

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМех РАН)

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735
ИНН/КПП 7729138338/772901001

24092019 № 1004/а-21711-322

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

И.О. ДИРЕКТОРА ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ
МЕХАНИКИ им. А.Ю. Ишлинского
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

д.т.н. Карев В.И.



2019 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Богданова Кирилла Андреевича
«Метод последовательного замыкания мод в задачах модального
синтеза адаптивных систем управления движением космических аппаратов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Диссертация К.А. Богданова посвящена разработке вычислительно эффективных алгоритмов адаптивного управления космическими аппаратами в условиях неполной информации о параметрах и фазовом состоянии объекта управления, а также о параметрах и физическом состоянии измерительной аппаратуры и собственно системы управления. Неполнота информации может быть вызвана, например, изменением инерционных параметров аппарата в процессе его эксплуатации, наличием неконтролируемых помех в канале измерения, внешними физическими воздействиями и другими причинами. Под вычислительной эффективностью понимается обеспечение желаемого эталонного поведения космического аппарата с достаточной точностью при сравнительно небольшой вычислительной сложности, позволяющей управлять системой в реальном времени. Судя по тексту диссертации, автор в основном ориентировался на решение задач стабилизации космических аппаратов в окрестности желаемого состояния, что позволило ему ограничиваться линеаризованными моделями.

Тема диссертации актуальна в связи с разработкой космических аппаратов, миссия которых требует обеспечения высокой точности ориентации на орбите. Для эффективного управления такими аппаратами надо иметь адекватную бортовую модель с параметрами, подстраиваемыми на основе текущей информации, поступающей с измерительной аппаратуры, и соответствующий быстродействующий алгоритм адаптивного управления. Построения такого алгоритма – главная цель диссертационной работы К.А. Богданова.

Основной материал диссертации изложен в трех главах.

В первой главе изложен разработанный автором алгоритм адаптивного управления динамической системой, описываемой произвольной конечной совокупностью обыкновенных дифференциальных или конечно-разностных уравнений и управляемых по принципу обратной связи на основе показаний измерительной аппаратуры. Автором предложена схема адаптивного управления рассматриваемой системой на основе линеаризованной модели. Матрицы обратной связи этого алгоритма в контурах управления и адаптации подлежат определению. Матрицы обратной связи предлагается выбирать так, чтобы корни характеристического полинома системы, замкнутой обратной связью, имели заданное расположение на комплексной плоскости. Для решения этой задачи автором разработан оригинальный подход, названный им методом последовательного замыкания мод движения объекта управления. Идея этого метода состоит в поэтапном построении матрицы обратной связи; на каждом этапе в требуемое положение приводится одна пара характеристических чисел (если характеристический полином имеет нечетный порядок, на последнем этапе в заданное положение приводится непарный действительный корень характеристического полинома). Предложенный алгоритм позволяет одновременно рассчитывать как коэффициенты матриц обратной связи регуляторов, так и компоненты матриц весовых коэффициентов адаптивных наблюдателей для динамических систем больших размерностей, имеющих параметрическую неопределенность. На каждом этапе работы алгоритма производятся операции с матричными блоками размера, не более, чем 2×2 , что позволяет существенным образом снизить накопление вычислительных ошибок,

связанных с размерностью системы уравнений модели управляемой системы. Автор сравнивает свой метод с известным методом Аккермана для решения той же задачи и экспериментально обнаруживает более высокую точность своего метода при синтезе системы управления по критерию расположений корней характеристического полинома.

Во второй главе метод последовательного замыкания применяется для синтеза алгоритма управления ориентацией Международной космической станции (МКС) на орбите с помощью силовых гироскопов. Цель управления – приведение МКС в требуемую ориентацию относительно орбитальной системы координат и стабилизация ее в этом положении. В качестве эталонного характеристического полинома замкнутой системы берется модифицированный полином Баттерворта (Butterworth). Корни классического полинома Баттерворта расположены в левой комплексной полуплоскости на окружности заданного радиуса. Недостатком этого полинома как эталонного для синтеза систем автоматического управления является то, что с увеличением порядка полинома его корни приближаются к мнимой оси, то есть замкнутая управление, построенным на основе такого полинома, система высокого порядка имеет малую степень устойчивости и высокую колебательность. Предложенная диссертантом модификация полинома Баттерворта сохраняет расположение его корней на окружности, но ограничивает их сектором с заданным углом раствора. Эта модификация позволяет решать задачу модального синтеза систем автоматического управления линейными системами с учетом ограничений на степень устойчивости и колебательность. Для математической модели МКС проводится численный расчет матрицы обратной связи системы управления с помощью метода последовательного замыкания мод. Демонстрируется получившееся в результате расчета расположение корней характеристического полинома синтезированной системы, приводятся графики переходных процессы по каналам крена, рысканья и тангажа. Для сравнения тот же расчет проводится с помощью стандартной функции `place`, реализованной в программной среде Matlab. Численный эксперимент показывает лучшее совпадение корней характеристического полинома

замкнутой системы с корнями эталонного полинома при применении метода последовательного замыкания мод.

