

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Кирилла Андреевича Богданова

на тему: Метод последовательного замыкания мод в задачах модального синтеза адаптивных систем управления космических объектов  
по специальности 01.02.01 - Теоретическая механика  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

### 1. Актуальность избранной темы.

Теория модального управления является одним из наиболее универсальных подходов к синтезу систем управления для линеаризованных объектов. Основным достоинством модального подхода является возможность придать замкнутой системе управления заранее заданные свойства, определяемые эталонным характеристическим полиномом. Еще один немаловажный плюс модального управления связан с возможностью создавать системы управления объектами регулирования, позволяющие одновременно оценивать состояние объекта и управлять им, такие системы управления в общепринятой терминологии называются адаптивными. Это особенно актуально, если речь идет о разработке системы управления движением крупногабаритным космическим аппаратом, имеющим параметрическую неопределенность и несколько переменных вектора состояния, которые нельзя измерять напрямую.

Решение задачи модального управления в случае построения адаптивной системы управления сводится, во-первых, к выбору эталонного полинома, расположение которого придаст нужные свойства управляемому движению объекта управления, во-вторых, к поиску значений матриц обратной связи и весовых коэффициентов. На данный момент проблема поиска значений матрицы обратной связи в задаче модального управления изучена достаточно хорошо, и существуют алгоритмы, которые при помощи средств матричного анализа могут вычислять эту матрицу обратной связи. Но в силу ряда вычислительных особенностей, существующие алгоритмы не способны работать с объектами управления большой размерности, более того в ряде алгоритмов на взаимное расположение корней замкнутой системы и их кратность накладываются ограничения. Все это приводит к необходимости разрабатывать новые численные и аналитические алгоритмы решения задач модального синтеза, что делает выбранную тему диссертации актуальной.

### 2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Автором на достаточно высоком научном уровне используются различные подходы и методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций, изучаются и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по теории модального управления и теории адаптивных систем управления динамическими объектами. Список использованной литературы содержит 48 наименований. Выводы и результат, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны.

### 3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Разработанные в диссертации Богданова К. А. методы и алгоритмы являются новыми. Основная новизна работы состоит в следующем:

Предложен алгоритм последовательного замыкания мод, предназначенный для решения задач модального синтеза многосвязных систем большой размерности. Алгоритм представляет собой итерационную процедуру, на каждой итерации которой осуществляется построение матрицы обратной связи, «замыкающей» одну пару собственных чисел. Далее, путем сложения найденных на каждой итерации матриц получается результирующая матрица обратной связи. Принцип последовательного замыкания, а так же расчеты только над полем действительных чисел обеспечивают очень медленный рост вычислительной ошибки с ростом размерности вектора состояния, что позволяет осуществлять модальный синтез



систем управления большой размерности.

Представлен новый класс полиномов – обобщенные полиномы Баттерворта, который получается из классического полинома Баттерворта путем введения параметра, отвечающего за угловой размер дуги на комплексной плоскости, на которой равномерно располагаются корни. Регулирование размера этой дуги позволяет обеспечить необходимые значения корневых критериев качества, таких как степень устойчивости и степень колебательности.

Алгоритм последовательного замыкания используется при решении двух задач из области управления ориентацией крупногабаритных космических аппаратов. В диссертации решена задача построения закона управления ориентацией международной космической станции, а также задача синтеза адаптивного закона управления космической платформы с вращающимся солнечным парусом.

Результаты, представленные в диссертационной работе, опубликованы, докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и получили одобрение специалистов.

#### **4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.**

Предложенный алгоритм последовательного замыкания мод может быть применен для синтеза законов управления, в том числе адаптивных законов управления, для многомерных многосвязных динамических систем. Коэффициенты обратной связи, полученные во второй главе при решении задачи построения закона управления ориентацией международной космической станции использовались в алгоритмах, интегрированных в наземный комплекс отладки бортового программного обеспечения для эмулирования системы управления американским сегментом станции.

Основные результаты, полученные в диссертации, включены в лекционные курсы "Динамическая фильтрация" и "Управление крупногабаритными космическими конструкциями", читаемые студентам Московского физико-технического института (МФТИ) на базовой кафедре "Аэрофизическая механика и управление движением" ФАКИ МФТИ.

#### **5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Алгоритм последовательного замыкания может использоваться для синтеза линейных регуляторов для динамических систем большой размерности, в частности при решении задач построения законов управления взаимным положением космических аппаратов в спутниковой формации, при синтезе адаптивных систем управления ориентацией больших космических конструкций с учетом упругости их элементов. Адаптивный алгоритм управления угловым положением космического аппарата с вращающимся солнечным парусом дает возможность управлять аппаратом, имеющим параметрическую неопределенность, без расхода рабочего тела.

