

численного алгоритма модального синтеза многомерных многосвязных адаптивных систем управления, а также его тестировании на примере нескольких задач управления движением космических аппаратов. Представленный в диссертации алгоритм основан на принципе последовательного замыкания мод и позволяет осуществлять модальный синтез как обратной связи (регулятора), так и адаптивного наблюдателя для динамических систем больших размерностей, имеющих параметрическую неопределенность.

Цель проведения работы

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма модального синтеза многомерных многосвязных адаптивных систем управления, позволяющего осуществлять как поиск матрицы обратной связи, обеспечивающей необходимый характер переходному процессу, а так же асимптотическую устойчивость объекту управления, так и матрицу весовых коэффициентов, обеспечивающую сходимость оценок неизвестных компонент вектора состояния и неизвестных параметров системы к их реальным значениям. Поставленная цель достигается использованием принципа последовательного замыкания, разработанного автором, который позволяет минимизировать вычислительную ошибку при осуществлении поиска матриц обратной связи и весовых коэффициентов. Предложенный в диссертации алгоритм может быть применен для широкого спектра задач как в области управления движением космическими аппаратами, так и спутниковыми группировками и формациями.

Актуальность работы

Одним из актуальных направлений разработки алгоритмов автономного управления движением летательных аппаратов, обеспечивающих повышение их эффективности, надежности, экономичности и долговечности в условиях параметрической неопределенности объекта управления и непредсказуемых изменений характеристик среды, является адаптивный подход. Суть этого подхода заключается в одновременном самообучении объекта управления, автономном изучении среды его функционирования и управлении им, то есть в приведении объекта к надлежащему функционированию по информации, сформированной в процессе самообучения. При этом нужно особо подчеркнуть, что процессы изучения (обучения) и управления протекают параллельно в режиме реального времени, а сам алгоритм адаптации является звеном контура регулирования.

Построение адаптивной системы управления, а именно настройка бортовой модели при одновременном приведении объекта к требуемому режиму функционирования, может быть практически реализована в рамках теории модального синтеза адаптивного наблюдателя и регулятора для многомерной многосвязной – Multi-input Multi-output (MIMO) динамической системы. На этом

пути возникает задача расчета компонент матриц весовых коэффициентов, обеспечивающих асимптотическую сходимость оцениваемых величин к их фактическим значениям при одновременном расчете матриц коэффициентов обратной связи многомерной следящей системы для ММО динамических систем большой размерности.

В настоящее время разработка аналитических и численных методов модального управления динамическими Multi-input Multi-output системами большой размерности является одной из быстро развивающихся областей прикладной теории управления, о чем свидетельствует бурный, не ослабевающий поток публикаций по этой тематике. Практическая значимость модального подхода для разработки алгоритмов управления сложными системами общеизвестна. Она обусловлена: стремительным развитием космических и информационных технологий, появлением крупногабаритных и сложных конструкций космического базирования, таких, например, как Международная космическая станция (МКС), проектированием космических буксиров, спутниковых группировок и их формаций. Возросший интерес специалистов к автономному управлению полетом группировок беспилотных аппаратов сухопутного, морского, авиационного и космического базирования придает новый стимул в направлении создания конструктивных алгоритмов для решения проблем синтеза систем управления ММО динамическими системами.

К настоящему времени существует достаточно большое количество методов и алгоритмов, которые позволяют осуществлять поиск матрицы обратной связи для модального синтеза систем управления ММО динамических систем. Некоторые из реализованы в виде встроенных функций в программной среде MATLAB. Основными недостатками существующих алгоритмов можно назвать низкую точность при модальном синтезе систем управления большой размерности, а так ограничения, связанные с размещением и кратностью корней замкнутой системы. Вычислительные погрешности в размещении корней методом модального управления могут привести к несоответствию замкнутой системы тем критериям качества, которые задавались при ее проектировании, а в худшем случае могут привести к потере устойчивости замыкаемой системы. Все вышеупомянутые недостатки приводят к необходимости поиска новых численных и аналитических алгоритмов модального синтеза, что доказывает актуальность темы данной диссертации.

