

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Дубров Максим Леонидович

«МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗРЯДОВ Т-15МД С УЧЁТОМ  
СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ»

01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2019

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью «Центр моделирования плазмы».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник отделения  
теории плазмы ККТЭиПТ НИЦ КИ  
**Лукаш Виктор Эммануилович**

Официальные оппоненты:

**Зимин Александр Михайлович**  
профессор, доктор технических наук

МГТУ им. Н.Э. Баумана, факультет  
энергомашиностроения, кафедра  
плазменных энергетических установок,  
профессор.

**Романников Александр Николаевич**  
доктор физико-математических наук

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
советник генерального директора по  
научной деятельности.

**Пошехонов Юрий Юрьевич**  
кандидат физико-математических наук

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, отдел №3,  
старший научный сотрудник.

Защита состоится «25» сентября 2019 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета МИФИ.01.04



/Степаненко А.А./

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» осуществляется модернизация токамака Т-15, научная программа которого предполагает физическую поддержку проекта ИТЭР. Новая установка получила название Т-15МД [1-3]. В связи с тем, что плазма в этом токамаке имеет вытянутое по вертикали поперечное сечение, она будет неустойчивой в вертикальном направлении. Для обеспечения сценариев разряда в такой плазме токамак должен быть оснащен эффективной системой магнитного управления положением и формой плазменного шнура. Эта система является частью информационно-управляющей системы (ИУС) установки Т-15МД. Проект такой системы включает несколько объединённых вычислительных модулей для автоматизированного расчета и подготовки сценариев разряда. Одной из наиболее сложных систем, входящих в ИУС Т-15МД, является система управления плазмой (СУП) [4]. С её помощью осуществляется поддержание параметров плазмы токамака в пределах значений, заданных сценарием разряда. Составной частью СУП является система магнитного управления, с помощью которой контролируется форма плазмы и обеспечивается устойчивость ее положения. Для разработки системы магнитного управления применяются современные методы теории автоматического управления с учётом опыта работы таких систем на других токамаках. Для построения регуляторов используются упрощённые линейные модели объекта управления в различных операционных точках сценария разряда [5], а также нелинейная модель, реализованная в осесимметричном плазмозфизическом коде ДИНА [6]. Одна из основных задач диссертации посвящена *актуальной проблеме* по разработке системы магнитного управления для токамака Т-15МД. Описано применение метода идентификации для получения линейных моделей Т-15МД, а также использование их для синтеза регуляторов системы магнитного управления плазмой.

Значительная часть работы посвящена *актуальному исследованию* влияния полоидального тока в стенке вакуумной камеры Т-15МД на суммарную электромагнитную нагрузку, вызванную взаимодействием магнитного поля с индуцированными в камере токами методами численного моделирования. Существующие аналитические оценки влияния полоидального тока в простых случаях предсказывают существенное снижение суммарной электромагнитной нагрузки [7]. Однако эти оценки недостаточно подтверждены численным моделированием для случаев сложной геометрии проводящих структур в

существующих и проектируемых токамаках, так как используемые для моделирования коды обычно не включают модели генерации полоидального тока в вакуумной камере [8]. Электромагнитные усилия при срыве плазмы в токамаке могут привести к механическому разрушению конструкции [9], поэтому важна максимально точная оценка возможных электромагнитных нагрузок. В диссертации выполнено численное моделирование таких нагрузок в процессе теплового срыва в токамаке Т-15МД с учётом полоидального тока в стенке и дано сравнение с существующими аналитическими результатами.

Кроме влияния на электромагнитные нагрузки *весьма актуальной* областью исследования генерируемого в токамаке полоидального тока является влияние его на диамагнитную диагностику – измерение энергосодержания плазмы с помощью охватывающих её магнитных петель. Индуцируемый в стенке полоидальный ток вносит значительный вклад в диамагнитный сигнал таких петель и может существенно исказить его [10-14]. Часть диссертации посвящена аналитическому изучению эффекта экранировки диамагнитного сигнала полоидальным током в камере с учётом ее резистивности, а также численному моделированию этого эффекта в токамаке Т-15МД. Это позволяет *сформулировать актуальные* рекомендации по наладке диамагнитной диагностики на данном токамаке.

#### **Цели и задачи.** Цели работы:

- Построение системы магнитного управления плазмой токамака Т-15МД и исследование с помощью численного моделирования проектных возможностей этой системы с учётом инженерных ограничений.
- Разработка методики определения программируемых значений управляемых параметров плазмы токамака.
- Исследование влияния полоидального тока в стенке вакуумной камеры Т-15МД на электромагнитные нагрузки в ней при тепловом срыве в плазме.
- Исследование влияния полоидального тока в вакуумной камере Т-15МД на сигнал диамагнитной диагностики, формулировка возможных способов получения чистого сигнала.

Для достижения поставленных целей решены следующие задачи:

- Разработана методика расчёта линейных моделей плазмы токамака Т-15МД методом идентификации на нелинейном коде ДИНА.
- Разработан метод определения параметров синтеза регуляторов системы магнитного управления Т-15МД по получаемым линейным моделям.

- Создан программно-вычислительный комплекс, который с использованием нелинейных моделей кода ДИНА автоматизирует процессы расчёта линейных моделей в произвольных операционных точках сценария разряда, синтеза регуляторов и тестирования полученной системы управления.
- Разработана методика и создан программно-вычислительный комплекс для определения программируемых значений управляемых параметров.
- Разработана модель расчета эволюции полоидального тока в вакуумной камере токамака и проведен численный анализ электромагнитных нагрузок при тепловом срыве в плазме Т-15МД.
- Выполнен численный анализ диамагнитной диагностики при малом срыве в плазме Т-15МД.

**Научная новизна.** В работе используется принципиально **новый** подход для построения линейных моделей плазмы токамака, на основе которых строится система магнитного управления. **Впервые** построена модель системы магнитного управления для модернизированного токамака Т-15МД. **Впервые** применена двухконтурная система управления с разделением управления токами в управляющих обмотках и управления параметрами плазмы. **Впервые** оценены возможности магнитного управления в проекте токамака Т-15МД в различных режимах горения разряда с учетом ограничений системы электрического питания электромагнитной системы токамака.

**Впервые** проведен численный анализ влияния полоидального тока на электромагнитные нагрузки вакуумной камеры Т-15МД при тепловом срыве.

**Впервые** аналитически и численно изучено влияние полоидального тока в камере токамака на диамагнитный сигнал с учётом резистивности стенки.

**Впервые** получены значения параметров диамагнитной диагностики токамака Т-15МД, соответствующие его проектным величинам.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанная в диссертации методика получения линейных моделей плазмы универсальна и применима к любому токамаку. В работе показана эффективность заложенной в проект Т-15МД системы магнитного управления и продемонстрированы её возможности, которые могут использоваться для проектирования и расчетного сопровождения сценариев разрядов в плазме Т-15МД. Синтезируемые регуляторы можно использовать в токамаке Т-15МД как на этапе физического пуска, так и в базовом режиме работы установки.

Подтверждены аналитические оценки влияния полоидального тока на электромагнитные нагрузки в камере токамака Т-15МД. Уточнено определение

деформационных усилий, что позволяет сформулировать требования к системе защиты токамака при срывах в плазме.

Получена аналитическая модель диамагнитной диагностики токамака, включающая эволюцию полоидального тока в камере с учетом ее резистивности и работающая при произвольных скоростях изменения энергосодержания плазмы. Рассчитанные числовые параметры позволяют оценить эффективность диамагнитной диагностики Т-15МД.

**Положения, выносимые на защиту:**

- Методики идентификации нелинейного кода для получения линейных моделей токамака и синтеза двухконтурных регуляторов в системе магнитного управления для разделения управления токами в обмотках полоидального поля и управления параметрами плазмы.
- Обоснование параметров токамака Т-15МД и системы магнитного управления в режимах с возмущениями плазмы (управление положением Х-точки, возмущение типа «малый срыв»).
- Анализ электромагнитных сил в вакуумной камере токамака Т-15МД при тепловых срывах в плазме с учётом генерации полоидального тока в стенке.
- Аналитическая модель диамагнитной диагностики в токамаке с учётом резистивности стенки камеры и значения параметров диамагнитной диагностики Т-15МД.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат существующим представлениям и подтверждены расчетами на коде ДИНА. Полученные данные неоднократно докладывались на семинарах НИЦ «Курчатовский институт» и ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, представлялись на международных конференциях. Автором опубликовано по теме диссертации 13 работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, 6 докладов на международных конференциях (EPS, SOFT, FEC), 2 свидетельства на программы для ЭВМ. Полный список опубликованных работ находится в Приложении А.

**Личный вклад автора.** Вынесенные на защиту положения отражают личный вклад автора в выполненные работы:

Автором разработана методика идентификации на нелинейной модели плазмы токамака и разработана схема с двухконтурным управлением параметрами плазмы токамака и токами в обмотках полоидального поля;

Автором создан программно-вычислительный комплекс для автоматизации построения регуляторов системы магнитного управления Т-15МД с тестированием ее работы на коде ДИНА;

Автором проведен анализ влияния полоидального тока в стенке камеры токамака на ее электромагнитные нагрузки при срыве;

Численное моделирование на коде ДИНА работы диамагнитной диагностики Т-15МД при возмущениях в плазме типа «малый срыв» выполнено лично автором.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 128 страниц, включая 60 рисунков и 6 таблиц. Список цитированной литературы содержит 119 наименований.

## Содержание работы

В главе 1 рассматривается постановка задачи и приводится обзор используемых для расчётов моделей плазмы Т-15МД, которые включают в себя нелинейные модели осесимметричного плазмозфизического кода ДИНА и полученные с использованием этого кода линейные модели.

В разделе 1.1 описывается используемая в данной работе нелинейная модель для эволюции тороидальной плазмы в осесимметричном приближении, реализованная в плазмозфизическом коде ДИНА [6], в основе которого двумерная задача равновесия плазмы со свободной границей во внешнем магнитном поле решается самосогласованно с системой контурных уравнений для токов в вакуумной камере, активных и пассивных обмотках. Кроме того, в данном коде решаются одномерные (усреднённые по магнитным поверхностям) транспортные уравнения для полоидального магнитного потока и энергетических параметров плазмы.

Симуляторы на основе кода ДИНА отлично зарекомендовали себя при использовании их для моделирования работы системы магнитного управления током, положением и формой плазмы в сценариях разрядов, а также для моделирования срывов как в действующих токамаках, таких, как JT-60U [15], TCV [16], DIII-D [17], KTM [18], так и в проекте ИТЭР [19].

В разделе 1.2 приводится описание токамака Т-15МД [1-3], который в настоящее время находится на реконструкции в НИЦ «Курчатовский институт», дата его запуска назначена на конец 2020 [3]. Токамак Т-15МД послужит основой для дальнейшего развития термоядерных исследований в России,

проводимых сейчас на токамаках Т-10 и Глобус-М, а также для проведения экспериментов в поддержку международного проекта токамака-реактора ИТЭР.

В **разделе 1.3** приводится описание линейных моделей плазмы и разработанной автором методики их построения. Постановка задачи формулируется в **разделе 1.3.1**. Под линейным объектом понимается объект, динамика параметров которого описывается системой обыкновенных линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Приводится описание типов линейных моделей объектов управления, на которые их принято разделять в литературе. Динамика многих реальных объектов, таких, как токамак, описывается сложными нелинейными уравнениями, которые допускают линеаризацию лишь приближённо в некоторой окрестности значений рабочих параметров. В связи с этим разработка системы магнитного управления Т-15МД включает построение различных линейных моделей эволюции плазмы на отдельных стадиях сценария разряда, на которых поведение плазмы существенно отличается. При этом предполагается, что в масштабе альфвеновских времен плазма устойчива, и линейная модель описывает только процессы на шкале постоянных времен проводящих структур.

В **разделе 1.3.2** приводятся два традиционно используемых подхода для получения линейных моделей. В первом из них используется энергетический принцип идеальной МГД – теории, который оценивает как линейную вариацию магнитного потока, так и линейный отклик параметров формы плазмы на возмущения токов в проводниках через минимизацию вариации энергии [20]. Другой подход к линеаризации базовых равновесий, основанный на модели отклика плазмы через решение задачи равновесия со свободной границей при возмущениях токов в проводниках, изложен в работе [21].

Построенные с использованием моделей линеаризации регуляторы не обеспечивали достаточную устойчивость замкнутой системы, моделируемую кодом ДИНА. В связи с этим для получения линейных моделей Т-15МД использован другой способ, применяемый в теории автоматического управления – метод идентификации [22, 23], описанный в **разделе 1.3.3**. Идентификация заключается в построении упрощённой модели сложной динамической системы на основании наблюдения реакции выходных сигналов системы на различные входные сигналы. Одним из способов идентификации, принятым в данной работе, является подача на один из входов нелинейной модели сигнала заданной формы, при этом на остальные входы подаются нулевые сигналы.

В качестве объекта для измерения откликов токамака Т-15МД использовалась его численная нелинейная модель, реализованная в



плазмофизическом коде ДИНА [6]. Расчёты, связанные с идентификацией и обработкой результатов, выполнялись в среде MATLAB. Входами объекта управления являются 10 катушек (на токамаке T-15МД предусмотрено 10 обмоток, предназначенных для управления) полоидальной магнитной системы (ПМС). Выходами являются параметры формы плазмы полоидального сечения плазмы, ток плазмы, вертикальное и горизонтальное положение плазменного шнура, а также токи в катушках ПМС.

В разделе 1.3.4 описана методика, в которой тестовыми сигналами являются напряжения на обмотках ПМС. При этом строится линейная модель зависимости управляемых параметров (ток плазмы, её положение и параметры формы) от напряжений на обмотках.

Для сравнения линейных моделей, полученных классическим методом линеаризации и методом идентификации, проделаны расчёты отклика Z-координаты плазменного шнура на постоянное напряжение, прикладываемое к каждой обмотке полоидального поля. Такие же расчёты проделаны на нелинейной модели (код ДИНА), с результатами которых сравниваются результаты линейных моделей. В тесте участвовали 3 линейные модели: 2 стандартные линеаризованные модели (одна из них с нулевым сопротивлением плазмы) и идентифицированная модель. Результаты сравнения показаны на рисунке 1. Видно, что идентифицированная модель значительно лучше соответствует нелинейной модели по сравнению со стандартными линейными моделями.

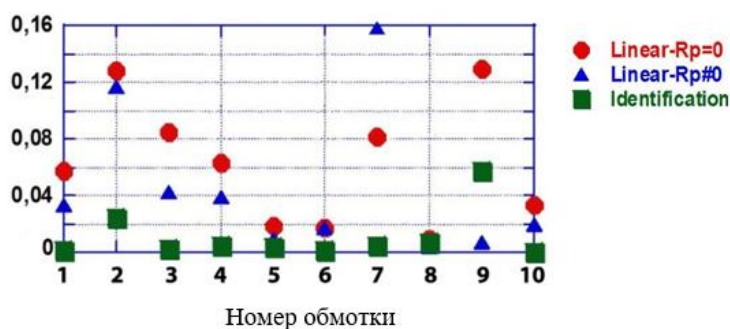


Рисунок 1. Относительные ошибки откликов вертикального положения плазмы, рассчитанные для линейных моделей, полученных различными способами для случая диверторной плазмы T-15МД.

В разделе 1.3.5 описана методика, в которой линейная модель описывает зависимость параметров плазмы от токов в обмотках ПМС, изменяемых произвольно в коде ДИНА. В разделе 1.3.6 описывается построение объединенной модели зависимости токов в обмотках ПМС от напряжений и модели зависимости параметров плазмы от токов в обмотках ПМС, в результате

чего получается полная линейная модель токамака (1), необходимая для синтеза регуляторов системы магнитного управления.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = C\mathbf{x} + D\mathbf{u} \end{array} \right., \text{ где } \begin{array}{l} \mathbf{u} = [u_1 \quad \dots \quad u_{10}]^T \\ \mathbf{y} = [Z \quad R \quad g_{1-6} \quad I_{pl}]^T \end{array} \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{u}$  – напряжения на обмотках ПМС,  $\mathbf{I}$  – токи в обмотках ПМС,  $\mathbf{y}$  – управляемые параметры плазмы (вертикальная и горизонтальная координаты центра плазмы  $Z$  и  $R$ , зазоры между сепаратрисой и стенкой камеры  $\mathbf{g}$ , ток плазмы  $I_{pl}$ ),  $\mathbf{x}$  – вектор состояния модели,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – матрицы, задающие линейную модель.

