

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Боголюбова Александра Николаевича 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

Диссертационное исследование Павловой Е.А. посвящено рассмотрению комплекса вопросов, связанных с применением современных аналитических подходов и вычислительных алгоритмов для решения важной практической проблемы – высокоэффективного управления положением, током и формой плазмы в токамаках (магнитное управление плазмой в токамаках).

Актуальность темы диссертационного исследования определяется тем обстоятельством, что существующие в настоящее время подходы к синтезу законов управления плазмой не в полной мере удовлетворяют потребностям теории и практики. В частности, на сегодняшний день требуют дальнейшего развития методы решения задач обеспечения робастной устойчивости и качества замкнутых систем управления плазмой при постоянно меняющихся внешних условиях. В связи с этим автор ставит своей целью рассмотрение таких задач, как стабилизация вертикального положения плазмы, управление током и формой плазмы, подавление реакции на малый срыв. При решении данных задач рассматривается квазистационарная фаза плазменного разряда.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность представленных исследований, сформулирована цель и задачи работы, показана ее научная новизна и

практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор систем магнитного управления положением, формой и током плазмы на современных вытянутых по вертикали токамаках, включая сферические токамаки, показано, что задача разработки эффективной и надежной структуры системы магнитного управления плазмой пока не решена окончательно.

Вторая глава посвящена разработке и моделированию систем управления вертикальным положением плазмы в прототипе токамака Т-15МД (линейной модели плазмы, полученной ранее идентификацией плазмофизического кода DINA). Проведено численное сравнительное исследование систем управления неустойчивым вертикальным положением плазмы с двумя типами исполнительных устройств – многофазным тиристорным выпрямителем и транзисторным инвертором напряжения. Практическим результатом данной главы является моделирование разработанной методом линейных матричных неравенств цифровой системы управления с расположением полюсов в области, лежащей в единичном круге, которая соответствует области  $D_{\alpha,r,\vartheta}$  для неустойчивого вертикального положения плазмы токамака Т-15МД на цифровом стенде реального времени. Система обеспечивает стабилизацию вертикального положения плазмы для ее неустойчивой модели при действии возмущения типа «малый срыв». Настроенный цифровой регулятор может быть применен в обратной связи системы управления непосредственно на токамаке Т-15МД.

Третья глава посвящена решению задачи идентификации каскадов управления током плазмы и зазорами для получения имитационной редуцированной модели и последующего синтеза регуляторов управления положением, током и формой плазмы с применением их на исходной полной модели. Данный метод позволяет отработать процесс синтеза регуляторов в реальных физических экспериментах. Разработка двухконтурной цифровой системы стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы

для сферического токамака Глобус-М/М2 и ее тестирование на нелинейном плазмо-физическом коде DINA является еще одним результатом, рассмотренным в данной главе. Данная система может рассматриваться как альтернатива стандартной аналоговой схеме с пропорциональным интегрально-дифференцирующим (ПИД) законом управления, функционирующей на токамаке в настоящее время при управлении положением плазмы и токами в обмотках полоидального поля.

В четвертой главе показано, что предварительный анализ структуры системы и обоснованный выбор конфигурации системы для сферического токамака Глобус-М/М2, позволяет осуществлять развязку каналов управления и применять для управления током и формой плазмы простые ПИД-регуляторы в обратной связи. Сравнительный анализ двух систем: с  $H_\infty$  регулятором в обратной связи, синтезированным методом взаимно-простой факторизации/loop sharing, и автоматически настроенной системы с двойной развязкой каналов, включающей ПИД регуляторы и развязывающую матрицу в обратной связи, показал, что ошибка слежения за зазорами во второй системе меньше, чем в первой, однако при этом первая система обладает большим запасом робастной устойчивости.

Для решения поставленных задач автор мотивированно использует современные методы теории модального управления, линейных матричных неравенств и методы  $H_\infty$ -теории оптимизации. В результате эффективного использования этих методов предложены новые системы управления для токамаков Т-15МД и Глобус-М/М2. Для токамака Т-15МД и исполнительного устройства в виде тиристорного многофазного выпрямителя разработан новый модальный регулятор по состоянию с совмещением полюсов замкнутой системы для стабилизации вертикального положения плазмы с достаточно большими запасами устойчивости по амплитуде и по фазе трех контуров управления. На линейных моделях плазмы для токамака Глобус-М/М2 методами  $H_\infty$ -оптимизации синтезирована робастная система управления формой плазмы с двойной развязкой каналов управления, что дало

возможность минимизировать связь между каналами управления и получить приемлемые качество и робастный запас устойчивости замкнутой системы.

Рассматриваемые в работе объекты управления – токамак Т-15МД с вытянутым в вертикальном направлении поперечным сечением в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва) – находится на стадии пуска, а сферический токамак Глобус-М/М2 – является действующей установкой. Полученные результаты имеют научную и практическую значимость для стадий проектирования и ввода в эксплуатацию реальных систем магнитного управления плазмой, так как дают возможность проведения сравнительного анализа различных вариантов синтеза и достигнутого качества работы данных систем. 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 эксплуатацию физических установок типа токамак и позволяет сократить будущие расходы.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается строгостью используемого математического аппарата анализа и синтеза систем управления и подтверждается результатами математического моделирования исследуемых систем автоматического управления в компьютерной среде MATLAB/Simulink, на нелинейном плазмо-физическом коде DINA и цифровом стенде реального времени SPEEDGOAT.

Результаты, выносимые на защиту, прошли необходимую апробацию при обсуждениях на международных и национальных семинарах и конференциях, также их достоверность подтверждается публикациями в рецензируемых 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)).

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. Не приведено сравнения выбранных методов синтеза систем управления посредством метода линейных матричных неравенств и метода  $H_\infty$ -оптимизации с другими известными методами, например, с методом прогнозирующей модели.

2. В диссертации разработанные системы управления не внедрены в физический эксперимент на токамаках Т-15МД и Глобус-М2.

Данные замечания не снижают высокого уровня диссертационной работы и могут рассматриваться скорее как рекомендации по реализации и развитию тематики данной работы. Работа выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном уровне. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что представленная диссертация «Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в частности критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а ее автор, Павлова Евгения Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 05.13.18. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»), профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный

университет имени М.В. Ломоносова», заведующий отделением прикладной математики физического факультета Боголюбов Александр Николаевич.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Тел.: +7 (495) 939-10-00

Электронная почта: [bogan7@yandex.ru](mailto:bogan7@yandex.ru)

Подпись А.Н.Боголюбова удостоверяю:

И.о. декана физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова профессор Белокуров В.В.