Для преодоления недостатков существующих методов решения задачи модального управления, в работе представлен новый численный алгоритм модального синтеза динамических систем, основанный на принципе последовательного перемещения, как пар комплексно сопряженных корней, так и одиночных корней с действительными значениями. Предлагаемый метод

замыкания, использующий принцип последовательного замыкания системы, позволяет применять процедуры матричных преобразований к выделяемым матричным блокам размерности не более 2×2 . При таком подходе, в силу ортогональности модального разложения, вычислительная погрешность численных преобразований матриц почти не накапливается с увеличением размерности. Представленный в данной работе алгоритм позволяет работать как с single-input single-output (SISO), так и с MIMO системами больших размерностей, без существенной потери точности в размещении корней замыкаемой системы, не накладывая какие-либо ограничения на расположение и кратность корней (собственных чисел) замкнутой системы на комплексной плоскости.

Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

- Автором был разработан алгоритм модального синтеза многомерных многосвязных адаптивных систем управления основанный на принципе последовательного замыкания мод. Матричные процедуры, входящие в основу алгоритма, а так же их модификации для некоторых особенностей синтезируемых систем управления разработаны лично автором.
- Автором проведено тестирование разработанного алгоритма последовательного замыкания в задаче разработки закона управления угловым положением крупногабаритной космической станцией с использованием инерционных исполнительных органов. Математическое моделирование, а также сравнительный анализ результатов решения данной задачи с помощью метода последовательного замыкания и с помощью функции `place()`, реализованной в среде MATLAB выполнялись лично автором.
- Разработан адаптивный алгоритм управления ориентацией космической платформы с вращающимся солнечным парусом. С использованием метода последовательного замыкания получены матрица обратной связи и матрица весовых коэффициентов, обеспечивающие устойчивость объекта управления и сходимости оценок неизвестных параметров системы к их реальным значениям. Проведено математическое моделирование режима гашения начальных угловых скоростей, а так же режима программного разворота, демонстрирующее работоспособность и эффективность представляемого алгоритма.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов подтверждается применением широко известных методов теории идентификации систем современной теории автоматического управления. Разработанный алгоритм последовательного

замыкания протестирован на двух задачах управления движением космических аппаратов: выведение и удержание крупногабаритной орбитальной станции в положении динамического равновесия и разработка адаптивного алгоритма управления ориентацией космической платформы с вращающимся солнечным парусом. Полученные законы управления как в первой, так и во второй задачах верифицированы численным моделированием, подтверждающим работоспособность представляемого в диссертации алгоритма.

Успешная апробация результатов исследований, приведенных в диссертации, на всероссийских и международных конференциях, а так же научных семинарах и полученное одобрение специалистами свидетельствует о высоком научном уровне и значимости полученных результатов.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработан новый алгоритм модального синтеза ММО систем, основанный на принципе последовательного замыкания мод движения динамической системы. Суть метода последовательного замыкания заключается в итерационной процедуре переноса как одиночных действительных, так и комплексно сопряженных пар собственных чисел незамкнутой системы в желаемое положение согласно эталонному полиному. На каждой итерации представляемого алгоритма осуществляется поиск «элементарной» матрицы обратной связи, которая передвигает или «замыкает» одну пару корней (собственных чисел) в желаемое положение. Такой подход позволяет осуществлять синтез обратной связи с минимальными вычислительными погрешностями, благодаря чему численная ошибка почти не накапливается с увеличением размерности системы. Результирующая матрица обратной связи, ровно как, и результирующая матрица весовых коэффициентов в задаче построения адаптивного наблюдателя, находятся путем композиции найденных на каждом шаге "элементарных" матриц.
- Введено понятие обобщенного полинома Баттерворта, которое расширяет класс эталонных полиномов и придает замыкаемой системе требуемые свойства по критериям запаса устойчивости и колебательности. Класс введенных обобщенных эталонных полиномов включает в себя, как классические полиномы Баттерворта, так и биномы Ньютона.
- Проведено тестирование разработанного алгоритма на примере задачи поиска и удержания МКС в положении динамического равновесия. На основе полученных результатов представлены результаты сравнения разработанного алгоритма с аналогами, реализованными в виде функций в программной среде

MATLAB, которые демонстрируют преимущества предлагаемого в данной работе метода.