В разделе 1.3.7 описываются использованные программные средства. Для реализации описанных процедур, связанных с идентификацией и верификацией линейных моделей, в инженерно-вычислительной среде MATLAB разработаны программы для использования в расчётах с Simulink-версии кода ДИНА, а также для обработки получаемых данных, их аппроксимации и дальнейшего построения регуляторов. Процесс идентификации линейных моделей может происходить в автоматическом режиме, а для контроля полученных результатов предусмотрен специальный интерфейс.

В главе 2 рассматривается созданное программное обеспечение для расчетного сопровождения экспериментов на токамаке Т-15МД. Описываются программно-вычислительные комплексы (ПВК) для расчёта сценариев разряда и параметров системы магнитного управления, а также тестирования её на коде ДИНА.

В разделе 2.2.1 описывается схема работы системы магнитного управления с обратной связью, которая включает в себя блок магнитной диагностики для измерения величин полоидального магнитного поля по полоидальному обходу плазмы  $\mathbf{V}_p$ , полоидального магнитного потока  $\Psi_p$ , плазменного тока  $I_p$  и токов в полоидальных катушках  $\mathbf{I}_{PF}$ . По этим измерениям производится восстановление формы границы плазмы и формируется вектор управляемых параметров  $\mathbf{C}_p$ , который сравнивается с вектором программируемых значений  $\mathbf{C}_{p\_ref}$ . В состав вектора  $\mathbf{C}_p$  входят программируемые параметры формы плазмы  $\mathbf{g}$ , программируемая величина плазменного тока и вектор  $\mathbf{I}_{PF\_ref}$ , состоящий из программируемых токов в полоидальных катушках. Разница  $\mathbf{C}_p - \mathbf{C}_{p\_ref}$  является входным параметром для расчёта с помощью контроллера  $K$  вектора напряжений обратной связи  $\mathbf{U}_{fb}$  (feedback), который, складываясь с вектором программируемых значений напряжений на

полоидальных катушках  $\mathbf{U}_{fb\_ref}$ , формирует вектор управляющих напряжений  $\mathbf{U}_{PF}$  на этих катушках.

В разделе 2.2.2 описан созданный ПВК для расчёта регуляторов напряжений обратной связи. Построение регуляторов осуществляется на основе теории линейно-квадратичного (LQ) управления [24]. Методы этой теории позволяют не только стабилизировать неустойчивую по вертикали плазму, но и с высокой точностью настраивать форму переходных процессов при управлении, учитывать ограничения на величину напряжений источников питания обмоток полоидального поля.

Алгоритм работы ПВК расчёта системы магнитного управления состоит из следующих этапов. Рассматриваются данные рассчитанного заранее сценария разряда. В нем выбираются несколько последовательных моментов времени, в которых равновесные плазменные конфигурации существенно отличаются. Для каждого из моментов также задаются параметры плазмы, которыми должен управлять регулятор. Параметры сценария и эти моменты времени являются входными данными для ПВК. Для каждого момента времени ПВК запускает код ДИНА, настроенный на соответствующую конфигурацию плазмы. Количество запусков кода равно количеству входных напряжений (активных обмоток полоидального магнитного поля), при этом в каждом запуске анализируются отклики выходных величин (параметров плазмы) на входное напряжение заданной величины. По этим данным формируется линейная модель плазмы, для которой выбираются параметры переходных процессов с учётом ограничений источников питания и синтезируется линейно-квадратичный регулятор. Таким образом, для каждого из выбранных моментов сценария получается свой регулятор СУП. Далее реализуется запуск сценария на коде ДИНА с последовательным переключением полученных регуляторов. В разделе 2.2.3 описана реализация ПВК на платформе Matlab.

В разделе 2.3 рассмотрен разработанный при непосредственном участии автора диссертации программный комплекс для расчёта программируемых параметров, являющихся компонентами векторов  $\mathbf{I}_{PF\_ref}$ ,  $\mathbf{U}_{fb\_ref}$  и  $\mathbf{g}_{ref}$ , обеспечивающими заданную эволюцию управляемой равновесной конфигурации плазмы токамака, знание которых необходимо для построения системы магнитного управления.

В разделе 2.3.1 описывается задача определения токов в катушках полоидальной магнитной системы, обеспечивающих равновесную конфигурацию плазмы. Эту задачу можно поставить как обратную, в этом случае для её решения необходимо и достаточно в каждой операционной точке

сценария разряда знание следующих входных параметров: координаты границы плазмы  $\{R_{\text{bnd}}, Z_{\text{bnd}}\}$ , величина плазменного тока  $I_{\text{pl}}$ , распределение его плотности внутри границы плазмы и величина полного полоидального магнитного потока на границе плазмы  $\Psi_{\text{bnd}}(t) = \Psi_{\text{ext}}(t) + \Psi_{\text{plas}}(t)$ . В каждый момент времени сценария  $t$  на плазменной границе должно выполняться соотношение  $\Psi_{\text{ext}}(t) + \Psi_{\text{plas}}(t) = \Psi_{\text{ext}}(t_0) - \Delta\Psi_{\text{res}}(t)$ , где  $\Psi_{\text{plas}}(t)$  — значение потока от плазмы;  $\Psi_{\text{ext}}(t)$  — величина потока от полоидальных обмоток и вакуумной камеры;  $\Delta\Psi_{\text{res}}(t)$  — резистивные потери полоидального потока в интервале  $[t_0, t]$ . В соответствии с этим для определения текущих значений  $\Psi_{\text{plas}}$  и  $\Delta\Psi_{\text{res}}$  необходимо моделирование энергетического баланса, расчёт которого в исходных данных требует задания эволюции плотности плазмы, дополнительного нагрева и эффективного заряда ионов.

В представленной работе для решения такой задачи используется симулятор на основе плазмозфизического кода ДИНА [6], который для этой цели включает в себя оптимизационную процедуру на основе метода SVD (singular value decomposition [25]), позволяющую определять величины токов в катушках полоидального магнитного поля, обеспечивающих прохождение последней замкнутой магнитной поверхности наиболее близко к линии  $\{R_{\text{bnd}}, Z_{\text{bnd}}\}$  при условии равенства полоидального магнитного потока на границе плазмы заданной величине  $\Psi_{\text{bnd}}$ .

Токи в полоидальных катушках, полученные в результате решения обратной задачи, являются компонентами вектора  $\mathbf{I}_{\text{PF\_ref}}$ . Если определить перечисленные входные параметры для каждой операционной точки сценария разряда (программируемые значения), можно получить эволюцию компонентов вектора  $\mathbf{I}_{\text{PF\_ref}}$ . Кроме того, зная характеристики источников электрического питания катушек полоидального магнитного поля, можно рассчитать компоненты вектора  $\mathbf{U}_{\text{fb\_ref}}$ , обеспечивающие величины найденных токов в этих катушках. В разделе 2.3.2 подробно изложена структура данного ПВК и приведены примеры его использования.

В разделе 2.4 описаны примеры применения разработанных программ для моделирования процесса магнитного управления плазмой Т-15МД на коде ДИНА.

В разделе 2.4.1 описывается применение созданных ПВК на примере моделирования полного разряда Т-15МД с омическим нагревом, включая стадии ввода тока, квазистационарную стадию с диверторной конфигурацией и стадию вывода тока. В данном сценарии выбрано 6 моментов времени, для каждого из которых с помощью ПВК построены регуляторы. Затем с помощью полученных

регуляторов смоделирована работа системы управления на коде ДИНА. Расчёты произведены по отдельности для двух возможных типов регуляторов – одноконтурных с управлением по напряжениям обмоток и двухконтурных с управлением по токам в обмотках. Использование второго контура позволяет добиться не только малых отклонений параметров плазмы, но и поддерживает сценарные (программируемые) токи в обмотках. Это позволяет оставаться в рамках опорных равновесий, для которых получены используемые регуляторы.

