

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Дорошина Антона Владимировича
на тему: Регулярная и хаотическая динамика спутников-гиростатов при действии малых
возмущений
по специальности 01.02.01 - теоретическая механика
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа Дорошина А.В. посвящена решению проблемы методического обеспечения ориентации спутников путем реализации регулярных и хаотических режимов возмущенного пространственного движения осевых спутников-гиростатов постоянного и переменного состава, позволяющих осуществлять требуемые эволюции и маневры углового движения за счет использования естественных свойств регулярной динамики и детерминированного хаоса. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обсуждается актуальность работы, формулируется ее цель, дается краткое описание используемых методов и подходов, а также кратко освещаются динамические режимы, в которых конструкционная схема спутника-гиростата обладает функциональными преимуществами по сравнению с другими схемами. В частности, отмечается, что широкое распространение соосной схемы спутника-гиростата определяется простотой конструкции, допускающей использование эффективного метода пассивной гироскопической стабилизации спутников-гиростатов за счет быстрого вращения одного из соосных тел.

В главе 1 автор приводит классификацию и определения гиростатов, подробно касаются известных проектов спутников-гиростатов, приводит подробный обзор работ других авторов, посвященных теме диссертации и по смежным вопросам, приводится перечень задач, решаемых в диссертации.

Вторая глава посвящена введению моделей возмущенного движения спутников-гиростатов, описываемых с помощью угловых скоростей и канонических переменных Андуайе-Депри. Вводятся геометрические и инерционно-массовые параметры асимметричного спутника-гиростата, а также используемые системы координат и взаимные переходы между ними. Малая асимметрия в геометрии и инерционных характеристиках вводится через единый малый параметр. Выписываются уравнения углового движения спутника-гиростата с учетом дополнительной степени свободы – угла вращения тела-ротора относительно тела-платформы. В целях рассмотрения движения намагниченных спутников-гиростатов в геомагнитном поле вводится потенциальная энергия магнитного взаимодействия спутника с собственным дипольным магнитным моментом и внешнего магнитного поля с постоянным в инерциальном пространстве вектором магнитной индукции. Также вводится неконсервативный момент. В итоге в главе формируется полная математическая модель движения нормальных спутников-гиростатов при действии внешних и внутренних возмущений различной природы, которая представлена как в эйлеровой форме, так и гамильтоновой форме в переменных Андуайе-Депри.

В третьей главе представлены аналитические решения для трех различных случаев движения спутников-гиростатов, полученные диссертантом. Это – движения Эйлера при малых магнитных возмущениях с требованием сонаправленности начального кинетического момента и вектора внешней магнитной индукции; движения Лагранжа для тяжелого

динамически симметричного спутника-гиростата при действии между его соосными телами произвольного внутреннего момента, а также намагниченного спутника-гиростата, обобщающих случаи Лагранжа движения твердого тела; движения спутника-гиростата при малых возмущениях от центрального поля тяготения в режиме конической прецессии, обобщающие случаи Стеклова движения твердого тела в центральном поле. Полученные решения сведены в таблицу.

В четвертой главе изучены хаотические процессы, возникающие в динамике спутников-гиростатов при действии внутренних и внешних возмущений разной природы. Рассмотрены несколько случаев возникновения хаотических движений – хаос при малых полигармонических внутренних возмущениях (момент между маховиком и основным телом), хаотизация динамики в слабом центральном гравитационном поле (на основе формализма Мельникова), хаотизация динамики асимметричных гиростатов (многомерная динамическая система анализируется на основе формализма Виггинса). Исследуются методы подавления хаоса – диссипативный принцип подавления гетероклинического хаоса (обеспечивается наличием аддитивного члена, превышающего амплитуду полигармонической части функции Мельникова-Виггинса); импульсное подавление гетероклинического хаоса (основывается на использовании импульсных негамильтоновых воздействий, «накапливающих» в итоге необходимую величину аддитивного члена); магнитное подавление гетероклинического хаоса (отличается от двух предыдущих схем тем, что не использует методологию Мельникова-Виггинса, а реализует глобальное изменение самого типа фазового портрета).

