

**ОТЗЫВ официального оппонента  
Романникова Александра Николаевича  
на диссертацию, представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук Коренева Павла Сергеевича  
на тему: «Динамические модели для магнитного управления формой и  
положением плазмы в токамаках Глобус-М2 и ИГНИТОР»  
по специальности 1.3.9. Физика плазмы**

Диссертационная работа П.С. Коренева посвящена важной проблеме разработки и анализа динамических моделей для магнитного управления формой, положением и током плазмы в токамаках. Работа охватывает широкий спектр задач, включая моделирование динамики положения, формы и тока плазмы в токамаке, определение формы и положения плазменного шнура по сигналам диагностики, а также анализ построенных моделей плазмы для оптимизации полоидальной системы токамака. В работе представлены линейные и нелинейные модели плазмы для разработки и моделирования систем управления плазмой, а также алгоритм FCDI (Flux and Current Distribution Identification) для восстановления формы и положения плазмы на основе магнитных измерений в реальном времени. Представленные модели и алгоритмы были разработаны для применения на токамаке Глобус-М2, но могут быть использованы и на других токамаках.

**Актуальность темы** диссертационного исследования обусловлена необходимостью создания эффективных технологий для управляемого термоядерного синтеза, являющегося ключевой целью современного научно-технического прогресса. Токамаки, как наиболее перспективные установки для термоядерного синтеза, требуют разработки эффективных методов управления плазмой для обеспечения стабильности и устойчивости плазменных разрядов, что является одной из главных задач в области термоядерной физики.

**Содержание диссертации.** В первой главе поставлены задачи магнитного управления положением, током и формой плазмы в токамаках и

приведен обзор используемых в мире алгоритмов восстановления равновесия и моделей плазмы в системах магнитного управления плазмой в токамаках. Во второй главе подробно описан алгоритм FCDI, разработанный автором для восстановления равновесия плазмы на токамаке Глобус-М2 в реальном времени, и представлен метод токовых мод камеры для ускорения работы алгоритма. Третья глава посвящена построению динамических моделей плазмы для управления ее положением и формой. Описаны линейные модели и более сложная нелинейная магнитная эволюционная модель плазмы, позволяющая более точно моделировать работу систем управления при изменении характеристик плазмы по ходу разряда. В четвертой главе проводится анализ линейных моделей плазмы для оптимизации расположения катушек в проекте токамака ИГНИТОР (этот проект в настоящее время приостановлен), позволяющей значительно увеличить область управляемости вертикальным положением плазмы и сократить величину электрического напряжения, необходимого для управления горизонтальным смещением плазмы.

**Научная новизна** работы заключается в следующих достижениях:

- Разработан новый метод моделирования токов в камере токамака, сокращающий количество вычислений при восстановлении равновесия плазмы.
- Разработан алгоритм FCDI, примененный для восстановления равновесия плазмы в реальном времени на токамаке Глобус-М2.
- Разработана нелинейная магнитная эволюционная модель плазмы ТРМЕС, позволяющая моделировать изменение формы и положения плазмы в течение разряда, в том числе и при малых срывах плазмы.
- Новый метод для определения оптимального для управления положением плазмы расположения катушек был применен для

модификации полоидальной системы проектного токамака ИГНИТОР.

**Степень обоснованности и достоверность выносимых на защиту положений и научных выводов, полученных в диссертации,** подтверждается использованием проверенных физических принципов и строгих математических методов, а также согласованностью результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на токамаке Глобус-М2. Моделирование на специализированной машине реального времени показало возможность применения в реальном времени разработанного автором алгоритма восстановления равновесия FCDI. Стоит отметить, что этот алгоритм был внедрен в рабочий процесс на токамаке Глобус-М2 и успешно применяется для обработки результатов эксперимента.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 16 научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных RSCI, Web of Science и Scopus, что свидетельствует о высоком уровне научной работы автора и подтверждает значимость его исследований в научном сообществе. В дополнение к статьям, по результатам работы было зарегистрировано два патента, что также подчеркивает практическую ценность полученных результатов.

#### **Замечания к диссертации.**

1. В 4-й главе показано, что новые катушки HFC и VFC требуют меньших величин электрического напряжения для управления положением плазмы, чем катушки исходного проекта токамака ИГНИТОР, но не показаны изменения в затратах мощности при управлении плазмой, имеющие большее практическое значение.
2. За исключением алгоритма восстановления равновесия, предложенные в работе модели не были проверены в физическом эксперименте.

3. На рис. 2.7 приведены экспериментальные данные для разряда, но не показаны ошибки измерения. К сожалению, для ученых, которые занимаются расчетами, это традиционная ошибка.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.9. «Физика плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Корнев Павел Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. «Физика плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
научный руководитель по плазменным технологиям и управляемому  
термоядерному синтезу АО «Государственный научный центр Российской  
Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных  
исследований»

РОМАННИКОВ Александр Николаевич

Официальный оппонент:

Контактные данные:

тел.: 7(495)8415086, e-mail: romannikov@triniti.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.08 – «Физика Плазмы»

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12.

АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий  
институт инновационных и термоядерных исследований»

Тел.: +7 (495) 841-53-08; e-mail: [liner@triniti.ru](mailto:liner@triniti.ru)

Подпись сотрудника АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

А.Н. Романникова удостоверяю:

Учёный секретарь АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», к.ф.-м.н.

Ежов А. А.