- Разработан адаптивный алгоритм управления ориентацией платформы с вращающимся солнечным парусом при одновременном активном демпфировании упругих колебаний вращающегося мембранного диска. Получены численные значения матриц обратной связи и весовых коэффициентов, обеспечивающих устойчивость угловому положению космической платформы, а так же сходимость оценок неизвестных параметров динамической системы и неизмеряемых напрямую переменных движения к их фактическим значениям.

Практическая значимость результатов работы

1. Представленный в первой главе алгоритм последовательного замыкания мод движения может быть применен для синтеза законов управления, в том числе адаптивных законов управления для многомерных многосвязных динамических систем. Достоинством данного метода является высокая точность в размещении корней замкнутой системы, а так же отсутствие ограничений на их кратность. Это дает возможность использовать данный алгоритм для синтеза регуляторов для систем больших размерностей, обеспечивая нужный характер переходному процессу. Возможные сценарии применения алгоритма последовательного замыкания включают в себя задачи построения законов управления взаимным положением аппаратов (агентов стаи) в спутниковой формации, построение адаптивных систем управления ориентаций крупногабаритными космическими объектами, таких как МКС, с учетом упругости их конструкции и другие.
2. Адаптивный алгоритм управления угловым положением космической платформы с вращающимся солнечным парусом, представленный в третьей главе, который был получен с использованием метода последовательного замыкания, отрывает широкий спектр возможностей по созданию алгоритмов управления ориентацией крупногабаритных КА без расхода рабочего тела и имеющих параметрическую неопределенность.
3. Результаты, полученные в диссертации, включены в лекционные курсы "Динамическая фильтрация" и "Управление крупногабаритными космическими конструкциями", читаемые студентам МФТИ на базовой кафедре "Аэрофизическая механика и управление движением" ФАКИ МФТИ.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Тема диссертации раскрыта, правильно и полно отражена в опубликованных соискателем работах. Всего по теме диссертации опубликовано

11 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и одна монография.

Перечень публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК:

- *Тимаков С.Н., Богданов К.А., Нефедов С.Е.* Метод последовательного замыкания мод движения для многомерных, многосвязных динамических систем. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, серия Машиностроение, Том 5 №98, 2014, С. 40-59.
- *Богданов К.А., Тимаков С.Н.* Синтез адаптивного алгоритма управления движением космической платформы с вращающимся солнечным парусом// Космическая техника и технологии, №1 (16), 2017, С. 89 – 102.
- *Богданов К.А., Сумароков С.В., Тимаков С.Н.* О решении задачи наведения спутника осветителя на заданный район поверхности Земли и оценка освещенности. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, серия Машиностроение.
- *А. Микрин, С.Н. Тимаков, А.В. Зыков, А.В. Сумароков, А.В. Журнов, К.А. Богданов.* Опыт и перспективы создания бортовых алгоритмов управления движением космических аппаратов. // Вестник РФФИ

Публикации в других изданиях:

- *Богданов К.А.* Метод последовательного замыкания мод движения для динамических систем Multi-input Multi-Output (МИМО систем). Труды 56-й научной конференции МФТИ. Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном обществе». Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения». Аэрофизика и космические исследования. – 2013. – Т 1. – С. 78.
- *Богданов К.А., Тимаков С.Н.* Метод последовательного замыкания мод движения для многомерных, многосвязных динамических систем (MULTI-INPUT MULTI-OUTPUT). // XXXVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П.Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – 2014. – С. 480.
- *Тимаков С. Н., Богданов К. А.,* Релейная система управления группировкой спутников // XL АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов, Москва, 2015, С. 362.
- *Богданов К. А.* Алгоритмы удержания КА с большим солнечным парусом вблизи точки стояния на геостационарной орбите силами солнечного

давления // Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики» Сборник материалов конференции, Москва- Самара, 2016, С. 19.