#### **6. Оценка содержания диссертации, ее завершенности.**

В диссертации К. А. Богданова рассматриваются проблемы построения обратной связи в задачах модального синтеза систем управления ориентацией космическими аппаратами, проблемы выбора эталонного полинома для задачи модального управления. Диссертация имеет теоретическую и практическую часть. Теоретическая часть посвящена описанию разработанного автором метода последовательного замыкания – способа решения задачи модального синтеза, практическая часть посвящена решению задач управления движением космического аппарата с использованием разработанного метода.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении описываются сценарии применения метода модального управления в современной ракетно-космической технике, существующие алгоритмы решения задачи модального управления и их недостатки, которые подчеркивают актуальность темы диссертации. Первая глава является теоретической, где описывается разработанный автором алгоритм последовательного замыкания. Подробно расписаны и обоснованы все математические матричные процедуры, входящие в основу разработанного алгоритма. Показано преимущество в точности расстановки корней замкнутой системы при помощи



предлагаемого алгоритма и при помощи функции `acker()`, реализованной в среде MATLAB.

Вторая глава посвящена решению задачи выведения и удержания Международной космической станции в положении динамического равновесия. Разработанный алгоритм последовательного замыкания используется для поиска коэффициентов матриц обратной связи, обеспечивающих угловому движению станции по гироскопически связанным каналам крена и рысканья и по каналу тангажа заданные свойства. Для поддержания более точной ориентации станции в вектор состояния вводятся компоненты, отвечающие за аэродинамику, что значительно расширяет вектор состояния, что усложняет процедуру поиска коэффициентов матриц обратной связи. Данный факт делает особенно актуальным использование алгоритма последовательного замыкания в этой задаче. В главе осуществляется вывод линеаризованной математической модели углового движения Международной космической станции и приводится анализ некоторых существующих полиномов на корневые критерии качества. На основе данных критериев качества выводится новый класс полиномов. Описывается процедура модального синтеза закона управления ориентацией МКС с использованием алгоритма последовательного замыкания, приводятся результаты математического моделирования. Проведенное сравнение алгоритма последовательного замыкания и функции `place` на примере решения задачи описываемой в данной главе показывает, что алгоритм, предложенный автором, намного точнее расставляет корни полинома и не имеет ограничений на взаимное расположение корней.

В третьей главе решается задача построения адаптивного закона управления космической платформой с вращающимся солнечным парусом. Приведено описание конструкции и рассматриваются принципы управления ориентацией космической платформы. Строится линеаризованная модель углового движения космической платформы в дискретном пространстве состояний, представлена также структура бортовой модели объекта управления. Приводятся результаты применения алгоритма последовательного замыкания – значения матриц обратной связи и весовых коэффициентов и результаты математического моделирования. В заключении приведены выводы и анализ результатов диссертации. В приложении содержится список работ автора, входящих в перечень ВАК.

#### **7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.**

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить полноту и законченность выполненной работы. Однако работа обладает некоторыми недостатками:

1. В третьей главе автор описывает адаптивный алгоритм управления ориентацией космической платформы с солнечным парусом, а целью адаптации является оценка неизвестного значения жесткости центральной вставки пленочного диска солнечного паруса. При этом в главе приведено аналитическое выражение, для нахождения этой самой жесткости. Таким образом, становится непонятно, зачем оценивать то, что считается известным.

2. Во второй и третьей главах, не указано ограничение на управляющее воздействие. В теории, корни эталонного полинома можно разместить на комплексной плоскости в любом месте, обеспечивая любой характер переходного процесса, но на практике какой идеальной не была бы обратная связь, реализация будет упираться в предельное значение величины управляющего воздействия, создаваемого исполнительными органами.

3. В работе присутствует ряд опечаток, некоторые рисунки в автореферате слишком мелко напечатаны.

Однако приведенные недостатки не снижают в целом хорошего представления о диссертации, не опровергают ее основных положений и выводов. Диссертация написана понятным языком и прекрасно проиллюстрирована. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

#### **8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Таким образом, диссертация Богданова К. А. является научно-квалификационной

работой, в которой представлено законченное решение научно-технической задачи в области разработки адаптивных алгоритмов управления ориентацией крупногабаритных космических аппаратов. Предложенный автором алгоритм последовательного замыкания вносит значительный научный вклад в области прикладной теории управления, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Богданов Кирилл Андреевич заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.02.01 – теоретическая механика.

Ведущий научный сотрудник  
доктор технических наук,



В.М. Глумов

Глумов Виктор Михайлович, доктор технических наук, 05.13.01  
ведущий научный сотрудник лаборатории № 8  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
адрес: 117997, Москва, Профсоюзная ул. 65.  
E-mail: [vglum@ipu.ru](mailto:vglum@ipu.ru) ; тел. (495) 334-87-79 .



25.04.2019