Моделирование проводилось с учётом инженерных ограничений на напряжения источников питания. При обеих схемах стационарные напряжения не выходят на насыщение. Это говорит о хорошем балансе между достигаемым качеством управления и использованием доступной мощности источников питания. Важнейшей характеристикой системы управления является потребляемая при работе мощность, которая рассчитана по результатам моделирования. Стационарная мощность, потребляемая как с одноконтурными, так и с двухконтурными регуляторами, составляет 65 МВт. Пиковая мощность в схеме с одноконтурными регуляторами 120 МВт, а с двухконтурными – не более 100 МВт.

Одним из возможных возмущений, к которым должна быть устойчива система магнитного управления, это так называемый малый срыв в плазме, сопровождающийся падением относительного газокинетического давления плазмы  $\beta_p$ . Данный вид возмущений наиболее вероятен при работе токамака и часто используется для оценки работы систем управления [26]. В **разделе 2.4.2** показано функционирование разработанной системы управления на квазистационарной стадии разряда Т-15МД при ступенчатом падении  $\beta_p$  до уровня 0,8 от первоначальной величины. Полученные при управлении с помощью двухконтурного регулятора отклонения зазоров от номинальных значений не превышают 1,5 см и стабилизируются за ~50 мс.

Для токамаков-реакторов важной проблемой является большая тепловая нагрузка на дивертор. Одним из возможных способов распределить нагрузку более равномерно по диверторным пластинам является периодическое движение Х-точки [27]. В **разделе 2.4.3** показано, что с использованием разработанного контроллера это осуществимо в Т-15МД за счёт управления смещением усов сепаратрисы плазмы, а также определены доступные параметры такого движения. Оценено минимальное время, за которое можно достичь требуемого отклонения с помощью разработанной системы магнитного управления.

Выполненные расчёты показали, что минимальное время, за которое ПМС с использованием разработанного регулятора способна переместить Х-точку на

20 см находится на уровне  $\sim 150$  мс. Такое ограничение связано с насыщением источников питания обмоток, расположенных наиболее близко к X-точке.

В разделе 2.4.4 рассмотрено управление плазмой на стадии вывода тока при гашении разряда, критическим моментом которой является опасность потери плазмой вертикальной устойчивости за счет роста внутренней индуктивности  $l_i$  [28]. Кроме того на конечной стадии разряда уменьшается ток плазмы, поэтому для соблюдения предела Гринвальда необходимо уменьшать и её размер согласно формуле  $n_{GW}[10^{20}\text{м}^{-3}] = \frac{I_p[\text{MA}]}{\pi a^2[\text{м}]}$ , где  $n_{GW}$  – максимально допустимая плотность плазмы,  $I_p$  – ток плазмы,  $a$  – малый радиус плазмы.

Однако уменьшение размеров плазмы отдаляет её от проводящих элементов установки, выполняющих роль пассивной стабилизации вертикальной неустойчивости. Для оценки запаса устойчивости плазмы к вертикальному смещению рассматривается [29] параметр  $m_s = \left[ \frac{1,47(1 + e^{-2l_i+1})}{2(\kappa - 1,13)} - 1 \right] (1 + 0,6(\beta_p - 0,1))$ , где

$\kappa$  – вытянутость плазмы. Чем больше эта величина, тем устойчивее плазма по вертикали. Минимально допустимые значения этого параметра для разных токамаков отличаются, но в целом считается, что для вертикальной устойчивости плазмы достаточно, чтобы  $m_s \approx 0,5$ . Как видно из формулы, уменьшение вытянутости ведёт к улучшению устойчивости. Приводимые в [28] диаграммы отражают приближённое выполнение условия  $m_s > 0,5$  для успешного вывода тока без срыва плазмы на стенку. Хотя уменьшение вытянутости улучшает вертикальную устойчивость, при выводе тока из плазмы желательно как можно дольше сохранять диверторную конфигурацию плазмы, чтобы минимизировать тепловую нагрузку на первую стенку токамака.

Существенный эффект на процесс управления оказывают ограничения на напряжения источников питания, которые ухудшают теоретические возможности регулятора системы управления. В связи с этим к сценарию вывода тока из плазмы при гашении разряда предъявляются следующие требования:

1. возможность стабилизации магнитной конфигурации системой управления, т. е. обеспечение времени неустойчивости больше нескольких времён дискретизации работы системы управления;

2. плазма в процессе сценария вывода тока должна сохранять запрограммированную диверторную конфигурацию до минимальных значений плазменного тока с целью экономии ресурса первой стенки;

3. должен быть обеспечен контроль положения и формы плазмы с учетом реальных характеристик источников электрического питания.

Для оценки влияния скорости вывода тока на работу системы управления в работе проведено численное моделирование двух сценариев со скоростью вывода тока, соответственно, 660 кА/сек и 2000 кА/сек, при этом учтены ограничения на максимальные напряжения питания обмоток управления. Результаты моделирования показали, что при более высокой скорости вывода тока действительно получаются более высокие значения  $l_i$ , а также меньшие значения запаса устойчивости на границе плазмы и приближение значения плотности плазмы к пределу Гринвальда. Увеличение  $l_i$  приводит к более сложному процессу управления, заметно усиливаются осцилляции положения плазмы, отмечается существенное возрастание мощности, потребляемой обмотками ПМС, как показано на рисунке 2.

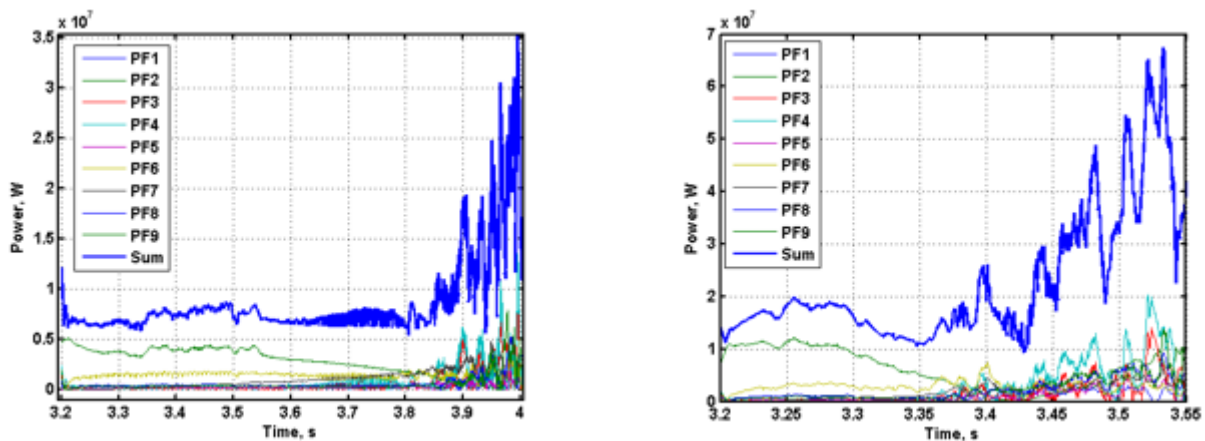


Рисунок 2. Оценка мощности, потребляемой системой управления для сценариев вывода тока со скоростью 660 кА/сек (слева) и 2000 кА/сек (справа).

Когда управляющие напряжения достигают предельных значений, эффективность соответствующих обмоток для управления падает. Ухудшается качество управления вертикальным и радиальным положениями плазмы, а также формой плазмы. При быстром выводе тока плазма становится лимитерной при токе плазмы 226 кА, а при медленном – при токе 136 кА. В работе не удалось получить устойчивый сценарий вывода тока со скоростью выше 2000 кА/сек.

**Глава 3** посвящена анализу влияния полоидального тока, индуцированного в вакуумной камере токамака в результате теплового срыва за счёт изменения парамагнитных свойств плазмы, на величину и распределение электромагнитных сил в вакуумной камере. В **разделе 3.1** даётся описание сценария срыва плазмы, который начинается с быстрого (порядка 0,1—1 мс) выброса из неё тепловой энергии (TQ — Thermal Quench), после чего начинается

неуправляемое движение плазмы по вертикали (VDE — Vertical Displacement Event), сопровождаемое снижением плазменного тока (CQ — Current Quench) за счёт внезапно возросшего после TQ электрического сопротивления плазмы [30, 31]. В процессе срыва из-за индуктивной связи элементов вакуумной камеры с плазмой в камере наводятся тороидальные токи [31-33]. Кроме тороидальных токов в результате TQ, в процессе которого плазма становится парамагнитной, в вакуумной камере индуцируется и полоидальный ток, компенсирующий подъём в плазме тороидального магнитного потока и оказывающий вклад в величину электромагнитного воздействия на вакуумную камеру. Роль полоидального тока в стенке анализируется аналитически в [7, 32] и численно в [33].

В разделе 3.1 описаны результаты численного анализа с помощью плазмофизического кода ДИНА суммарного электромагнитного воздействия на вакуумную камеру токамака Т-15МД за счёт индуцированных в процессе TQ тороидальных и полоидальных токов  $\mathbf{j}_w = \mathbf{j}_w^{pol} + \mathbf{j}_w^{tor}$ :

$$\mathbf{F}_w = \int_w [\mathbf{j}_w, \mathbf{B}] dV. \quad (2)$$

В этом соотношении интегрирование проводится по объёму проводящей структуры вакуумной камеры,  $\mathbf{j}_w^{pol}$  и  $\mathbf{j}_w^{tor}$  являются компонентами плотности индуцированного в стенке тока соответственно в полоидальном и тороидальном направлениях. Приводится сравнение полученного электромагнитного воздействия с оценками электромагнитных воздействий за счёт только наведённых тороидальных токов.

В разделе 3.2 представлена постановка расчётной задачи. В разделе 3.2.1 приводится описание характерных параметров плазмы Т-15МД перед началом теплового срыва: большой радиус плазмы  $R_0 = 1,48$  м, малый радиус плазмы  $b = 0,66$  м, вытянутость  $\kappa=1,8$ , вакуумное тороидальное магнитное поле при  $r = R_0$  равно  $B_{T0} = 2$  Тл и ток плазмы  $J = 2$  МА. Параметры плазмы перед срывом характеризуются величинами относительного давления плазмы  $\beta_p = 0,65$  и внутренней индуктивности  $l_i(3) = 0,74$ . Тепловой срыв, в процессе которого  $dJ/dt = 0$ , моделируется внезапным падением  $\beta_p$  до  $\sim 0$  за время  $\tau_{TQ} = 0,1$  мс.

Численная модель описана в разделе 3.2.2. Модель вакуумной камеры Т-15МД в коде ДИНА имеет 77 тороидальных филаментов. Реализованная автором диссертации модель полоидального тока в вакуумной камере  $I_w^{pol}$  впервые используется для моделирования электромагнитных усилий в камере от генерируемого полоидального тока. Модель основана на решении контурного



уравнения, характеризующего баланс тороидального магнитного потока внутри вакуумной камеры:

$$L_w \frac{dI_w^{pol}}{dt} + R_w I_w^{pol} + \frac{d\Phi_p}{dt} + L_w \frac{dI_{tc}}{dt} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $R_w$  – сопротивление камеры полоидальному току;  $L_w = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_w} \frac{ds}{r}$  – индуктивность камеры в полоидальном направлении, где  $S_w$  – полоидальное сечение камеры, где  $I_{tc}$  — ток в обмотке тороидального поля;  $\Phi_p$  – тороидальный поток, создаваемой токами плазмы. Данное уравнение получено в работе [32], в которой оно впервые используется для аналитической оценки электромагнитного усилия в вакуумной камере за счёт индуцированного полоидального тока. В работе [33] это уравнение используется для численного моделирования эволюции электромагнитных нагрузок в камере токамака Игнитор. Для решения уравнения (3) принято начальное условие  $I_w^{pol}(t=0) = 0$ . Результаты расчётов эволюции полоидального тока в стенке токамака получены в предположении  $dI_{tc}/dt = 0$ .

Результаты моделирования приведены в **разделе 3.3**. Показана эволюция основных параметров плазмы в процессе TQ и в процессе начальной стадии CQ. В течение TQ происходит смещение плазмы в радиальном и вертикальном направлениях, после чего начинается процесс VDE. Форма плазмы в результате TQ слегка деформируется за счёт увеличения, в первую очередь, вытянутости плазмы.

В процессе TQ тепловая энергия из плазмы полностью исчезает ( $\beta_p \approx 0$ ), что приводит к генерации тороидального тока  $I_w^{tor}$  в вакуумной стенке, суммарная величина которого за время теплового срыва в T-15МД достигает ~80 кА. Кроме того, падение  $\beta_p$  приводит к усилению парамагнитных свойств плазмы, что характеризуется ростом тороидального магнитного потока  $\Phi_p$  внутри неё на величину ~0,05 Вб и соответствующей генерации полоидального тока в вакуумной стенке на уровне ~90 кА.

Приведён сравнительный анализ электромагнитного воздействия на вакуумную камеру T-15МД в процессе TQ как за счёт только индуцированных в камере тороидальных токов  $I_w^{tor}$ , так и суммы их с индуцированными в камере полоидальными токами  $I_w^{pol}$ . Показано, что радиальная составляющая интегральной электромагнитной силы является доминирующей. Кроме того, полученные результаты расчёта электромагнитных нагрузок от индуцированных в вакуумной камере T-15МД тороидального и полоидального токов показывают,

что при учёте полоидального тока радиальная компонента электромагнитной силы после TQ в Т-15МД снижается в  $\sim 3$  раза (с 1,2 МН от тороидального тока до  $\sim 0,4$  МН от суммы тороидального и полоидального токов), что проиллюстрировано на рисунке 3.

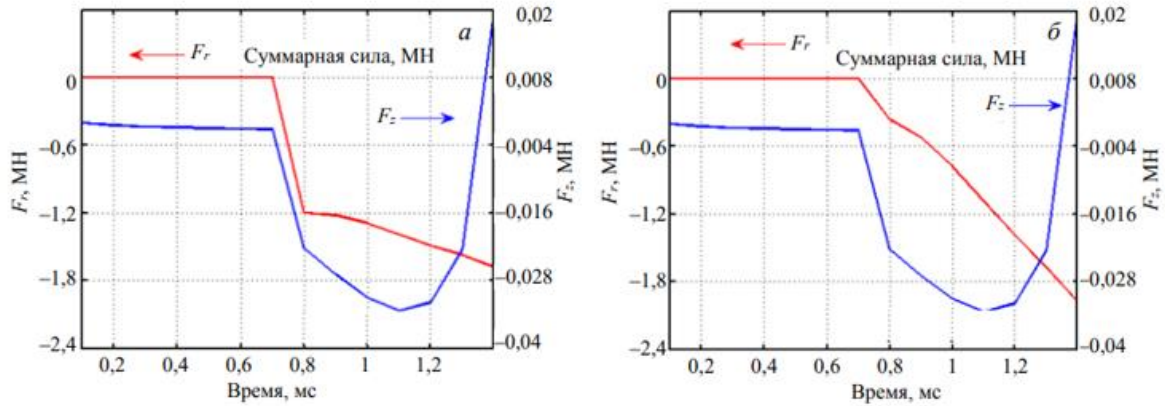


Рисунок 3. Эволюция компонентов интегральной электромагнитной нагрузки от тороидального тока в вакуумной камере Т-15МД (а), и от тороидального и полоидального токов в вакуумной камере Т-15МД (б).

