диссертации, внедрены соискателем и в учебный процесс подготовки специалистов по соответствующим направлениям. Это подтверждается четырьмя актами внедрения.

6 Апробация и опубликованность основных результатов работы. В соответствии с п. 13 «Положения о присуждении учёных степеней» соискатель отнёс к работам по теме диссертации *семнадцать* публикаций, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК. *Одиннадцать* из них (*восемь* в журнале «Космические исследования» и *три* в журнале «Известия Российской академии наук. Теория и системы управления» соответственно п. 64 и п. 128 перечня изданий, утверждённых приказом Минобрнауки России от 31 мая 2023 г. № 534, учредителем обоих журналов является Российская академия наук), ещё *шесть* в журнале «Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН». Из них три статьи написаны без соавторства, в остальных четырнадцати работах соискатель является первым автором, что наглядно демонстрирует выполнение п. 10 «Положения о присуждении учёных степеней» в части самостоятельного получения основных результатов диссертации. Представлены *два* свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, одно из которых подготовлено единолично соискателем.

Изучение опубликованных по теме диссертации работ показывает, что все основные результаты, содержащиеся в положениях, выносимых на защиту, были представлены в этих работах соискателя.

С другой стороны, результаты диссертации были в достаточной мере представлены автором и обсуждены на различных симпозиумах, конференциях и семинарах. Это позволяет сделать вывод о достаточной апробации и опубликованности основных результатов диссертационной работы.

7 Автореферат диссертации написан ясным, понятным и грамотным научным языком, отражает основное содержание диссертационной работы, полученные результаты, сделанные автором выводы и рекомендации на основании проведённых исследований,

включает все базовые элементы и соответствует предъявляемым требованиям к авторефератам диссертации.

8. Замечания по диссертационной работе.

8.1. Замечания содержательного характера.

1 При описании аэродинамического момента (стр. 42-44) с учётом геометрической формы космического аппарата (рисунок 1.1) не учитывалась упругость панелей солнечных батарей. Был рассмотрен случай настолько жёстких панелей, что всё возмущающее воздействие через узел крепления (жёсткая заделка) передавалось на корпус космического аппарата и влияло на его движение. Логично предположить, что такая оценка аэродинамического возмущения является завышенной. На мой взгляд, разумно было бы оценить степень завышенности и дать соответствующие рекомендации о учёте или пренебрежении упругостью панелей солнечных батарей в различных ситуациях.

2 На рисунках 2.2-2.4 приведены графики зависимости угла $\tilde{\gamma} = \arccos(\vec{n} \cdot \vec{B})$. Судя по графикам, все значения угла положительны. Однако чётность функции $\cos x$ допускает неоднозначность трактовки знака углов. В работе отсутствуют пояснения о предпочтении положительных значений отрицательным. Также нет указаний на то, может ли этот угол менять свой знак.

3 В третьей главе работы соискателем решена задача определения закона управления угловым движением космического аппарата, обеспечивающим реализацию режима его орбитальной ориентации при малом росте величин гиросtatического момента исполнительных органов системы управления движением. Дополнительным условием, обеспечивающим малость роста гиросtatического момента выделяется условие (3.8). Далее проводится расчет микроускорений в режиме орбитальной ориентации космического аппарата при использовании найденного закона управления (3.6), удовлетворяющего (3.8). При этом в выводах по третьей главе отмечается, что эти микроускорения являются «эталонными», а, судя по названию третьей главы, - минимальными (Глава 3. Прогнозирование и оценка минимального уровня микроускорений на борту космического аппарата). Однако в этом случае следовало бы показать явную связь между минимальностью микроускорений и реализацией закона управления (3.6), удовлетворяющего (3.8). На мой взгляд, эта связь не очевидна и требует доказательств.

8.2. Замечания методического характера.

1 При описании путей достижения цели работы автор указал (стр.11): «Поставленная цель подразумевает ... выбор приборного состава и исполнительных органов системы управления угловым движением КА». Далее ставится задача (стр. 11-12): «4. Обоснованный выбор параметров схемы расположения и характеристик гироскопических органов системы управления КА, обеспечивающих реализацию построенных законов управления». Глава 6 работы описывает решение этой задачи. Однако, на мой взгляд, выбор приборного состава и исполнительных органов системы управления подразумевает более широкую задачу, затрагивающую, в частности, разработку информационно-измерительной системы, без которой контроль работы исполнительных органов системы управления движением, а также вычисление погрешностей модели оценки микроускорений невозможен. Поэтому напрашивается более конкретизированная постановка задачи выбора приборного состава.

2 Описание теоремы на странице 66, на мой взгляд, нуждается в более обширных пояснениях, чем это представлено в работе.

3 На страницах 155-156 отмечено: «Известны примеры успешного решения этой задачи». На мой взгляд, было бы логично их описать или сослаться на источники, где они описаны более подробно.

8.3. Замечания по оформлению.

- 1 Фраза на странице 58 «(ω_0 - среднее движение центра масс КА)» не совсем корректна.
- 2 На странице 178 указано: «... при достаточно большом значении ξ ...» и «Параметр ξ возьмём настолько большим ...». Далее приводится «Ниже принято, что $\xi = 0.01 \text{ с}^{-1}$ ». Однако, данное значение не является большим в общепринятом смысле. Возможно, оно является большим в контексте решаемой задачи.

Все отмеченные замечания носят частный характер и никак не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

9 Заключение по диссертации. На основании изучения материалов диссертации, автореферата и основных публикаций по теме диссертации, на мой взгляд, можно сделать вывод о том, что представленная к защите работа является законченным научным исследованием, выполненным соискателем самостоятельно и на высоком научном уровне. В ходе решения поставленных в работе задач получены результаты, обладающие научной новизной и имеющие высокую практическую значимость. Эти результаты подтверждены сравнением с данными экспериментов и численного моделирования.

Разработанные методики численного параметрического исследования устойчивости установившихся режимов угловых движений космического аппарата, расчёта минимального уровня микроускорений на основе модели прогноза, выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик гироскопических исполнительных органов, а также построенные законы управления с использованием гироскопических и магнитных исполнительных органов можно квалифицировать как решение научной проблемы, связанной с созданием долговременных условий для реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту космических аппаратов, имеющей важное значение для развития космических технологий.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Игнатова Александра Ивановича на тему «Динамика и управление угловым движением космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов» является законченной, соответствует специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки), имеет важное практическое значение, соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор – Игнатов А.И. – заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по указанной специальности.

Профессор кафедры теоретической механики
Самарского национального исследовательского
университета имени академика С.П. Королёва, д.т.н.



А.В. Седельников

07.05.2025

Сведения об оппоненте:

1. ФИО: Седельников Андрей Валерьевич.
2. Служебный адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.
3. Служебный телефон: (846) 267-45-04
4. E-mail: axe_backdraft@inbox.ru.
5. Организация: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва.
6. Должность: профессор кафедры теоретической механики



Подпись	<u>Седельникова А.В.</u>	удостоверяю.
Начальник отдела сопровождения деятельности		
учёных	советов Самарского университета	
	<u>Бояркина</u>	Бояркина У.В.
	» <u>июл</u>	20 <u>25</u> г.