

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры «Общие проблемы управления» Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Максима Петровича Заплетина на диссертацию Богданова Кирилла Андреевича "Метод последовательного замыкания мод в задачах модального синтеза адаптивных систем управления космических объектов", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Диссертационная работа Кирилла Андреевича Богданова посвящена разработке и тестированию нового численного алгоритма модального синтеза адаптивных систем управления космическими аппаратами (КА). В работе приведено подробное описание алгоритма и его сравнение с существующими аналогами, также приведена верификация алгоритма на примере решения задач из области управления ориентацией крупногабаритных КА.

Актуальность темы. Разработка численных и аналитических алгоритмов модального синтеза multi-input multi-output (MIMO) систем управления является актуальным направлением прикладной теории автоматического управления. Особенно актуальной разработка алгоритмов модального синтеза является для современной ракетно-космической отрасли, в связи с появлением крупногабаритных КА (таких как МКС), спутниковых группировок и формаций, разработкой концептуально новых способов управления ориентацией КА, не требующих расхода рабочего тела. Все вышеупомянутые факторы ведут к росту размерности исследуемого объекта управления в пространстве состояний, что в свою очередь усложняет процесс разработки системы управления.

Модальный синтез – довольно универсальный способ разработки системы управления для линеаризованного многомерного объекта. Во-первых, модальный подход позволяет не просто обеспечить устойчивость объекту управления, но и придать его управляемому движению наперед заданные характеристики, которые определяются расположением корней эталонного полинома. Во-вторых, модальный подход позволяет отдельно рассматривать синтез системы управления и отдельно рассматривать синтез наблюдателя, который вводится в контур управления в

случае, если не все переменные состояния объекта измеряются напрямую. Это дает возможность обеспечить свой характер переходному процессу, отвечающему за поведение переменных состояния и свой характер переходному процессу, отвечающему за сходимости оценок переменных вектора состояния к их реальным значениям.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество алгоритмов, позволяющих осуществлять модальный синтез систем управления. Некоторые из подобных алгоритмов, реализованы в различных программных средах, в том числе и в MATLAB. Для модального синтеза систем с одним входным и одним выходным сигналом (SISO – single-input single-output) существует функция `acker()`, основанная на формуле Аккермана, представляющей собой аналитическое решение задачи модального управления для SISO систем. Для модального синтеза MIMO существует функция `place()`, которая может работать с системами более высокой размерности чем, функция `acker()`, но имеет ряд ограничений на взаимное расположение и кратность корней эталонного полинома. Автором диссертации разработан собственный численный алгоритм, который способен осуществлять модальный синтез как SISO, так и MIMO систем с высокой размерностью вектора состояния, при этом не накладывая ограничений на взаимное расположение собственных чисел замкнутой системы и их кратность. Благодаря итерационной процедуре, на каждой итерации которой численный алгоритм работает с матрицами малой размерности, вычислительная ошибка в процессе вычисления коэффициентов обратной связи почти не накапливается, что позволяет даже при большой размерности обеспечивать высокую точность расположения корней замкнутой системы, а также любое взаимное положение корней.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и одного приложения.

Введение содержит информацию об актуальности работы, теоретической и практической ценности, целях работы и положениях, выносимых на защиту. Также во введении представлен краткий обзор существующих алгоритмов, позволяющих решать задачи модального синтеза и задачи построения оптимальных регуляторов.

Первая глава посвящена описанию разработанного диссертантом численного алгоритма модального синтеза MIMO систем управления. Автор называет разработанный алгоритм «методом последовательного замыкания», акцентируя внимание на том, что в основе работы данного алгоритма лежит

итерационная процедура, на каждой итерации которой находится обратная связь, «передвигающая» одну пару комплексно-сопряженных или действительных корней в желаемое положение на комплексной плоскости. В главе описываются общие положения построения адаптивных систем управления, в которых дается представление о структуре уравнений как самого объекта управления так и его бортовой модели, сам алгоритм модального синтеза и его суть, приводится сравнение представляемого алгоритма и функции `asker()`, основанной на формуле Аккермана, показывающее преимущества разработанного автором алгоритма.

Вторая и третья главы посвящены верификации метода последовательного замыкания на примере решения двух задач из области управления ориентацией крупногабаритных КА.

Во второй главе решается задача поиска и поддержания равновесной ориентации международной космической станции (МКС), используя в качестве исполнительных органов систему силовых гироскопов, установленных на станции. В западной литературе данная задача известна как *momentum management*. Динамика углового движения космической станции в линеаризованной форме рассматривается в пространстве состояний. В силу гироскопической связи каналов крена и рысканья, как два отдельных объекта управления рассматривается ориентация МКС по каналам крена и рысканья и по каналу тангажа. Помимо компонент углов и угловых скоростей в вектор состояния вводятся компоненты кинетического момента и интеграла от кинетического момента силовых гироскопов, а так же компоненты, отвечающие за аэродинамическое возмущение. Для поиска значений матриц обратной связи, как для управления ориентацией по связанным каналам крена и рысканья так и по каналу тангажа используется разработанным автором метод последовательного замыкания. Для подтверждения работоспособности алгоритма в конце второй главы проведено сравнение результатов алгоритма последовательного замыкания и функции `place()`.

Третья глава посвящена решению задачи управления ориентацией КА с большим вращающимся солнечным парусом. КА представляет собой собственно солнечный парус в виде вращающегося пленочного диска, приборный отсек и компенсирующий силовой гироскоп. В роли управляющего воздействия в данной задаче выступают компоненты угловой скорости прецессии ротора силового гироскопа. Вектор состояния КА как объекта управления содержит компоненты угловой скорости аппарата, а также переменные, отвечающие за первый (главный)

тон колебаний пленочного диска солнечного паруса. В силу того, что переменные, отвечающие за колебания пленочного диска, не измеряются напрямую, а частота первого тона известна с невысокой точностью, в контур управления вводится адаптивный наблюдатель, позволяющий в режиме реального времени оценивать значения неизмеряемых переменных вектора состояния и значение неизвестного параметра (частоты первого тона). Поэтому в данной задаче метод последовательного замыкания используется и для синтеза регулятора (поиска матрицы обратной связи) и для синтеза адаптивного наблюдателя (поиска матрицы весовых коэффициентов, обеспечивающей сходимость неизмеряемых переменных и неизвестного параметра к их реальным значениям).

Заключение содержит основные выводы и анализ результатов. Приложение 1 содержит список работ, входящих в перечень ВАК.

Научная новизна. В диссертационной работе автором получены следующие обладающие новизной результаты:

Разработан численный алгоритм модального синтеза. Данный алгоритм может работать как с SISO так и с MIMO системами и способен осуществлять как поиск матрицы обратной связи для построения регулятора так и поиск матрицы весовых коэффициентов для построения наблюдателя. Алгоритм – итерационный, на каждой итерации осуществляется поиск «элементарной» матрицы обратной связи, которая отвечает за перенос одной пары собственных чисел незамкнутой системы в желаемое положение. Искомая матрица обратной связи – сумма «элементарных» матриц, найденных на каждой итерации.

Для обеспечения выполнения в замкнутой системе корневых критериев качества, таких как степень устойчивости и степень колебательности представлен новый тип полиномов – Обобщенный полином Баттерворта. Корни данного полинома лежат на дуге окружности заданного диаметра в левой полуплоскости комплексной плоскости симметрично действительной оси, при этом величина дуги также регулируется. При размере дуги в 180° - данный полином становится классическим полиномом Баттерворта. Варьируя размер дуги от 0 до 180° можно регулировать значения корневых критериев качества, что впоследствии обеспечит заданный характер переходному процессу в замкнутой системе.

Проведена верификация алгоритма на примере двух задач по управлению ориентацией крупногабаритных КА без расхода рабочего тела. Первая задача –

построение закона управления угловым движением МКС с использованием инерционных исполнительных органов. Вторая задача – построение адаптивного закона управления ориентацией космической платформы с большим солнечным парусом. Как в первой, так и во второй задаче при модальном синтезе закона управления в качестве эталонного полинома был выбран обобщенный полином Баттерворта.

Практическая значимость. Разработанный автором алгоритм модального синтеза, основанный на итерационной процедуре последовательного замыкания мод, может использоваться для решения широкого спектра задач, касающихся построения законов управления, в том числе адаптивных законов управления объектами с высокой размерностью вектора состояния. В качестве подобных объектов могут выступать как крупногабаритные КА и космические станции, так и формации и группировки КА.

Ряд результатов, полученных в ходе написания диссертационной работы, включены в лекционные курсы «Динамическая фильтрация» и «Управление крупногабаритными космическими конструкциями», которые читаются студентам старших курсов МФТИ на базовой кафедре «Аэрофизическая механика и управление движением».

Автором опубликовано 12 научных работ по теме диссертации. Они явились результатом исследований и разработок, выполненных лично автором или в соавторстве или при его непосредственном участии.

Выводы и замечания. К работе имеются также пожелания и незначительные замечания:

- В диссертации предлагается новый итерационный метод вычисления коэффициентов обратной связи, на каждой итерации которого одна пара собственных чисел незамкнутой системы «передвигается» в желаемое положение согласно расположению корней эталонного полинома. При этом не приведено указаний, в каком порядке осуществлять этот перенос и какие пары корней куда «переносить», чтобы оптимизировать значения коэффициентов обратной связи.
- Слабо обоснована такая высокая размерность вектора состояния во второй главе. Не понятно введение в вектор состояния МКС

компонент, отвечающих за аэродинамику и за интеграл от кинетического момента силовых гороскопов.

- В задачах, описанных во второй и в третьей главе, в качестве эталонного полинома выбран представленный в диссертации обобщенный полином Баттерворта. При этом ни как не объясняется выбор размера дуги, на которой располагаются корни эталонного полинома.

Заключение. Отмеченные недостатки в целом не уменьшают достоинства работы.

Диссертация Богданова К.А. является самостоятельной завершенной работой, выполненной на высоком научном уровне с применением современных методов научных исследований. В ней изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение в области систем управления движением космических аппаратов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и разработке систем управления движением космических аппаратов различного назначения.

Автореферат содержит основные научные результаты диссертации и соответствует ее содержанию.

Представленная диссертационная работа удовлетворяет критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней (п.9-14), утверждённым Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор, Богданов Кирилл Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – "Теоретическая механика".

Доцент кафедры общих проблем управления,
механико-математического факультета
МГУ им М.В.Ломоносова, к.ф.-м.н 01.02.01
(Zapletin_m@mail.ru, 8-495-939-56-32)



М.П.Заплетин