

Выдержки из автореферата докторской диссертации Набиуллина Мансура Каримовича, 1996, 01.02.01 — Теоретическая механика

Актуальность проблемы.

Исследования динамики сложных космических систем относительно центра масс в ньютоновском центральном поле сил под воздействием моментов различной физической природы посвящено большое количество работ как в нашей стране так и за рубежом (см. например, библиографии, приведенные в монографиях Б.В.Белецкого, Н.Н.Моисеева и В.В. Румянцева, В.В.Румянцева, В.Г.Демина в обзорах, В. М. Морозова, R.E.Roberson'a, В.А.Сарычева, М. З. Литвина-Седого, S.K.Sbrivastava, В.Ј.Моai.

В последнее время, в связи с потребностями развития космической техники и космических полетов, тенденцией увеличения размеров орбитальных систем и уменьшения их жесткости и рядом других факторов (в частности, повышенные требования к точности ориентации составных космических аппаратов относительно клерикальной или орбитальной системы координат) стали весьма актуальными проблемы нелинейной динамики, устойчивости и стабилизации составных космических систем с учетом упругости и деформируемости их отдельных конструкций. Такими конструкциями являются, например, выдвигаемые штанги, упругие стержни передающих антенн, упругие пластины панелей солнечных батарей, антенны, упругие кольца радио антенн, гибкие тросы, упругие топливные баки с жидким наполнителем и т.п. (обширная библиография приведена в работах А.П.Алпатова, Я.А.Белоноюсо и др., В.В.Горбунцова и др., В.В.Белецкого и Е.М.Левина, Г.Л.Дегтярева и Т.К.Сиразетдинова, Л.В.Докучаева, Д.М.Климова и А.П.Маркеева, Л.К.Лилова, В.Н.Рубановского, Т.К.Сиразетдинова, Ф.Л.Черноусько, Н.Н. Болотника и др., Misra A.K., Modi V.J.). Как отмечено в работе R.I. Roberson'a, деформируемость конструкций, нежесткость космических аппаратов оказывают влияние на проектирование систем управления ими, и эти факторы весьма значительные сегодня, могут стать еще более важными в будущем, поскольку космические аппараты все больше принимают вид-большой и сложной конструкции.

Во многих теоретических разработках и решении прикладных задач, исследователями используются дискретные модели сложных механических систем, содержащих упругие тела. Упругие тела представляются как совокупность взаимосвязанных абсолютно твердых

тел, соединенных между собой невесомыми пружинами и другими устройствами. Движение систем описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Часто используется и другой подход дискретизации, основанный на представлении компонентов вектора упругого перемещения в виде суммы произведений форм колебаний, зависящих от пространственных координат, на обобщенные координаты, зависящие от времени. Затем, оставляя в разложении компонентов вектора упругого перемещения конечное число членов (обобщенных координат), система с бесконечным числом степеней свобода заменяется системой с конечным числом степеней свобода, движение которой так»® описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Уравнения движения сложных механических систем, состоящих из твердых и упругих тел, стесненных голономными связями в рамках систем с конечным числом степеней свобода, выводятся методами аналитической механики, в том числе из формализма Лагранжа и основных

теорем динамики систем. Причем, для широкого класса систем тел вывод уравнений движения в настоящее время алгоритмизирован.

Указанные выше два подхода - метод сосредоточенных параметров и метод нормальных форм колебаний - успешно применяются при моделировании, сложных механических систем и в сочетании с качественными методами и с применением современной вычислительной техники позволяют объяснить суть некоторых физических явлений, получить количественные оценки. Более адекватным является подход моделирования сложных механических систем как системы с распределенными параметрами, моделирование упругих конструкций в виде сплошных континуумов и описание их движений интегро-дифференциальными уравнениями с обыкновенными и частными производными. Однако, в отличие от вышеуказанных методов дискретизации, этот подход моделирования еще в полной мере не формализован.

