ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дорошина Антона Владимировича
"Регулярная и хаотическая динамика спутников-гиростатов
при действии малых возмущений",
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.02.01 - "Теоретическая механика"

Как известно, роторы являются одним из немногих эффективных средств управления движением спутника вокруг центра масс. Описывающие динамику спутника с роторами уравнения в общем случае трудны для исследования. Поэтому всякое существенное продвижение в решении задач о динамике спутника-гиростата представляет интерес, чем обусловлена актуальность выбора темы исследования.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 348 наименований. Текст работы составляет 224 страницы.

Во введении обсуждается актуальность выбранной темы исследования, определяются цели исследования, даётся краткое описание методов и подходов к решению сформулированных задач.

В первой главе обсуждаются различные постановки задачи о движении гиростата: случай, когда роторы совершают движение с поддерживаемыми постоянными относительными угловыми скоростями (гиростат Кельвина в зарубежной терминологии) и случай, когда роторы совершают свободное вращение (en: apparent gyrostat). Среди гиростатов, совершающих орбитальное движение, выделяются системы, именуемые автором "осевыми спутниками-гиростатами", а также так называемые космические аппараты с "двойным вращением". Приводятся многочисленные примеры зарубежных космических аппаратов, в основе систем ориентации которых положены гиростаты.

Указывая на то, что "космические аппараты и спутники совершают пространственное движение в условиях действия гравитационных и электромагнитных моментов", автор особое внимание уделяет описанию возможностей магнитных систем управления угловым движением.

Далее автором предъявляются ссылки на многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов, посвящённые различным аспектам ориентации спутников, оснащённых роторами и спутников, содержащих магнитные элементы, а также на работы, посвящённые методам изучения хаотического поведения динамических систем.

Во второй главе, носящей преимущественно вспомогательный характер, описываются математические средства и модели, которые используются автором в дальнейшем. В частности, даётся описание переменных Деприи-Андуайе, выписываются уравнения движения пары тел, вращающихся вокруг общей оси (соосных тел). Выделяется случай экваториальных орбит, для которых вектор магнитной индукции можно считать постоянным и перпендикулярным плоскости орбиты. Утверждается, что "выбором инерциальной оси CZ вдоль вектора нормали к экваториальной круговой орбите будет обеспечиваться постоянство и сонаправленность вектора геомагнитной индукции B_{orb} с вектором кинетического момента свободного спутника-гиростата K в режиме цилиндрической прецессии ..."[1]. Даётся оценка[2], при выполнении которой, по мнению автора, "можно считать, что кинетический момент будет практически постоянным вектором совпадающим с направлением магнитной индукции..." .

Третья глава посвящена отысканию частных решений уравнений движения гиростата со свободно вращающимися роторами при наличии постоянного однородного магнитного поля. Автором выделяются три класса движения:

I. Класс, называемый автором "классом движений Эйлера", существование которого предполагает малость вектора магнитной индукции и его сонаправленность

1 Текст, стр.42; автореферат, стр.17.

2 Текст: (2.57); автореферат: (2.14).

"начальному кинетическому моменту".

II. Класс, называемый автором "классом движений Лагранжа", существующий для "тяжёлого спутника-гиростата".

III. Класс, в котором фигурирует "Движение спутника-гиростата при малых возмущениях от центрального поля тяготения в режиме конической прецессии, обобщающее случай В.А.Стеклова движения твёрдого тела в центральном поле".

Движения класса I находятся в предположении о том, что собственный магнитный момент спутника является переменным и пропорциональным компонентам угловой скорости спутника.

Движения класса II находятся в двух случаях: в случае тяжёлого динамически симметричного спутника-гиростата в предположении о произвольности момента, действующего между его составляющими, и в случае намагниченного спутника гиростата. Также выписываются гетероклинические движения для применяемого подхода к описанию переменного гиростатического момента, а также гетероклинические движения, включая решения в переменных «действие-угол» для угла поворота ротора.

Движения класса III изучаются в предположении о малости возмущений со стороны центрального поля тяготения и сонаправленности вектора кинетического момента и локальной вертикали.

В четвёртой главе изучаются вопросы, связанные с хаотизацией динамики изучаемой системы. Прежде всего рассматривается случай, когда взаимодействие между ротором и платформой носит так называемый полигармонический характер. В этом случае вычисляется в явном виде функция Пуанкаре-Мельникова, указывается на наличие у неё изолированных нулей, откуда делаются выводы о наличии хаотической динамики.

Далее рассматривается случай, когда возмущающее воздействие обеспечивается слабым гравитационным полем. Также выписывается функция Пуанкаре-Мельникова и обсуждаются её нули. Кроме того, с применением формализма Пуанкаре-Мельникова-Виггинса исследуется случай, когда хаотическое движение обеспечивается асимметрией ротора.

В этой же главе обсуждаются случаи подавления хаотического поведения путём выбора конструктивных параметров, обеспечивающих отсутствие нулей функции Мельникова-Пуанкаре. В частности, обсуждаются возможности подавления хаоса за счёт диссипации, за счёт импульсных воздействий, а также за счёт магнитных средств.

Пятая глава посвящена обсуждению возможностей переориентации спутника за счёт эксплуатации хаотических движений. Предлагаемый метод предусматривает перевод системы из рабочего режима в окрестность предполагаемого хаотического слоя и последующее включение устройств, обеспечивающих хаотизацию движения. В дальнейшем, по достижении фазовой траекторией определённой области фазового пространства, предполагается выключение устройств, обеспечивающих хаотизацию, и приведение системы в новый плановый рабочий режим. На примерах детально разбираются принципы работы такой схемы управления, в частности, построение управляющих воздействий на основе анализа образов и прообразов невозмущённых сепаратрис, получающихся в результате действия возмущённого фазового потока. Также в этой главе осуществляется построение синтеза управления спутником-гиростатом переменного состава, нацеленного на монотонное уменьшение величины угла нутации в ходе прецессионного движения для космические систем переменного состава, в частности, оснащённых т.н. столом закрутки.

В последнем разделе кратко сформулированы результаты, выносимые на защиту.

По работе можно сделать ряд замечаний.

Главное, принципиальное замечание таково: в существенной части работы автор молчаливо пренебрегает моментами со стороны сил притяжения. Наличие таких моментов составляет основную трудность при исследовании динамики спутников, в частности спутников-гиростатов. Фактически от рассмотрения спутниковых задач автор перешёл к рассмотрению движения космического аппарата, центр масс которого движется по прямой вдали от гравитирующих объектов, в однородном магнитном поле. Эту же задачу можно трактовать как задачу о движении гиростата вокруг центра масс или неподвижной точки в однородном магнитном поле. Тем самым по существу автор отошёл от темы исследования, заявленной в названии диссертации. Благодаря сделанным предположениям уравнения движения оказываются существенно более простыми, хотя и нетривиальными. Их исследование также требует существенных усилий. Тем не менее, такие упрощения сказывается не в лучшую сторону ***на значимости*** выполненных исследований.

Другое принципиальное замечание относится к способу исследования, доминирующему на протяжении ряда разделов диссертации. Рассмотрим это замечание на примере. Объект исследования - уравнения

$$\dot{K} + \omega \times K = m \times B, \qquad \dot{B} = B \times \omega, \tag{1}$$

где K - вектор кинетического момента, B - постоянный в абсолютных осях вектор магнитной индукции, ω - вектор угловой скорости, m - дипольный момент собственной намагниченности тела, предполагаемый зависимым от параметров задачи и фазовых переменных. Уравнения по виду близки к уравнениям Эйлера-Пуассона из динамики тяжёлого твёрдого тела. В работе предполагается, что в начальный момент вектор K сонаправлен вектору B, и это свойство остаётся справедливым на протяжении всего движения. Благодаря сделанному предположению автор осуществляет в первом из уравнений вида (1) замену переменных[3], позволяющую привести первую группу уравнений (1) к уравнениям

$$\dot{K} + \omega \times K = m' \times K, \tag{2}$$

по структуре аналогичны уравнениям Эйлера в динамике твёрдого тела или уравнениям Жуковского-Вольтерра в динамике гиростата. Но эти уравнения неэквивалентны исходным: для уравнений (1) сохраняется лишь проекция (K,B) вектора K на направление B, в то время как для уравнений (2) сохраняется величина вектора K. Ну, а раз величина вектора K меняется, а величина вектора B неизменна, то в силу упомянутого сохранения проекции меняется угол между векторами K и B, даже если они в начальный момент были коллинеарны. Имеет место уход, который не принят во внимание в ряде разделов диссертации. Получаемые в этих разделах решения дифференциальных уравнений и качественные свойства этих решений по всей видимости верны, но не физичны. Это относится к решениям класса I, и к решениям, полученным в ряде разделов при исследовании хаотического динамики.

Имеются и иные замечания. Случай интегрируемости динамически симметричного волчка Лагранжа с произвольным, зависящим от времени моментом сил, приложенным к ротору (случай II), по-видимому, известен специалистам. Так О.С.Волкова в своей диссертационной работе «Некоторые классы движений тяжелого гиростата с переменным гиростатическим моментом», Донецк, 2010 ссылается на него, как на известный и непосредственно следующий из программной работы П.В. Харламова «Об уравнениях движения системы твердых тел» // Механика твердого тела. Киев: Наук. думка, 1972. Вып.4. С.52-73.