В пятой главе рассматриваются прикладные аспекты динамики спутников-гиростатов постоянного и переменного состава и представляются три метода пространственной переориентации спутников-гиростатов, разработанные на основе полученных аналитических решений и изученных свойств регулярной динамики и хаоса. Это метод переориентации с помощью инициации гетероклинического хаоса, когда из исходного динамического режима включением внутреннего момента система переводится в окрестность гетероклинического региона, то есть приближается к сепаратрисе за счет изменения уровня энергии текущей фазовой траектории и деформации самого фазового портрета. Затем осуществляется выход на хаотическое движение с мониторингом текущих величин компонент угловой скорости и анализом выполнения критериев достижения необходимой качественной зоны фазового пространства и последующее «выключение» хаоса с переходом спутника-гиростата на новый регулярный динамический режим. Здесь хаос интерпретируется, как некий динамический «хаб», объединяющий выходы на доступные регулярные режимы движения спутника-гиростата. Невозмущенную динамику спутника-гиростата в его свободном пространственном движении определяют четыре главные зоны, разделенные четырьмя гетероклиническими сепаратрисами. При инициации возмущений сепаратрисный регион хаотизируется и формирует хаотический слой, внутри которого фазовая траектория совершает движение, проходя участки фазового пространства, принадлежащие всем четырем невозмущенным зонам. Поэтому при выключении возмущений фазовая точка может оказаться в любой из четырех целевых зон, а значит совершить переход из стартовой зоны в новую целевую зону с изменением качества движения и переориентацией спутника-гиростата в пространстве. Пожалуй, это самый наглядный из представленных в диссертации способ использования хаоса для переориентации спутника. Также описан метод переориентации с использованием омега-режимов, идея которого состоит в переключении-чередовании интервалов свободного движения и интервалов движения с включенными магнитными актюаторами, реализующими омега-режим на интервале времени, соответствующем полупериоду роста продольной компоненты угловой скорости, точно вычисляемому по аналитическим решениям. Синтез углового движения спутников-гиростатов переменного состава приводит к повышению эффективности гироскопической стабилизации пространственного положения путем монотонного уменьшения величины нутации прецессионного движения в процессе изменения массы. Задача сводится к анализу кривизны фазовой траектории – ее

тренд на убывание или возрастание позволяет понять характер развития фазовой траектории.

В Результатах сформулировано, что получены шесть видов аналитических решений для нормальных типов гиростатов в случаях действия внешних и внутренних возмущений, изучен феномен гетероклинического хаоса в динамике движения спутника-гиростата при действии внутренних и внешних возмущений, в том числе определены условия возникновения и способы подавления хаоса. На основе этих решений проведен анализ регулярного и хаотического движения и разработаны схемы управления угловым положением спутников-гиростатов постоянного и переменного состава, основанные на использовании естественных свойств регулярной динамики и детерминированного хаоса. Разработаны новые методы пространственной переориентации спутников-гиростатов, использующие естественные свойства регулярной динамики и хаоса.

Представленный текст диссертации носит заверченный и логично скомпонованный материал исследования. Основные результаты Дорошина А.В. опубликованы в 23 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 01.02.01 и индексируемых в базах данных Scopus и/или WoS. Перечень основных публикаций включает 7 статей в ведущих журналах РАН и 13 статей в международных изданиях с квартилем Q1-Q2.

Актуальность избранной темы. Основное достоинство спутников-гиростатов заключается в возможности реализации произвольной заданной ориентации корпуса спутника за счет связанного кинетического момента при простой технической реализации последнего за счет быстрого вращения ротора вокруг оси, закрепленной в теле спутника. Такие системы хорошо зарекомендовали себя в проектах, не требующих регулярных переориентаций и ограниченных в управляющем ресурсе. В диссертации для исследования выбрана схема спутника двойного вращения. Обычно исследование динамики проводится в детерминистской постановке. Результаты настоящего исследования позволяют расширить класс возможных движений спутника до хаотических и использовать их для переориентации спутников. Актуальность выбранной прослеживается как в теоретическом, так и прикладном аспектах, когда на апробированных конструкциях аппаратов применяются альтернативные законы управления для их переориентации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается рассуждениями, логикой исследования и совокупностью используемых методов и подходов – от строгих аналитических выкладок до моделирования с применением численных методов.