Теоретические исследования движения крупногабаритных космических систем является весьма сложной задачей. Даже вывод дифференциальных уравнений сопряжен с большими трудностями. Особенно трудны задачи отыскания стационарных решений, описывающих стационарные движения и нелинейный анализ их устойчивости, но именно они встают первыми перед разработчиками систем стабилизации космических аппаратов. Стационарные движения- положения равновесия упругих космических аппаратов в орбитальной системе осей координат часто являются штатными режимами космических аппаратов с гравитационно-градиентной стабилизацией, имеющих продолжительное время функционирования. Примером может служить режим одноосной гравитационной ориентации орбитального комплекса "Салют-Б" "Союз". В стационарном движении упругий спутник сохраняет определенную ориентацию в орбитальной системе координат, что важно для ряда технических прикладных задач. В частности, изучение стационарных движений связано с возможностью получения пассивной ориентации упругих спутников, основанной на использовании свойств окружающих силовых полей, гравитационного и магнитного, эффекта светового давления, сопротивления атмосферы и др.

Первые исследования стационарных движений сложных механических систем, в том числе упругих спутников, и их устойчивости, начаты в работах В.В. Румянцева и его учеников и последователей. Решение задач устойчивости и стабилизации стационарных движений упругих спутников может быть эффективно осуществлен методом функций Ляпунова или теоремой Рауса-Ляпунова, распространенных на системы с распределенными параметрами. При решении этих задач возникают математические трудности, связанные с построением функционалов Ляпунова и проверкой их знакоопределенности, непрерывности по заданной метрике. Если уравнения движения допускают первые интегралы, то построение функционала Ляпунова осуществляется по методу Н.Г.Летаева, в виде связки первых интегралов. Проверка определенно-положительности, (определенно-отрицательности) функционалов, в том числе при ограничениях, содержащих конечномерные переменные и распределенные параметры по заданной метрике, представляет трудную и не решенную задачу.

Диссертация посвящена указанным актуальным аспектам проблемы нелинейной динамики орбитальных упругих космических систем.

Цель работы.

Состоит в развитии и обобщении методов составления математических моделей и исследования устойчивости и стабилизации стационарных движений упругих систем, получении достаточных условий их устойчивости и анализе этих условий.

Достоверность результатов работы,

Достоверность полученных результатов определяется применением строгих методов аналитической механики, механики сплошных сред, теории устойчивости движения, теории дифференциальных уравнений, математического анализа, высшей алгебры, дифференциальной геометрии, известных и разработанных в диссертации строгих методов нелинейной механики.

Научная новизна.

1) В диссертации разработана методика вывода нелинейных интегро- дифференциальных уравнений с обыкновенными и частными производными при краевых условиях, описывающих поступательно-вращательное движение составных крупногабаритных орбитальных систем с деформируемыми конструкциями в ньютоновском центральном поле сил,

2) Впервые дифференциальные уравнения движения сложных механических систем с двумерными упругими элементами записаны в новых канонических переменных Гамильтона.

3> Доказаны новые теоремы об изменении полной и неполной энергии составных сложных механических систем, обобщающие аналогичные теоремы аналитической механики с конечным числом степеней свободы и которые эффективно используются и могут быть использованы при исследовании задач устойчивости и стабилизации спутников с деформируемыми элементами. При определенных предположениях из них, как следствие, получен закон сохранения полной и неполной механической энергии, интеграл типа Якоби. Доказано, что наряду с этими первыми интегралами дифференциальные уравнения движения поступательно-вращательного движения нежестких орбитальных систем допускают интеграл площадей и интегралы, выражающие постоянство проекции кинетических моментов динамически симметричных спутников-гиростатов с деформируемыми элементами на оси их динамической симметрии.

4) Разработан и реализован новый конструктивный подход проверки определительно-положительности* (определенно-отрицательности) и непрерывности функционалов по двум энергетическим метрикам. Предложен модифицированный и обобщенный способ построения из первых интегралов функционалов Ляпунова.

5) Аналитическими методами детально изучены и решены новые конкретные и важные задачи, имеющие теоретическое и прикладное значение. Составлены математические модели орбитальных систем с круглой кольцевой антенной, двумя и одной парой прямоугольных панелей, тремя ларами стершей с точечными массами на свободных концах, а также орбитальной тросовой системы. Найдены их стационарные движения - положения равновесия в орбитальной и регулярные прецессии в неподвижной системе осей координат. Методом функционалов Ляпунова получены достаточные условия устойчивости стационарных движений по двум метрикам и проведен подробно параметрический анализ этих условий. Показано, что деформируемые элементы оказывают существенное влияние на ориентацию и стабилизацию орбитальных систем.

6) Рассмотрена орбитальная система, которая состоит из двух динамически симметричных спутников-гиростатов, связанных между собой при помощи трехстепенного обобщенного шарнира. К корпусу одного из них жестко прикреплен круглая кольцевая деформируемая антенна и упругая штанга с точечной массой на свободном конце. Детально изучено

семейство стационарных движений, когда оси динамической симметрии спутников с маховиками, антенны и штанги перпендикулярны к плоскости орбиты. Методом функционалов Ляпунова получены достаточные условия устойчивости указанного стационарного движения и проведен анализ этих условий устойчивости.

Практическая значимость.

Методика и результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при проектировании и исследовательских разработках в различных областях техники, в том числе, авиационной и космической, крупногабаритных орбитальных упругих космических систем, а также для дальнейшего развития теории устойчивости и стабилизации систем с распределенными параметрами. Результаты работы включены в отчеты по НИР и переданы в НПО "Энергия", Институт космических исследований РАН, НПО "Прикладная механика", использовались в Иркутском ВЦ СО РАН, Иркутском госуниверситете, Казанском техническом университете (КАИ), НПО "ЭНЕРГИЯ", "Жй", НПО "ПРИКЛАДНАЯ ЛЕЩИКА" и других организациях.

Апробация работа.

Основные результаты диссертации докладывались автором на семинаре Иркутского ВЦ СО РАН "Векторные функции Ляпунова" под руководством академика Б.М. Матросова, ежегодных Ляпуновских чтениях, проводимых в Иркутском ВЦ СО РАН; III, IV, V Всесоюзных Четаевских конференциях по устойчивости движения, аналитической механике и управлению движением (Иркутск-Бухта Песчаная, июнь 1977г.; Звенигород, декабрь 1982 г.; Казань, сентябрь 1987 г.), II, V, VI Всесоюзных конференциях по оптимальному управлению в механических системах (Казань, январь 1978 г.; Львов, апрель

1988 г.), Всесоюзных Каменковских конференциях по устойчивости движения, колебаниям механических систем и аэродинамике (Москва, январь-февраль 1978; Москва, февраль 1988 г.), семинаре по аналитической механике МГУ под руководством академика В.В. Румянцев, Университетской школе "Метода исследования стационарных движений механических систем" (Колюбакино, март 1979 г.), Всесоюзных и международных научных школах "Метод функций Ляпунова и его приложения" (Иркутск - Бухта песчаная, август 1979 г.; Иркутск-Утуяик август 1982 г.; Иркутск-Лиственичное, сентябрь-октябрь 1985 г.; Иркутск-Лиственичное, сентябрь 1989 г.; Международная научная школа, состоявшаяся в июне 1992г. и приуроченная к 60-летию со дня рождения академика Б.М. Матросова), Республиканской школе по общей механике и теории упругости (Хелави, сентябрь 1981 г.), Всесоюзной конференции "Современные вопросы математики и механики и приложения" (Москва, апрель 1983 Г.), VI, VII Всесоюзных съездах по теоретической и прикладной механике (Ташкент, сентябрь 1986 г.; Москва, август 1991 г.), Международном семинаре "Динамика нелинейных систем" (Иркутск-Лиственичное, август 1987 г.), Торжественном научном семинаре, посвященном 80-летию со дня рождения профессора П.А.Кузьмина (Казань, ноябрь 1988 г.), Всесоюзной конференции по качественной теории дифференциальных уравнений (Юрмала, апрель

1989 г.), VII Национальном конгрессе по теоретической и прикладной механике (Варна, сентябрь 1989 г.), Международном симпозиуме ЮТАМ "Dynamical Problems of Rigid-Elastic Systems and Structures" (Moscow, 1990). Международной конференции по крупногабаритным космическим конструкциям - "IC01ASS 93" (Новгород, май 1993г.), International Aerospace Congress - IAC'94.

th Birth Anniversary of the First Astronaut TORY GAGARIN (August 15-19, 1994, Moscow Russia), семинаре при Научном Совете РАН по механике систем и Яучгом Совете РАН по проблемам управления движением и навигации под руководством академика А.Ю. Ишлинского, академика Д.М. Климова (Москва, ноябрь 1995 г.), семинаре по аналитической механике и теории устойчивости движения МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством академика В.В. Румянцева (Москва, декабрь 1995 г.).

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-23], В совместных публикациях (6, 16, 19, 20] автору принадлежат результаты, связанные с моделированием спутников с упругими элементами и исследованием устойчивости и стабилизации их стационарных движений.

Структура и объем диссертации.