

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию 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»**

Создание термоядерного реактора ITER потребует решения целого ряда задач, среди которых — робастное управление положением и формой плазменного шнура в ходе длительного, до одного часа, разряда для обеспечения оптимальных устойчивых режимов работы установки. В настоящее время для решения этой задачи на действующих токамаках используются устанавливаемые снаружи вакуумной камеры установки сборки полоидальных магнитных катушек, подача импульсов тока или напряжения на которые в ходе разряда позволяет управлять поведением плазменного шнура. Формирование управляющих импульсов сопряжено с восстановлением магнитного равновесия в токамаке и оценке направления и скорости движения плазмы с использованием линейных и нелинейных моделей динамики вещества и данных измерений магнитных зондов. Необходимость стабилизации возмущений положения и формы плазмы на временах меньше либо порядка длительности разряда приводит к жестким ограничениям на быстродействие систем управления положением плазменного шнура. В результате разработка высокопроизводительных алгоритмов обработки и синтеза данных для систем магнитного управления для повышения скорости и надежности стабилизации вертикальных и горизонтальных смещений плазмы оказывается важной составляющей в процессе разработки проекта токамака-реактора.

В диссертации решается задача разработки линейных и нелинейных динамических моделей для управления формой и положением плазменного шнура в токамаках.

Объём диссертации составляет 116 страниц. Содержательная часть работы содержит 4 главы, заключение, список литературы, а также акт о

внедрении алгоритма FCDI. В тексте работы присутствуют 5 таблиц, 32 рисунка. Список литературы содержит ссылки на 86 источников.

В главе 1 представлен обзор современного состояния проблемы управления макроскопической динамикой плазмы с использованием внешней магнитной системы. Представлены как общие универсальные закономерности, определяющие поведение плазмы в токамаках, так и конкретные схемы реализации магнитного управления плазмой, используемые на ряде физических установок.

Глава 2 посвящена анализу процесса восстановления магнитного равновесия в токамаке на основе данных измерений магнитных зондов. Предлагается новый алгоритм FCDI ускоренного восстановления магнитного равновесия в плазме по результатам измерений токов в элементах вакуумной камеры и иных внешних элементах токамака за счёт выделения небольшого числа медленно меняющихся индуктивно не связанных компонент в структуре токов, циркулирующих в стенке установки. Предлагается несколько различных реализаций алгоритма FCDI (FCDI-IT и FCDI-FF), обсуждается точность восстановления магнитного равновесия с использованием каждого из них.

Построение ряда линейных и нелинейных моделей динамики плазмы, использующих для оценки положения и формы плазменного шнура данные реконструкции магнитного равновесия, выполнены в Главе 3. Представлены результаты внедрения моделей управления плазмой на токамаке Глобус-М2. Обсуждается нелинейная модель плазмы ТРМЕС, позволяющая анализировать движение вещества с учётом эволюции магнитного равновесия и использующая в качестве входных параметров данные о магнитном равновесии с предыдущего шага по времени и задаваемые пользователем значения полоидального бета и внутренней индуктивности плазменного шнура.

В Главе 4 обсуждаются результаты оптимизационных расчётов магнитной системы управления положением и формой плазмы на

проектируемом токамаке ИГНИТОР, обеспечивающие требуемые диапазоны изменения зазоров между плазмой и стенкой вакуумной камеры, а также возможностью подавления крупномасштабных возмущений типа срыва.

В заключении собраны основные выводы и рекомендации, полученные диссертантом в ходе исследования.

Научные результаты, представленные в диссертации представляют научную новизну и ценность. Диссертант предложил новый алгоритм восстановления магнитного равновесия на установке — FCDI — для реконструкции магнитного равновесия токамака по результатам измерений магнитных зондов. Суть алгоритма, как уже было отмечено выше, заключается в выделении наиболее медленных компонент в тороидальных токах, текущих в элементах вакуумной камеры токамака, релаксация которых во времени определяет точность восстановления распределения токов внутри плазмы и магнитного равновесия плазменного шнура. Выделение этих компонент позволяет снизить размерность решаемой задачи и повысить быстродействие системы магнитного управления. Данный подход является универсальным и поэтому может быть реализован также и на других установках, использующих магнитные поля для управления поведением плазменного шнура.

Отдельный интерес представляют результаты оптимизационных расчётов магнитной системы для токамака ИГНИТОР. Полученные в данной части исследования результаты могут быть применены при создании и оптимизации магнитных систем других токамаков как в сценариях их штатной работы, так и в режимах с развитием крупномасштабных возмущений плазмы типа срыва.

К несомненным достоинствам представленных в работе результатов нужно отнести также их практическую реализацию и успешную апробацию на действующем токамаке Глобус-М/М2.