Достоверность и новизна полученных результатов. К новым результатам можно отнести полученные аналитические решения для нормальных типов гиростатов в случаях действия внешних и внутренних возмущений, результаты анализа регулярного и хаотического движения, а также новые схемы и методы управления угловым положением спутников-гиростатов постоянного и переменного состава, основанные на использовании естественных свойств регулярной динамики и детерминированного хаоса. Полученные в работе результаты исследований обладают определенной научной новизной, а также могут быть использованы для решения прикладных задач динамики космического полета. Достоверность проведенных исследований, как это обычно бывает в исследованиях подобного рода, определяется корректным применением методов теоретической механики, методов хаотической динамики, теории эллиптических функций и методов численного моделирования, публикациями в отечественных и зарубежных высокорейтинговых рецензируемых журналах, апробацией на ведущих международных и отечественных научных форумах.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов характеризуется тем, что результаты исследований, включая аналитические модели, методы и решения, будут способствовать развитию *фундаментальной* составляющей динамики систем твердых тел и ее *прикладных аспектов* в рамках разработки модифицированных платформ космических аппаратов с альтернативными схемами управления угловым движением, парирующими возникновение хаотических режимов, либо, наоборот, инициирующими хаотическую динамику в позитивных целях. Результаты могут быть, например, использованы для интерпретации наблюдений за динамикой спутников, когда использование моделей регулярного движения не дает достоверного объяснения наблюдаемых явлений.

По результатам диссертационных исследований получено два отечественных патента на изобретение на способы пространственной переориентации космических аппаратов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Полученные автором результаты могут быть использованы при разработке новых методов исследования динамики космических аппаратов, при анализе их динамики, при анализе нештатных ситуаций в динамике аппаратов.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность. Диссертационная работа Дорошина А.В. является законченной, выполненной автором самостоятельно на подобающем научном и профессиональном уровне. Текст написан хорошим научным языком, аккуратно оформлен, содержит достаточное количество формул, таблиц, пояснений, рисунков. Где того требует логика изложения, приведены рассуждения или подробные математические выкладки. Список литературы содержит 348 наименований и демонстрирует понимание автором современного состояния проблемы, хотя явно не достает сравнения полученных результатов с результатами других авторов.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.

Пожалуй, основное замечание – это отсутствие экспериментального, хотя бы лабораторного подтверждения возможности введения аппарата в режим хаотического движения и вывода из него или существования найденных режимов углового движения.

В самом начале исследования автор путает понятия проблема исследования, цель исследования и решаемые для достижения цели задачи. Проблемой здесь является обеспечение ориентации спутников. Тогда целью диссертационного исследования становится комплексное изучение регулярной и хаотической динамики пространственного движения спутников-гиростатов. В процессе достижения этой цели автор решает задачи и получает аналитические решения для нормальных типов гиростатов в случаях действия внешних и внутренних возмущений с проведением на их основе анализа регулярного и хаотического движения с последующим синтезом требуемых динамических свойств, новых схем управления угловым положением спутников-гиростатов постоянного и переменного состава, использующих естественные свойства детерминированного хаоса. Тогда в логической цепочке все встает на отведенные им свои места.

Одним из главенствующих инструментов в работе для реализации режимов переориентации спутника выбраны магнитные актюаторы. Тема их использования хорошо исследована в литературе и автор приводит подробный список публикаций. Для синтеза законов переориентации и иллюстрации полученных результатов автор вводит предположение о постоянстве местного вектора индукции геомагнитного поля (в точке нахождения центра масс спутника) при движении спутника по орбите (стр. 41-42). Это оправдывается либо рассмотрением экваториальной орбиты (в рамках простой модели геомагнитного поля вектор индукции действительно остается постоянным при орбитальном движении спутника), либо рассмотрением короткого интервала времени, когда вектор индукции

можно считать неизменным (это малая доля времени движения спутника по орбите вокруг Земли). Оба предположения не реализуются в миссиях, на которые ориентированы результаты исследования – на экваториальной орбите только в рамках самой простой модели вектор **В** постоянен, а на наклоненной орбите его можно считать постоянным на интервалах времени, не представляющих интерес для практики. Поэтому актуальность результатов скорее носит академический характер. Характерным примером (стр. 43, переход от (2.57) к (2.58), а также от (2.57) к (3.9) и окончательно к (3.15) - стр.55-56), который прослеживается в первых трех главах, - это рассуждения о малости управляющего момента, а потому вектор кинетического момента считается совпадающим с неизменным вектором **В** (!), а дальше этот позиционный вектор подменяется в уравнениях движения могущим изменяться довольно произвольным вектором **К**. Порядок системы понижается в два раза (ибо исключаются позиционные переменные) и система успешно интегрируется. При этом отсутствуют оценки, на каком интервале времени справедливы эти решения и имеет ли оно отношение к первоначальной гипотезе о полном совпадении и неподвижности векторов **В** и **К**. Аналогично обосновывается переход от (3.125) к (3.131) – слова “можно приближенно считать” трансформируются в “тогда они равны”. На стр. 162 также звучит “Так как хаотизирующие моменты приняты нами малыми по своей величине, то ... на всем интервале времени можно считать, что вектор кинетического момента **К** является неизменным”. Ситуацию могло бы, вероятно, спасти введение малого параметра с использованием асимптотических представлений и замена в постановке задач фраз типа “рассмотрим движение спутника в магнитном поле” на фразу “рассмотрим движение твердого тела с ротором в магнитном поле”, но этого в диссертации не обнаружено. И, вообще, попытка привязать тему и результаты диссертации к космической технике порождает массу критических вопросов и замечаний.

Вызывает вопрос неравенство (3.14) на стр.56 – размерная величина μ сравнивается с безразмерной единицей.

Схожее замечание касается “затягивания” системы в хаос. Это процесс может быть длительным, а посему предположения о неизменности вектора магнитной индукции на таких интервалах времени ничем не обоснованы. Насколько результаты «грубы» к этому предположению в работе не анализируется. С точки зрения практического применения – скорее можно говорить про возможность использования этих результатов для интерпретации наблюдаемых и необъясняемых регулярными движениями эффектов в динамике спутников, чем об их использовании при проектировании их систем управления – движения около сепаратрисы обычно медленные.

При выводе уравнений движения спутника вокруг Земли необъяснимым образом исчез гравитационный момент. В предположении малости внешнего магнитного момента эффектом от гравитационного момента вряд ли можно пренебречь или хотя бы требуются оценки влияния отброшенного момента и исследование отсутствия вековых эффектов от его действия.

В тексте главы 5 изобилуют ссылки на цвет в рисунках, который при обращении к рисункам обнаружить не удастся – рисунки черно-белые. Это не способствуют ясности интерпретации результатов.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

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

Диссертационная работа «Регулярная и хаотическая динамика спутников-гиростатов при действии малых возмущений» Дорошина Антона Владимировича на соискание ученой степени доктора наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое научное достижение, что соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор

заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.02.01. «Теоретическая механика».

Официальный оппонент



Михаил Юрьевич Овчинников

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика»
профессор по кафедре теоретической механики
главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)
Москва, 125047 Миусская пл., д. 4. Тел. 499-220-78-49, E-mail: ovchinni@keldysh.ru

Подпись официального оппонента профессора М.Ю. Овчинникова заверяю

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
кандидат физико-математических наук

23 сентября 2019 г.



А.И. Маслов