Вывод о заметном влиянии индуцированного в вакуумной стенке в процессе TQ полоидального тока хорошо согласуется с результатами других исследований [7, 32, 33]. Например, в работах [7, 32] аналитически получено, что учёт индуцированного в процессе TQ полоидального тока в вакуумной камере токамака с круглой плазмой и большим аспектным отношением снижает интегральную электромагнитную радиальную силу в 2 раза по сравнению с силой только от индуцированного тороидального тока. Аналогичные результаты сравнения полной радиальной силы и силы только от тороидального тока получены в работе [33] при анализе распределения электромагнитных сил в элементах вакуумной камеры токамака Игнитор после TQ. Полоидальное распределение электромагнитного усилия имеет косинусоидальную форму. Максимальное воздействие радиальной силы  $F_r$  наблюдается на внешней части вакуумной камеры, вертикальная сила  $F_z$  также максимальна на внешней части камеры, однако её величина намного ниже. Суммарный вектор электромагнитной нагрузки с учётом полоидального тока  $I_w^{pol}$  становится направленным, главным образом, внутрь камеры.

**Глава 4** посвящена применению уравнения баланса тороидального магнитного потока внутри вакуумной камеры (3) в стенке токамака для повышения точности диамагнитных измерений. В **разделе 4.1** формулируется задача диамагнитной диагностики для определения энергосодержания плазмы

[10] с помощью измерения  $d\Phi_d/dt$  сквозь петлю  $d$ , опоясывающую плазму. Эта идея содержится в формуле

$$2 \frac{\delta\Phi_{pl}}{\Phi_{pl}} = \frac{B_J^2}{B_0^2} - \beta \quad (4)$$

полученной для цилиндра [34], где  $\delta\Phi_{pl}$  обозначает часть тороидального потока, создаваемую только токами плазмы. В идеальном случае  $\Phi_d$  для петли  $d$  можно записать как сумму

$$\Phi_d = \delta\Phi_{pl} + \Phi_d^e \quad (5)$$

которая состоит из  $\Phi_d^e$  – потока внешнего поля  $\mathbf{V}^e$  и малого вклада плазмы  $\delta\Phi_{pl}$ . Таким образом, для использования (4) нужно выделить  $\delta\Phi_{pl}$  из экспериментально найденного  $\Phi_d$  [10-14, 35-37]. Стандартным подходом к решению такой задачи является организация вспомогательных измерений, позволяющих оценить  $\mathbf{V}^e$ . Это может быть сделано с помощью так называемых компенсационных витков [10, 14, 35-37], обходящих плазму и реагирующих только на  $\partial\mathbf{V}^e/\partial t$ , или второй диамагнитной петли [11-14]  $d2$ , охватывающей отличающуюся площадь в сравнении с петлёй  $d1$ .

Приведённая в работе теория даёт дополнительную связь между соответствующими величинами, уничтожая тем самым одну неизвестную. Таким образом, формально делает «дополнительное» измерение излишним, что открывает новые возможности для калибровки и взаимной проверки.

Зависимость измеренного сигнала  $\Delta\Phi_d$  от полоидального (вихревого) тока  $I_w$ , наведённого в стенке, в диссертационной работе является главным предметом обсуждения. Существование этого тока делает  $\Delta(\Phi_d - \delta\Phi_{pl}) \neq 0$ , даже если другие «источники погрешности» [10] могут отсутствовать или компенсироваться. Использование двухпетлевой схемы или компенсационных витков – два практических метода обхода этой хорошо известной проблемы. В диссертации вместо этого в задачу введено, как предложено в [38], уравнение для  $I_w$ , которое даёт связь  $I_w(\delta\Phi_{pl})$ . Важным шагом от решения задачи определения  $\Phi_d$  для идеальной стенки является учёт её резистивности и анализ переходных процессов.

В разделе 4.2 описывается постановка задачи. Рассматривается квазистационарная стадия разряда с омическим нагревом в плазме токамака Т-15МД, в котором предполагается установка двух диамагнитных петель разной площади, охватывающих плазменный шнур [2]. Большая петля будет монтироваться на внутренней стороне вакуумной камеры, а меньшая петля  $d2$

будет лежать на ребре жёсткости камеры ближе к плазме на 4–7 см. Площадь, покрываемая петлёй  $d_2$  в поперечном сечении токамака, составляет  $\sim 90\%$  от площади петли  $d_1$ . Похожие двухпетлевые конфигурации использовались на других токамаках [12-14]. Такое расположение позволяет использовать двухпетлевой [11] или дифференциальный [12] метод. Для его применения важна точность определения площади  $S_{d_1} - S_{d_2}$  и потока  $\Phi_{d_1} - \Phi_{d_2}$  в промежутке между петлями. При типично узких промежутках между плазмой и стенкой эти величины малы (для Т-15МД  $\sim 10\%$ ), что делает  $d(\Phi_{d_1} - \Phi_{d_2})/dt$  на порядок меньше величины сигналов, измеряемых каждой диамагнитной петлёй, что является недостатком данной техники. Например, в токамаке KSTAR несмотря на точные лазерные измерения положения пары петель в вакуумной камере поток  $\delta\Phi_{pl}$  не мог быть удовлетворительно вычислен с помощью двухпетлевых измерений [13, 14].

Метод двух петель предложен для исключения фонового магнитного поля и эффекта вихревых токов (член  $\Phi_d^e$  в (5)) при измерении относительно слабых диамагнитных сигналов [11]. Амплитуда наведённых в стенке вихревых токов определяется величиной  $\partial\mathbf{B}/\partial t$ , которая должна быть наибольшей и проявляться в сохранении  $\Phi_d$  в процессе переходов длительностью намного ниже резистивного времени стенки  $\tau_w$ . По этой причине в работе рассматривается тепловой срыв (TQ) продолжительностью  $\tau_{iq} \ll \tau_w$  при практически мгновенном падении тепловой энергии плазмы. Чем больше это падение, тем проще должна быть его идентификация. Для получения количественных оценок в работе рассматривается TQ малой амплитуды с потерей тепловой энергии порядка 5–20% [39] – так называемый малый срыв. Он не разрушает разряд, но для восстановления плазмы нужна соответствующая реакция системы магнитного управления. С этой точки зрения для проекта Т-15МД в диссертации проанализированы сценарии с малыми TQ. Рассматриваемая здесь диамагнитная диагностика необходима для определения эволюции  $\beta_p$  в реальном времени.

В процессе моделирования переходные процессы представлены линейным падением  $\beta_p$  с 0,152 до 0,122 (на 20%). При этом продолжительность спада  $\tau_{iq}$  меняется в пределах  $0,1 \div 49$  мс, что соответствует  $\tau_{iq} / \tau_1 = 0,02 \div 10$ , где

$$\tau_1 \equiv L_w / R_w \quad (6)$$

выражено через коэффициент индуктивности и сопротивление камеры для полоидального тока, введённые в уравнении (3). Для стенки Т-15МД в работе  $\tau_1$

оценено как 4,9 мс, а скиновое время – 62 мкс. Следовательно, в случае наиболее быстрого TQ ( $\tau_{iq} = 0,1$  мс) стенку можно считать идеальной, в которой в течение TQ индуцируются существенные токи, тогда как при больших  $\tau_{iq}$  эти токи должны быть меньше.

Целью нашего исследования является количественная оценка влияния полоидальных токов в стенке  $I_w$  на диамагнитный сигнал, которые рассматриваются в качестве источника его искажения [10-14].

В разделе 4.3 приводятся сопутствующие уравнения и определения. Моделирование эволюции плазмы выполнялось с помощью кода ДИНА и алгоритма, представленного в [8]. В диссертации исследуется влияние полоидального тока в стенке, удовлетворяющего (3), ролью которого ранее пренебрегалось [6, 8]. В нашем исследовании  $\delta\Phi_{pl}$  является входной величиной, а  $\Phi_d$ , соответственно, неизвестной. При этом целью является анализ различия между  $\Delta\Phi_d$  и  $\Delta\delta\Phi_{pl}$ .

Результаты расчётов суммированы в разделе 4.4. Вычисленное значение  $\Delta\Phi_{pl}^{iq}$  равно 2,8 мВб, которое определяется только условиями равновесия, поэтому одинаково во всех рассмотренных случаях с  $\Delta\beta_p = 0,03$ . На рисунке 4 показаны результаты численного моделирования тороидальных потоков плазмы и диамагнитных петель в случае самого быстрого падения  $\beta_p$ .