Достоверность и обоснованность полученных диссертантом результатов подтверждается успешной валидацией предложенных

диссертантом алгоритмов, моделей управления плазмой и программных средств на токамаке Глобус-М2. Теоретические результаты качественно и количественно согласуются с существующими моделями магнитного управления положением и формой плазменного шнура, применяемыми на других токамаках.

Тематика диссертационной работы соответствует специальности 1.3.9. «Физика плазмы», а именно таким её направлениям, как 1) «Управляемый термоядерный синтез с магнитным и инерциальным удержанием» и 3) «Разработка новых приборов и методов для изучения динамики плазмы.» Текст автореферата диссертации верно отражает содержание самой диссертационной работы.

По содержанию диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. В тексте диссертации предложен новый алгоритм реконструкции магнитного равновесия в токамаке — FCDI. Хотелось бы, чтобы автор сравнил быстродействие и надежность работы предложенного алгоритма с существующими аналогами. В частности, насколько итеративная версия FCDI может быть быстрее в решении задачи восстановления профиля ψ , по сравнению с аналогом (например, кодом EFIT), при выполнении обеих программ на одной и той же вычислительной машине.
2. В Главе 2 отсутствует критерий, по которому для восстановления магнитного равновесия на токамаке Глобус-М2 было использовано именно 9 токовых мод из 56-ти. Иными словами, какое количество токовых мод должен выбрать для работы пользователь программы на базе FCDI?
3. Работоспособность алгоритмов FCDI-IT, FCDI-FF в Главе 2 проверена с использованием данных лишь одного разряда № 43345 токамака Глобус-М2. Почему не были выбраны иные разряды на установке для проверки алгоритмов?

4. На стр. 8 работы указано, что «разработанный магнитный эволюционный код [ТРМЕС] не моделирует излишние для задач магнитного управления процессы переноса в плазме». В то же время, на стр. 83 отмечено, что на втором шаге ТРМЕС «...расчет новых распределений полоидального потока и тороидального тока плазмы, а также формы плазмы, удовлетворяющих уравнению Грэда-Шафранова (11) и заданным пользователем значениям полоидального бета и внутренней индуктивности» - т.е. происходит с использованием параметров, которые должны самосогласованно определяться как раз из решения уравнений переноса плазмы. Задание их пользователем может, в общем случае, содержать неточности, которые могут оказывать непосредственное влияние на результаты расчёта ТРМЕС.
5. В разделе 3.4 указано, что код «ТРМЕС также позволяет моделировать малые срывы плазмы,» однако нигде в Главе 3 не приведено расчёта работы системы магнитного управления разряда, в котором бы происходило подобное событие. По этой причине это утверждение является необоснованным.
6. Валидация ТРМЕС производилась, как и в случае алгоритма FCDI, на данных одного разряда №31648 токамака Глобус-М в двух временных точках, отстоящих друг от друга на 20 мкс (180 и 200 мкс), что существенно меньше продолжительности самого разряда на токамаке. Для проверки работоспособности кода следовало бы, по возможности, выбрать моменты времени, отстоящие друг от друга на большую (например, до 100 мкс) величину.
7. Расчёт оптимальных управляющих катушек для контроля вертикальных и горизонтальных смещений плазмы на токамаке ИГНИТОР, представленный в Главе 4, выполнен в идеальном инженерном случае, когда могут быть изготовлены катушки произвольной, сколь угодно сложной формы (в расчёте катушки располагаются под некоторыми углами к осям R и Z). В то же время

катушки проектируемых систем управления практически всегда располагаются так, что границы их сечения в полоидальной плоскости располагаются параллельно координатным осям. Как могут поменяться результаты, приведённые в Главе 4, если предлагаемые катушки НФС, VFC будут располагаться подобным образом?

Указанные замечания не умаляют значимости полученных диссертантом научных результатов. 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» за разработку алгоритма FCDI реконструкции магнитного равновесия плазмы в токамаке и создание на его основе программ для динамического управления положением и формой плазменного шнура токамаков Глобус-М2 и ИГНИТОР.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики плазмы
Института лазерных и плазменных технологий
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

СТЕПАНЕНКО Александр Александрович

19.12.2024

Контактные данные:

тел.: +7(999)843-0512, e-mail: aastepanenko@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.08 – Физика плазмы (физико-математические науки)

Адрес места работы:

115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31,

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», кафедра физики плазмы Института лазерных и плазменных
технологий

Тел.: +7 495 788 56 99; e-mail: aastepanenko@mephi.ru

Подпись сотрудника НИЯУ МИФИ А.А. Степаненко удостоверяю: