

АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности 8D07105 – «Космическая
техника и технологии»

ОРАЗАЛЫ ЕРКИНА ЕРМЕКОВИЧА

Разработка метода анализа устойчивости нелинейной системы управления ориентацией спутника на основе ее математической модели в линейной форме

Актуальность исследования

Системы управления ориентацией спутников относятся к числу ключевых бортовых систем космического аппарата, поскольку обеспечивают требуемое пространственное положение корпуса, наведение полезной нагрузки, ориентацию антенн и солнечных батарей, а также выполнение целевых режимов полета. Для малых космических аппаратов и наноспутников данная задача имеет особое значение, так как ограниченные энергетические, массово-габаритные и вычислительные ресурсы требуют применения компактных, надежных и технически реализуемых алгоритмов управления.

Одним из распространенных вариантов активной трехосевой стабилизации являются системы управления ориентацией спутников (СУОС) с маховичными исполнительными органами. Управляющие моменты в таких системах формируются за счет изменения угловых скоростей маховиков, установленных по осям аппарата. Такое техническое решение не требует расхода рабочего тела и позволяет реализовать точное управление ориентацией в течение длительного времени.

Вместе с тем динамика системы «спутник–маховики» является существенно нелинейной, связана с кватернионной кинематикой, перераспределением кинетического момента и зависимостью движения от начальных условий. В существующих исследованиях для анализа и синтеза систем управления ориентацией применяются локально линеаризованные модели, методы Ляпунова, линеаризация обратной связью, *backstepping*, *sliding mode*, *SDRE/SDARE*, H_2/H_∞ -подходы и другие методы. Однако значительная часть таких подходов либо ограничивается анализом локальной устойчивости в окрестности заданного режима, либо требует построения специальных нелинейных, робастных или оптимизационных законов управления.

В связи с этим актуальной является разработка метода анализа устойчивости СУОС, который позволяет сохранить связь с ее исходной нелинейной моделью и одновременно использовать аппарат линейной теории автоматического управления. Такой подход обеспечивает возможность аналитического определения условий асимптотической устойчивости СУОС и допустимых параметров PD-закона управления с учетом начального кинетического момента спутника.

Цель исследования

Целью диссертационной работы является разработка и обоснование метода анализа устойчивости СУОС с маховичными исполнительными органами на основе представления ее нелинейной динамики в линейной форме с переменными коэффициентами, исследования асимптотических свойств кинетического момента и определения условий устойчивости СУОС в пространстве параметров PD-закона управления.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Построить математическую модель СУОС с маховичными исполнительными органами на основе уравнений вращательной динамики, кватернионного описания ориентации и PD-закона управления.
2. Обосновать возможность представления исходной нелинейной системы дифференциальных уравнений динамики СУОС в линейной форме с переменными коэффициентами при специальном выборе переменных состояния.
3. Исследовать асимптотические свойства кинетического момента системы «спутник–маховики» и установлена связь его предельных характеристик с коэффициентами линейной формы.
4. Сформировать предельную линейную систем уравнений с постоянными коэффициентами и получить зависимость коэффициентов ее характеристического полинома от параметров закона управления и начального кинетического момента спутника.
5. Определить условия асимптотической устойчивости СУОС в пространстве параметров PD-закона управления на основе коэффициентных критериев устойчивости систем управления.
6. Выполнить независимую проверку полученных условий устойчивости СУОС с использованием классических критериев линейной теории автоматического управления.
7. Провести сравнение численных решений исходной нелинейной системы уравнений и полученной ее линейной формы при различных начальных условиях.
8. Выполнить экспериментальную проверку работоспособности выбранной структуры управления на макетном образце СУОС с маховичными исполнительными органами.

Методы исследования

В диссертационной работе использованы математический аппарат теории движения твердого тела, методы теории автоматического управления, кватернионное описание ориентации, метод преобразования нелинейных дифференциальных уравнений к линейной форме с переменными коэффициентами, коэффициентные критерии устойчивости, критерии устойчивости Соколова–Липатова, Гурвица и Михайлова, методы

компьютерного моделирования, численные расчеты и полунатурные экспериментальные испытания.

Научная новизна проведенных исследований

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке метода анализа устойчивости нелинейной системы управления ориентацией спутника с маховичными исполнительными органами на основе представления ее динамики в линейной форме с переменными коэффициентами.