Результаты численного моделирования сравниваются с аналитическими результатами с использованием решения уравнения для полоидального тока (3), которое имеет структуру

$$(\tau_1 \frac{d}{dt} + 1)f = h \quad (7)$$

и выполняется при

$$f = e^{-T} [f_0 + \int_0^T e^T h(T) dT], \quad (8)$$

где  $f_0 \equiv f(t_0)$  и

$$T \equiv (t - t_0) / \tau_1 \quad (9)$$

является временем процесса с началом при  $t = t_0$  в единицах  $\tau_1$ .

При  $dI_w/dt = 0$  единственным членом в правой части (3) является  $d\delta\Phi_{pl}/dt$ . В конце TQ он равен нулю, что соответствует  $h = 0$  при  $T > \tau_{iq}/\tau_1$  в (8), которое приводит к  $f = Ce^{-T}$ . Это соответствует экспоненциальному снижению  $I_w$ ,  $U_d$  и  $\Delta(\Phi_d - \delta\Phi_{pl})$  с временем затухания  $\tau_1$ . Снижение  $I_w$  до уровня 10% от его

значения сразу после TQ занимает  $\Delta t = 2,3\tau_1$ , что  $\sim 11,4$  мс для условий T-15МД, как показано на рисунке 5.

Эти результаты следует рассматривать в качестве очищенных от неустранимых флуктуаций  $I_{tc}$ . Принимая  $dI_{tc}/dt = 0$ , мы рассматриваем влияние  $I_w$  на  $\Phi_d$  в чистом виде. В однопетлевых диамагнитных измерениях шум от  $I_{tc}$  может быть легко учтён, как описано в [38], если будет измерен петлёй снаружи камеры, как это сделано на TCV [35], ASDEX [37] и запланировано в проекте ИТЭР [10].

Быстрый TQ с  $\tau_{tq} \ll \tau_1$  можно моделировать путем скачкообразного изменения  $\delta\Phi_{pl}$  с  $\delta\Phi_{pl}^0$  до величины  $\delta\Phi_{pl}^0 + \Delta\Phi_{pl}^{tq}$ , где  $\Delta\Phi_{pl}^{tq}$  – рассчитанная постоянная. Максимальное (сразу после TQ) значение  $I_w^{\max} = 3,4$  кА для T-15МД получается при вычисленном  $\Delta\Phi_{pl}^{tq} = 2,8$  мВб. Поскольку  $B_{tc} = 2$  Т при  $r = 1,58$  м соответствует  $I_{tc} = 15,8$  МА, получаем  $I_w^{\max} / I_{tc} = 0,215 \times 10^{-3}$ , что определяет уровень вариации тороидального поля в зазоре между плазмой и стенкой. Будучи небольшой, она всё равно сильно влияет на диамагнитные сигналы. При 10% допустимого отклонения  $\Delta\Phi_d$  от  $\Delta\delta\Phi_{pl}$  оно не будет превышено при  $T_{end} \equiv \tau_{tq} / \tau_1 > 10$ .

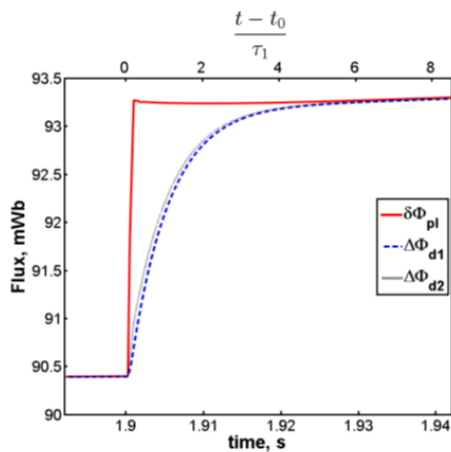


Рисунок 4. Созданный плазмой магнитный поток  $\delta\Phi_{pl}$  и вариации потока  $\Delta\Phi_{d1,2}$ , измеренные на петлях  $d1$  и  $d2$  как реакция на наиболее быстрое падение давления плазмы.

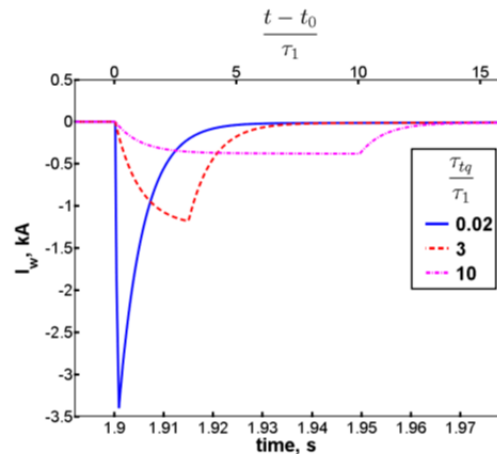


Рисунок 5. Полоидальный ток  $I_w$ , наведённый в стенке T-15МД при линейных падениях  $\beta_p$  с различными временами срыва.

Обсуждаемое прямое выделение  $\Delta\delta\Phi_{pl}$  из  $\Delta\Phi_d$  могло бы быть возможным, если бы вклад  $\Delta(L_d I_{tc})$  был много меньше самого  $\Delta\Phi_d$ . В рассмотренных случаях

$\Delta\delta\Phi_{pl}/\Phi_d \approx 2,5 \times 10^{-4}$ , что требует величины  $\Delta I_{tc}/I_{tc}$  ниже  $2,5 \times 10^{-4}$  и может оказаться слишком сильным требованием. Следовательно, в Т-15МД необходимы петли или катушки, измеряющие тороидальное поле вне камеры, если будет использоваться однопетлевая схема, как, например, в случае ИТЭР [10]. Двухпетлевой подход автоматически устраняет вклад от  $I_w$  и  $dI_{tc}/dt$  и связанные с этим задержки, но нужна высокая точность:  $\Delta(\Phi_{d1} - \Phi_{d2}) \approx 0,25$  мВб при  $\Delta\delta\Phi_{pl} = 2,8$  мВб, которая не гарантируется на Т-15МД.

Показанный в работе пример экстраполяции расчётов на условия ИТЭР, где принята схема с одной расположенной на стенке петлёй [10], демонстрирует  $\Delta\Phi_d = 0$  для процессов с характерным временем  $\Delta t$ , сравнимым или меньшим  $\tau_1$ , и только при  $\Delta t > 10\tau_1$  разность  $\Delta(\Phi_d - \delta\Phi_{pl})$  оказывается меньше 10% от  $\Delta\delta\Phi_{pl}$ . Различие между  $\Delta\Phi_d$  и  $\Delta\delta\Phi_{pl}$  вплоть до 100% наблюдалось на DIII-D, что явилось причиной демонтажа пристеночной петли, которая не давала преимуществ в плане отклика по времени [36]. Это актуально для любого токамака со слабым улучшением для петли, отделённой от стенки. Для ИТЭР величина  $\tau_1$  оценивается между 0,17 с [40] и 0,25 с [31], при этом значение  $10\tau_1$  будет  $\sim 1,7-2,5$  с, что является достаточно длительным промежутком времени.

В выполненном анализе  $\delta\Phi_{pl}$  является входной величиной, а  $\Phi_d$  неизвестной величиной, в то время как в задачах диагностики должно быть наоборот. В качестве основного вывода для диагностики быстрых процессов в схеме с одной петлёй предлагается применять алгоритм восстановления, основанный на уравнении типа (7) с  $h$ , определённой по  $\Phi_d$  и  $d\Phi_d/dt$ . Благодаря этому может быть улучшена точность нахождения  $\delta\Phi_{pl}(\Phi_d)$ , оценённая в [10].

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

- Разработана методика идентификации для получения линейных моделей токамака, близких по свойствам к нелинейным моделям кода ДИНА и синтеза регуляторов магнитного управления положением, формой и током плазмы токамака с учетом инженерных ограничений системы электрического питания.
- Созданы программно-вычислительные комплексы в среде Matlab-Simulink на основе кода ДИНА для синтеза регуляторов магнитного управления положением, формой и током плазмы токамака и численного

моделирования сценариев разрядов в плазме Т-15МД на коде ДИНА с замкнутой обратной связью и различными внешними возмущениями.