По причинам, аналогичным тем, что имеются во втором принципиальном замечании, остались непонятными движения класса III: выполняемая подстановка[4] недопустима по аналогичным причинам. Кроме того, если смотреть на задачу с точки зрения динамики спутника, то при обнаружении решений автор в начальный момент времени выставляет вектор кинетического момента вдоль локальной вертикали,

3 Текст: стр.55, формула (3.11); автореферат: формула (2.15).

4 Текст: стр.86,формула (3.130); автореферат: формула (3.45).

положение которой, понятно, меняется с положением центра масс спутника. Автор пишет также о том, что "режим актуален на коротком интервале орбитального движения" и не поясняет, что это означает, как короток упоминаемый интервал времени и что препятствует существованию этого режима по прошествии означенного интервала.

Данное движение автор связывает с именем В.А.Стеклова, работа которого, цитируемая как [319], посвящена вопросу об эквивалентности уравнений движения в известном интегрируемом случае Бруна движения твёрдого тела вокруг центра масс в центральном поле сил, а также интегрируемым случаем Клебша в задаче о движении тела в жидкости. То, что в работе Бруна речь идёт о движении тела вокруг неподвижной точки, хорошо известно. Так В.В.Белецкий, "переоткрывший" этот случай на заре космической эры (В.В.Белецкий, Доклады АН СССР, 1957, Т.113, №2, С.287-290), в своей монографии (Белецкий В. В., Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука, 1965) счёл уместным поместить соответствующие результаты в приложение 1, тем самым подчеркнув их определённую «отстранённость» от спутниковой тематики, которой посвящена основная часть книги.

Хороший, аккуратный результат раздела 4.1, посвящённого хаотической динамики тела с ротором в случае его так называемого полигармонического относительного движения ротора омрачён невыполнением неравенств треугольника в примере, проиллюстрированном на рисунках 4.1 — 4.4.

При изучении хаотического поведения автор не всегда явно вычисляет функцию Пуанкаре — Мельникова: в двух других рассмотренных задачах, корректность постановки которых обсуждалась выше, окончательные выводы о наличии нулей у функций Пуанкаре-Мельникова, были сделаны, так сказать, «из общих соображений»: например, коэффициенты в выражении (4.29) и выражении (4.46) не вычислены ни аналитически (что, вообще говоря, затруднительно), ни численно. Также заметим, что факт хаотической динамики для пространственных движений спутника, в том числе — при наличии магнитного поля, хорошо известен: см., например, публикации А.Мациевского и его соавторов (A.J. Maciejewski, K Goździewski Nonintegrability, separatrices crossing and homoclinic orbits in the problem of rotational motion of a satellite // In: Chaotic Dynamics, 145-159. Springer. 1992; A.J. Maciejewski Non-integrability of a certain problem of rotational motion of a rigid satellite // Dynamics of Natural and Artificial Celestial Bodies. 2001. 8. P.187-192; A.J. Maciejewski, M. Przybylska Non-integrability of the problem of a rigid satellite in gravitational and magnetic fields // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2003. Vol.87. No.4. P.317- 351), на которые автор не ссылается.

В связи с задачей о хаотическом поведении твёрдого тела при наличии асимметричного соосного тела необходимо заметить, что эта задача исследовалась ранее в работе Е.А.Ивина «К вопросу об интегрируемости задачи о движении по инерции связки двух твёрдых тел» // Вестник МГУ. Сер. математика, механика. 1986. №2. С.63-66, а также в его кандидатской диссертации. Примечательно, что упомянутая работа Е.А. Ивина цитировалась автором в публикации (Прикладная математика и механика, 2010), но это цитирование в диссертацию не попало, сравнительный анализ результатов с результатами Е.А.Ивина в диссертации отсутствует. Также в работах Е.А.Ивина указываются некоторая неполнота исследования, выполненного Марсденом и Холмсом и посвящённого той же задаче. Эта работа Марсдена и Холмса активно цитируется автором, но упомянутая неполнота не обсуждается.

Относительно подавления хаоса за счёт устранения нулей функции Пуанкаре-Мельникова необходимо сказать, что отсутствие таких нулей не является спасением от нерегулярного поведения системы. Согласно результатам С.Л.Зиглина (Труды ММО, 1980) для неинтегрируемости уравнений движения достаточно того, чтобы функция Пуанкаре-Мельникова не была тождественно постоянной. Это означает, что устранение нулей функции Пуанкаре-Мельникова ещё не гарантирует регулярности поведения, и вопрос о наличии или отсутствия хаоса требует дополнительного исследования. Более того, чтобы говорить о полном отсутствии хаоса, надо доказывать интегрируемость уравнений движения, а в диссертации как раз доказывается неинтегрируемость изучаемых уравнений.