- **Богданов К. А., Тимаков. С. Н.** Алгоритмы удержания КА с большим солнечным парусом вблизи точки стояния на ГСО силами солнечного давления // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2016), Санкт-Петербург, 2016 г, С.327
- **Богданов К. А.** Алгоритм удержания КА с большим солнечным парусом вблизи точки стояния на геостационарной орбите силами светового давления // Труды 59-й научной конференции МФТИ, Москва-Долгопрудный-Жуковский, 2016, С. 121.
- **Богданов К. А.** Терминальный алгоритм управления КА с большим солнечным парусом силами светового давления на геостационарной орбите // XLI академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов, Москва, 2017, С. 393

Основные результаты, представленные в работе, докладывались, обсуждались и получили одобрение специалистов на отечественных и международных конференциях и семинарах:

1. 56 – я научная конференция МФТИ, Московская область, г. Долгопрудный, МФТИ, 25.11.2013 - 30.11.2013 г.
2. XXXVIII АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ («Королевские чтения»), Москва, МГТУ им. Баумана, январь 2014 г.
3. КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УМАС – 2014), Санкт – Петербург, Государственный научный центр Российской Федерации ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», 07.10.2014 – 09.10.2014.
4. Семинар им. В.А.Егорова по механике космического полета, Москва, Главное здание МГУ (22.10.2014, 23.09.2015, 30.03.2016, 15.03.2017, 18.10.2017, 15.11.2017).
5. XX научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, г. Королев, ПАО «РКК Энергия», 10.11.2014 – 14.11.2014
6. 58 – я научная конференция МФТИ, Московская область, г. Долгопрудный, МФТИ, 23.11.2015 - 28.11.2015 г.
7. XL АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ («Королевские чтения»), Москва, МГТУ им. Баумана, январь 2016 г.
8. Конференция «Орбита Молодежи» и перспективы развития российской космонавтики, г. Самара, СГАУ им. С.П. Королева, 8-9 сентября 2016 г.

9. КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УМАС – 2016), Санкт – Петербург, Государственный научный центр Российской Федерации ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», 04.10.2016 – 06.10.2016.
10. XLI АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ («Королевские чтения»), Москва, МГТУ им. Баумана, январь 2017 г.
11. Конференция «Орбита Молодежи» и перспективы развития российской космонавтики, г. Томск, ТПУ, 18-22 сентября 2017 г.
12. 60 – я научная конференция МФТИ, Московская область, г. Долгопрудный, МФТИ, 20.11.2017 - 30.11.2017 г.

Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертация Богданова К.А. полностью соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и охватывает следующие области исследований:

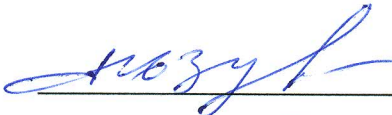
- Теория устойчивости движения механических систем.
- Управление движением механических систем, теория гироскопических и навигационных систем.
- Прикладная небесная механика.

Диссертация к защите представляется впервые.

Вышесказанное дает основание секции НТС **рекомендовать к защите** диссертацию Богданова К.А. «Метод последовательного замыкания мод в задачах модального синтеза адаптивных систем управления движением космических объектов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика в диссертационном совете Д 002.024.01 при Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Заключение принято единогласно на заседании секции №9 научно-технического совета РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Результаты голосования: «За» – 13; «Против» – 0; «Воздержалось» – 0. Протокол заседания №143 от 11 апреля 2018 года.

Заместитель председателя секции НТС,
д-р техн. наук, профессор


Н.Е.Зубов

Секретарь, канд. техн. наук


А.В.Богачев