В главе 3 исследование, аналогичное исследованию, описанному в главе 2, проведено с целью синтеза адаптивного алгоритма управления ориентацией космического аппарата с вращающимся солнечным парусом.

Диссертация К.А. Богданова представляет завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую проблемам модального синтеза законов адаптивного управления многосвязными динамическими системами высокого порядка применительно к управлению космическими аппаратами. Ключевым результатом диссертации является метод последовательного замыкания мод для численного синтеза матрицы обратной связи системы управления, обеспечивающей желаемое расположение корней характеристического полинома замкнутой динамической системы на комплексной плоскости. Этот метод впервые предложен и детально разработан автором диссертации. Его достоинствами являются высокая точность в размещении корней характеристического полинома замкнутой системы, а также отсутствие ограничений на их кратность. Данный метод представляет существенный вклад в теорию управления линейными многосвязными динамическими системами и позволяет строить вычислительные алгоритмы, превосходящие по точности и вычислительной экономности известные подходы, предназначенные для решения той же задачи. Применение метода последовательного замыкания мод позволяет повысить быстродействие и точность функционирования адаптивных систем управления, формирующих управляющие команды с использованием бортовых математических моделей объектов управления, что в частности важно для космических аппаратов. В диссертации эффективность предложенной методики продемонстрирована на моделях двух типов космических аппаратов. Оригинальной и полезной представляется модификация диссертантом полиномов Баттерворта, позволяющая учитывать ограничения на степень устойчивости и колебательность динамической системы, замкнутой синтезируемым законом управления. Все выносимые на защиту результаты являются новыми и получены лично диссертантом. Новизна подтверждается публикацией в рецензируемых профильных

научных журналах. Результаты диссертационной работы достоверны. Достоверность гарантирована грамотным применением адекватного математического аппарата для вывода базовых формул и их обоснования, а также проведением численных расчетов и сравнением результатов вычислений методом последовательного замыкания мод с результатами вычислений с помощью других алгоритмов. Результаты диссертации с достаточной полнотой опубликованы в научных журналах, в том числе рекомендованных ВАК для публикации статей соискателями ученой степени доктора или кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика. Они также докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах.

С результатами диссертации целесообразно ознакомиться специалистам (исследователям и инженерам) в области управления многосвязными динамическими системами высокого порядка, в частности космическими аппаратами. Результаты диссертации могут быть использованы в научных институтах и вузах, в которых ведутся исследования по проблемам управления многосвязными динамическими системами, в частности в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Институте космических исследований РАН, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Московском физико-техническом институте, Ракетно-космической корпорации «Энергия».

Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Диссертация свидетельствует о высокой квалификации ее автора в области теоретической механики и теории управления, умении ставить и решать актуальные задачи механики управляемых систем, представляющие научный интерес и имеющие перспективы инженерных приложений. К.А. Богданов профессионально владеет современными аналитическими и численными методами исследования и синтеза систем адаптивного управления динамическими системами, описываемыми обыкновенными дифференциальными или разностными уравнениями высокого порядка.

По диссертации имеются замечания.

1. Сравнивая метод последовательного замыкания мод с известными методами синтеза матриц обратной связи линейных управляемых систем, обеспечивающих заданное расположение на комплексной плоскости корней характеристического полинома замкнутой системы, автор использует коммерческие пакеты программ, в которых эти методы реализованы. По существу диссертант сравнивает программы, реализующие соответствующие методы. Может оказаться, что коммерческие программы, реализующие методы, с которыми сравнивается метод последовательного замыкания мод, реализованы не лучшим образом и не позволяют объективно сравнить сами методы по своим достоинствам. Почему автор исключает такую возможность, в диссертации не написано.
2. Имеются погрешности в оформлении текста: нечеткие формулировки, использование одних и тех же букв для обозначения различных величин, грамматические опечатки.

Сделанные замечания не снижают высокой оценки диссертации как научно-квалификационной работы.

Диссертация «Метод последовательного замыкания мод в задачах модального синтеза адаптивных систем управления движением космических аппаратов» соответствует паспорту специальности 01.02.01–Теоретическая механика. Работа полностью отвечает 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 наук, а ее автор, Богданов Кирилл Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 - Теоретическая механика.

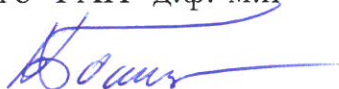
Результаты диссертации и отзыв на нее были обсуждены и одобрены на заседании семинара ИПМех РАН по теории управления и динамики систем под руководством академика РАН Ф.Л. Черноусько.

Отзыв составлен главным научным сотрудником Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН доктором физико-математических наук членом-корреспондентом РАН Болотником Николаем Николаевичем.

Главный научный сотрудник

ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН д.ф.-м.н

член-корреспондент РАН



Болотник Н. Н.

119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1, тел. +7(495)434-35-01

E-mail:bolotnik@ipmnet.ru

Подпись Болотника Н.Н. заверяю:

Ученый секретарь

ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН к.ф.-м.н



Котов М.А.