Идея использования хаоса для переориентации спутников на первый взгляд выглядит интересной. Однако поведение системы в окрестности гетероклинической структуры называют хаотическим именно потому, что в ряде случаев по сколь угодно точному знанию начальных значений невозможно предугадать, в какой части фазового пространства окажется система. Иными словами, движение в хаотическом слое может привести в желаемую область фазового пространства, а может и не привести. Кроме того, в работе при исследовании вопросов управления используются результаты по хаотической динамике, сформулированные в переменных Деприт – Андуайе, в то время как задачу об управлении ориентацией приходится решать, например, в углах Эйлера, поддающихся наблюдению. Перенесение результатов из одних переменных в другие в данном случае составляет непростую задачу.

При исследовании хаотической динамики методом отображения Пуанкаре следовало бы каждый раз указывать, какая гиперповерхность в фазовом или в расширенном (в случае неавтономных возмущений) фазовом пространстве берётся в качестве сечения Пуанкаре.

Имеются также не столь существенные замечания. Так автором используется терминология, вводящая читателя в недоумение. Например, в то время как понятие асимметричного ротора встречается в литературе, то твёрдое тело, оснащённое таким ротором, вряд ли можно называть гиростатом. Согласно классическому определению (см., например, Т.Леви-Чивита, У.Амальди Курс теоретической механики, том 2, часть вторая, стр.219), поворот ротора не должен менять геометрию распределения масс относительно того, что авторы учебника называют «твёрдой частью гиростата» (см. также, например, К.Магнус Гироскоп. Теория и применение. М.: Мир, 1974). Понятие тел, имеющих общую ось вращения, выглядит гораздо более уместным и встречающимся в литературе (см., например, В.М.Морозов с соавторами, Космические исследования, 2016). Другим примером такой терминологии стало понятие "плоского поля силы тяжести", ранее рецензенту не встречавшееся. Также вызывает некую растерянность понятие тяжёлого (!) спутника-гиростата.

Из обильного списка цитируемых публикаций было бы вполне достаточно оставить лишь те, которые непосредственно примыкают к исследованиям автора. Эти цитирования следовало бы сопроводить анализом, позволяющим понять, как связаны результаты работы автора с работами его предшественников, в чём состоят его успехи по сравнению с их достижениями.

Наконец, в работе имеются некоторые огрехи, не играющие особой роли для оценки научной значимости полученных результатов. Так знаменитый американский математик и механик австрийского происхождения Томас Кейн, имя которого носят известные уравнения Кейна, в работе именуется Кэном. Фамилия выпускницы донецкой школы механики Елены Константиновны Узбек склоняется по правилам склонения одушевлённых существительных мужского рода. При переводе на русский фамилии известного специалиста по спутникам-гиростатам Роберсона в неё вкралась буква «т». В исходной версии фамилии американского механика Ф.Холмса (Ph.Holmes) утрачена буква "e". Впрочем, этим же страдает и упомянутая работа Е.А.Ивина.

Считаю, что наибольший интерес в работе представляют разделы, посвящённые вопросам управления с использованием хаотических движений и построению синтеза подавления колебаний по углу нутации. Полученные в диссертации результаты докладывались на ряде национальных и международных научных семинаров и конференций. Они достаточно полно опубликованы в отечественных журналах из списка ВАК, а также в международных научных изданиях. У автора имеются патенты. Автореферат диссертации достаточно полно и правильно отражает её содержание.

Автором проделана большая работа по исследованию уравнений, приведённых в диссертации. Он владеет методами современной теоретической механики и теории динамических систем, уровень его квалификации в применении этих методов в целом соответствует уровню доктора физико-математических наук. Ему будет вполне по силам внести в текст диссертации исправления, устраняющие как принципиальные, так и иные замечания, после чего диссертационную работу можно будет рассмотреть вновь. Считаю, что после приведения работы в соответствие «Положению о порядке присуждения ученых степеней», она сможет быть классифицирована как диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 - "Теоретическая механика", а самому автору, Антону Владимировичу Дорошину, может быть присуждена искомая учёная степень.

Официальный оппонент

А.А.Буров

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» Российской академии наук
119333 Москва, Вавилова 40.

Контактные данные:

тел.: 7(499)1353590, e-mail: aburov@ccas.ru

Подпись А.А. Бурова и сведения о нём заверяю

Директор ФИЦ ИУ РАН
академик

И.А. Соколов