

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента  
Голубева Алексея Евгеньевича

на диссертацию, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Павловой Евгении Александровны на тему:  
**«Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках»**  
по специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС), исследования по которой были начаты в начале 50-х годов прошлого столетия, является одной из центральных в науке и технике. Решение данной проблемы откроет новый, безопасный, практически неисчерпаемый источник энергии от синтеза ядер легких элементов. В этой области лидерами являются токамаки – тороидальные камеры с магнитными катушками. Токамаки прошли в своей эволюции путь от круглых в поперечном сечении токамаков с медными кожухами для демпфирования горизонтального движения плазмы и железными сердечниками до современных вытянутых по вертикали токамаков со значительно большим газокинетическим давлением и воздушными центральными соленоидами без медных кожухов. В настоящее время в мире действует ряд вертикально вытянутых токамаков, на которых изучается физика плазмы и проводятся исследования систем магнитного и кинетического управления плазмой. В РФ имеется действующий сферический токамак Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург) и токамак Т15-МД (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва). Однако в установках данного типа существуют проблемы, связанные с вертикальной неустойчивостью плазмы и необходимостью одновременного надёжного прецизионного управления многими параметрами, в первую очередь, параметрами безопасности – зазорами между первой стенкой и сепаратором. Такая ситуация определяет актуальность диссертации.

Диссертация Павловой Е.А. посвящена анализу, синтезу и математическому моделированию многосвязных и многоконтурных робастных систем управления положением, током и формой плазмы с обратной связью в токамаках Т-15МД и Глобус-М/М2. В случае робастных систем регулятор обратной связи имеет постоянные структуру и параметры, но они выбираются так, чтобы в замкнутой системе обеспечить устойчивость и заданные показатели качества в некоторой области неопределенности структуры и параметров объекта управления. Результаты работы и разработанные системы управления в программно-вычислительной среде MATLAB/Simulink для токамаков Т-15МД и Глобус-М/М2, и могут быть адаптированы и применены к любому другому современному токамаку с вытянутым по вертикали поперечным сечением.

Диссертация Павловой Е.А. общим объемом 146 страниц, содержит 5 таблиц, 70 рисунков, список литературы из 134 наименований и состоит из введения, 4 глав, заключения.

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также изложены методология диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, обсуждены степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе приведен обзор систем магнитного управления положением, формой и током плазмы в токамаках. Показано, что магнитное управление плазмой является ключевым звеном, обеспечивающим работоспособность токамаков. Особо отмечено, что отсутствуют стандарты для разработки эффективной и надежной структуры системы магнитного управления плазмой.

Во второй главе приведены результаты разработки систем стабилизации неустойчивого вертикального положения плазмы в токамаке Т-15МД, анализу влияния типа исполнительного устройства на характеристики системы управления вертикальным положением плазмы в токамаке Т-15МД, определению основных характеристик систем управления (требуемой мощности исполнительного устройства, запасов рабочей устойчивости и т.д.) и выбору наилучшего регулятора для дальнейшего применения в практике физических экспериментов, в частности на цифровом стенде реального времени Speedgoat Performance.

Третья глава посвящена разработке двухконтурной системы стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы для сферического токамака Глобус-М/М2 и ее тестированию на нелинейном плазмофизическом коде DINA. При этом в качестве исполнительных устройств применялись инверторы тока. При синтезе новой системы управления использовалась линейная модель плазмы, полученная по экспериментальным данным,  $H_\infty$ -регуляторы, синтезированные для линейных моделей и обеспечивающие работоспособность замкнутой системы были проверены на нелинейном коде DINA в структурной схеме замкнутой системы управления. Регуляторы применялись в обратной связи в цифровом виде, при этом время дискретизации составляло 10 мкс.

В четвертой главе показано, что предварительный анализ структуры системы и обоснованный выбор конфигурации системы, позволяет применять для управления током плазмы простые ПИД-регуляторы в обратной связи. Сравнительный анализ двух систем: с  $H_\infty$ -регулятором в обратной связи и автоматически настроенной системы с развязкой каналов (ПИД регуляторами и развязывающей матрицей в обратной связи), показал, что первый метод позволяет достичь более высоких запасов рабочей устойчивости, а второй метод дает возможность улучшить качество управления. При этом развязка каналов позволяет последовательно

настраивать регуляторы в обратной связи по каждому из зазоров между сепаратором и первой стенкой токамака при управлении формой плазмы.

Научная новизна диссертационной работы Павловой Е.А. включает ряд положений, в частности, систему управления с модальным регулятором с одним настроенным параметром для прототипа токамака Т-15МД, а также систему с регулятором с двойной связью каналов управления для токамака Глобус М/М2 и др.

Результаты диссертационного исследования имеют научную и практическую ценность, позволяют выбрать наиболее эффективные системы управления, применение которых в реальном физическом эксперименте позволит подавить возмущение плазменного разряда типа малый срыв. Также подобные исследования позволяют еще на этапе конструирования токамаков проектировать системы управления с учетом конструктивных особенностей токамаков, проводить расчеты требуемой мощности управления, исследовать различные виды исполнительных устройств и т.д. Это дает возможность делать обоснованный выбор источников питания в качестве исполнительных устройств, алгоритмов управления и т.д., что должно обеспечить надежную эксплуатации физических установок типа токамак и позволяет сократить будущие расходы.

Достоверность результатов обеспечивается за счет применения при анализе и синтезе систем управления плазмой в токамаках строгого математического аппарата теоретических методов автоматического управления. Обоснованность результатов определяется актуальными постановками задач на основе знания методов и систем магнитного управления плазмой в токамаках, а также адекватным выбором и применением эффективных методов и подходов теории управления.

Результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 5 статей в международных журналах: «Fusion Engineering and Design» (издательство Elsevier), Mathematics (издательство MDPI), регистрируемых в библиографической базе данных Web of Science (WoS, Q1), а также «Physics of Atomic Nuclei» (Q3) и «Advances in Systems Science and Applications» (Q2), регистрируемых в библиографической базе данных Scopus, остальные в трудах международных и российских конференций.

Диссертация представляет собой завешенное научное исследование и соответствует паспорту специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Для моделирования систем управления использовался лишь один плазмо-физический код ДИНА. Однако, коды, описывающие эволюцию равновесия плазмы, основываются на отличающихся физических предположениях и численных методах. Поэтому и результаты расчетов могут отличаться. Обоснование

предложенных новых методов может быть усилено моделированием с использованием нескольких кодов.

2. На Рис. 5 автореферата желательно увеличить числовые обозначения по осям координат.

Вышеприведенные недостатки не являются существенными и не снижают общего высокого уровня работы, представляющей как научный, так и практический интерес. В работе представлены результаты оригинальных исследований, которые являются новыми, защищаемые положения подкреплены изложенным в работе материалом и логично вытекают из представленного материала, выводы представляются разумными и обоснованными.

Диссертационная работа «Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках» соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а её автор Павлова Евгения Александровна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБУ науки Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
лаборатория Механики систем,  
старший научный сотрудник

А.Е. Голубев

Контактные данные:

Адрес места работы: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Тел.: 8 495 434-20-10

E-mail: alexgmmd@bmstu.ru

Подпись А.Е. Голубева удостоверяю