К новым научным результатам относятся:

1. Разработано представление нелинейной системы дифференциальных уравнений динамики СУОС с маховиками в линейной форме с переменными коэффициентами, сохраняющее связь с исходными уравнениями движения.
2. Установлена связь между асимптотическими свойствами кинетического момента системы «спутник–маховики» и коэффициентами характеристического полинома предельной линейной системы.
3. Получены условия асимптотической устойчивости СУОС, выраженные через устойчивость предельной линейной системы и поведение переменных коэффициентов исходной линейной формы.
4. Показано влияние начального кинетического момента спутника на коэффициенты характеристического полинома предельной системы и на область допустимых параметров PD-закона управления.
5. Выполнена проверка устойчивости предельной системы на основе совокупного применения коэффициентного, алгебраического и частотного методов анализа устойчивости СУОС.
6. Проведена экспериментальная проверка выбранной структуры управления на макетном образце СУОС с маховичными исполнительными органами.

Научная и практическая значимость диссертационной работы

Научная значимость работы состоит в развитии метода анализа устойчивости нелинейных систем управления ориентацией спутников, позволяющего перейти от исходной нелинейной модели к линейной форме с переменными коэффициентами без замены полной динамики локальной аппроксимацией. Такой подход расширяет возможности применения классических критериев устойчивости к задачам анализа СУОС с маховичными исполнительными органами.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования полученного метода при проектировании систем управления ориентацией малых космических аппаратов с маховичными исполнительными органами. Разработанный подход может применяться при математическом моделировании СУОС, предварительном выборе параметров PD-закона управления, построении областей устойчивости, анализе влияния начального кинетического момента, а также при создании лабораторных стендов и макетных образцов для отработки алгоритмов ориентации малых спутников.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод представления исходной нелинейной системы дифференциальных уравнений динамики СУОС с маховичными исполнительными органами в линейной форме с переменными коэффициентами.
2. Метод исследования асимптотической устойчивости СУОС, сводящий исследование исходной нелинейной модели к анализу устойчивости модели в линейной форме.
3. Коэффициентный метод построения области устойчивости СУОС в пространстве параметров PD-закона управления с учетом начального кинетического момента спутника.
4. Результаты численного и экспериментального подтверждения работоспособности предложенного подхода.

Личный вклад соискателя

Автором выполнен анализ современных методов управления ориентацией спутников и методов исследования устойчивости систем управления, построена математическая модель динамики системы «спутник–маховики», проведено преобразование исходной нелинейной системы уравнений динамики СУОС к линейной форме с переменными коэффициентами, исследованы асимптотические свойства кинетического момента спутника, получены условия устойчивости предельной линейной системы, выполнены численные расчеты и построены области устойчивости в пространстве параметров закона управления. Автором также проведена экспериментальная проверка выбранной структуры управления на макетном образце СУОС.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на научных семинарах, заседаниях кафедры и научно-практических мероприятиях, посвященных вопросам космической техники, динамики и управления движением космических аппаратов, теории автоматического управления и разработке систем ориентации малых спутников.

Научные публикации

По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 научных работ, отражающих основные положения и результаты работы, в том числе:

- 3 статьи Q1 в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science;
- 4 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Республики Казахстан;
- 2 материала конференции в издании Springer;
- 4 статьи в сборниках международных научно-практических конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации и публикациях.

В первой главе выполнен обзор методов анализа устойчивости систем управления ориентацией спутников. Рассмотрены особенности спутника с маховичными исполнительными органами как объекта управления, а также показаны ограничения локально линеаризованных моделей и необходимость разработки метода, сохраняющего связь с исходной нелинейной динамикой и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе построена математическая модель динамики СУОС с маховичными исполнительными органами, получена линейная форма исходной нелинейной системы и получены необходимые и достаточные условия ее устойчивости на основе асимптотических свойств кинетического момента. Рассмотрено влияние начального кинетического момента на устойчивость нелинейной СУОС и сформулированы достаточные условия глобальной асимптотической устойчивости СУОС.

В третьей главе проведено построение областей устойчивости системы управления ориентацией спутника с маховиками в пространстве параметров PD-закона управления. Выполнено сравнение численных решений нелинейной и линейной систем уравнений динамики СУОС, проведен анализ устойчивости по методу Соколова–Липатова, критериям Гурвица и Михайлова, а также выполнен сравнительный анализ полученных результатов.

В четвертой главе представлены результаты испытаний системы угловой ориентации спутника. Рассмотрены макетный образец и измерительно-управляющая система, методика группировки экспериментальных данных, испытания по каналам рысканья, крена и тангажа, испытания при внешнем возмущающем воздействии и комплексные испытания.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы и сформулированы итоговые выводы.