- Обосновано применение аналитической модели эволюции полоидального тока в стенке камеры токамака, использование которой устраняет недостаток стандартного филаментного представления проводящих структур токамака при моделировании эволюции плазмы в нём.
- Получены результаты численного расчета электромагнитных нагрузок на камеру Т-15МД при тепловом срыве с учётом полоидального тока, которые хорошо согласуются с выполненными ранее аналитическими оценками таких нагрузок для токамака круглого сечения.
- Выполнено численное и аналитическое обоснование влияние полоидального тока в резистивной камере на диамагнитную диагностику плазмы. Приведен метод математической обработки диамагнитного сигнала с учётом уравнения эволюции полоидального тока, который позволяет в реальном времени разрешать быстрые процессы. Обоснованы рекомендации по применению схемы диагностики с одной петлёй с установкой обмотки для измерения тороидального поля снаружи камеры.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

#### **Статьи в научных рецензируемых изданиях:**

1. Докука В.Н., Дубров М.Л., Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э., Соколов М.М., Моцкин Ю.Я. Программный комплекс для разработки сценариев разряда в токамаке Т-15 // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. 2016. Том 39, № 4, с. 95, [http://vant.iterru.ru/vant\\_2016\\_4/9.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2016_4/9.pdf).
2. Дубров М.Л., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р., Докука В.Н., Соколов М.М. Построение линейных моделей методом идентификации плазмы для синтеза регуляторов системы управления плазменным шнуром токамака Т-15 // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. 2017. Том 40, № 1, сс. 56-67, [http://vant.iterru.ru/vant\\_2017\\_1/6.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2017_1/6.pdf).
3. Дубров М.Л., Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э., Соколов М.М.. Разработка регуляторов для магнитного управления плазмой токамака // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. 2018. Том 41, № 2, с. 71, [http://vant.iterru.ru/vant\\_2018\\_2/8.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2018_2/8.pdf).
4. Дубров М.Л., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р., Докука В.Н. Анализ электромагнитных сил в вакуумной камере токамака за счёт индуцированного



полоидального тока после теплового срыва // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. 2019. Том 42, № 1, с. 39, [http://vant.iterru.ru/vant\\_2019\\_1/3.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2019_1/3.pdf).

5. **Dubrov M.L.**, Pustovitov V.D. Diamagnetic diagnostics of rapid events in the T-15MD tokamak // Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. Vol. 61, p. 065018.

#### Доклады на международных конференциях:

1. Khayrutdinov R.R., **Dubrov M.L.**, Lukash V.E., Sokolov M.M., Khayrutdinova V.A., Dokuka V.N. Development of tokamak plasma vertical control system with neutral point taking into account // 42<sup>nd</sup> EPS Conf. Plasma Phys., Lisbon, Portugal. 22 – 26 June 2015. P2.180.
2. **Dubrov M.L.**, Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., Sokolov M.M., Dokuka V.N. Development of linear models for T-15 plasma control system // 43<sup>rd</sup> EPS Conf. Plasma Phys., Leuven, Belgium. 4 – 8 July 2016. P2.25.
3. **Dubrov M.L.**, Sokolov M.M., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., Mozkin Yu.A., Khvostenko P.P., Kuzmina G.S. Architecture and Platform of Plasma Control System T-15 // Proc. 29<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology, Prague, Czech Republic. 5 – 9 September 2016.
4. Lukash V., Aleynikov P., Aleynikova K., Gribov Yu., **Dubrov M.**, Khayrutdinov R., Kiramov D., Konovalov S., Lehnen M., Leonov V., Pustovitov V., Zhogolev V. Advances in Numerical Modelling of MGI Mitigated Disruptions in ITER // 26<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference. 2016. TH/P1-16.
5. **Dubrov M.L.**, Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., Dokuka V.N., Sokolov M.M. Modeling control of diverted plasma of the T-15 tokamak // 44<sup>th</sup> EPS Conf. On Plasma Physics, Belfast, Northern Ireland. 26 – 30 June 2017. FTP/P4.154, <http://ocs.ciemat.es/EPS2017PAP/pdf/P4.154.pdf>.
6. **Dubrov M.L.**, Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., Sokolov M.M. Modeling of plasma position and shape control during termination of T-15 discharges // 45<sup>th</sup> EPS Conf. Plasma Phys., Prague, Czech Republic. 2 – 6 July 2018. P2.1073.

#### Патенты:

1. TFIIdent: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017617503, Российская Федерация / **Дубров М.Л.**; правообладатель «НИЦ КИ» (RU) Федерация; заявл. 16.03.2017; опубл. 05.07.2017.
2. Программа расчёта регуляторов системы магнитного управления плазмой токамака «IdenReg»: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019614486, Российская Федерация / **Дубров М.Л.**; правообладатель «Росатом» (RU); заявл. 27.03.2019; опубл. 05.04.2019.

### Список литературы, цитируемой в автореферате

1. Azizov E.A. et al. Status of project of engineering-physical tokamak // In: 23<sup>rd</sup> IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea. 2010. October 11-16, FTP/P6-01.
2. Sushkov A. et al. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak // Fusion Eng. Des. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.073>.
3. Khvostenko P.P. et al. Tokamak T-15MD – two years before the physical start-up // Fusion Eng. Des. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.018>.
4. Gribov Y., Humphreys D. et al. Chapter 8: Plasma operation and control // Nucl. Fusion. 2007. Vol. 47, pp. 385-403.
5. Angoletta M.E. et al. Real Time Control of Plasma Boundary in JET // Proc. 19<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology, Lisbon, Portugal. 1996. September, p. 949.
6. Khayrutdinov R.R. and Lukash V.E. Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-Variable Technique // Journal of Computational Physics. 1993. Vol. 109, № 2, pp. 193-201.
7. Pustovitov V.D., Kiramov D.I. Local and integral forces on the tokamak wall // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. Vol. 60, p. 045011.
8. Khayrutdinov R.R. et al. Local and integral forces on the vacuum vessel during thermal quench in the ITER tokamak // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. Vol. 58, p. 115012.
9. Riccardo V., Andrew P.L., Kaye A.S. and Knoll P. Disruption Design Criteria for Joint European Torus In-Vessel Components // Fusion Science Technol. 2003. Vol. 43, № 4, pp. 493-502.
10. Fresa R. et al. Sensitivity of the diamagnetic sensor measurements of ITER to error sources and their compensation // Fusion Eng. Des. 2015. Vol. 100, p.133.
11. Besshou S. et al. Diamagnetic double-loop method for a highly sensitive measurement of energy stored in a Stellarator plasma // Rev. Sci. Instrum. 2001. Vol. 72, p. 3859.
12. Joffrin E. and Defrasne P. Differential method for the real time measurement of the diamagnetic  $\beta$  and internal inductance in Tore Supra // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73, p. 2266.
13. Bak J.G., Lee S.G. and Ga E.M. Diamagnetic loop for the first plasma in the KSTAR machine // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79, p. 10F118.
14. Bak J.G., Lee S.G. and Kim H.S. Diamagnetic loop measurement in Korea Superconducting Tokamak Advanced Research machine // Rev. Sci. Instrum. 2011. Vol. 82, p. 063504.

15. Lister J.B. et al. Linear and non-linear plasma equilibrium responses on the JT-60U and TCV tokamaks // *Fusion Eng. Des.* 2001. Vol. 56-57, pp. 755-759.
16. Khayrutdinov R.R. et al. Comparing DINA code simulations with TCV experimental plasma equilibrium responses // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2001. Vol. 43, pp. 321-342.
17. Humphreys D.A. et al. High performance integrated plasma control in DIII-D // *Fusion Eng. Des.* 2005. Vol. 74, № 1-4, pp. 665-669.
18. Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р., Кавин А.А. Синтез и моделирование системы магнитного управления плазмой в токамаке КТМ // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез.* 2008. Вып. 1, сс. 12-25.
19. Lukash V.E. et al. Simulations of ITER scenarios // *Plasma Devices and Operations.* 2005. Vol. 13, № 2, pp. 143-156.
20. Haney S.W., Freidberg J.P. Variational methods for studying tokamak stability in the presence of a thin resistive wall // *Phys. Fluids B: Plasma Phys.* 1989. Vol. 1, № 8, p. 1637.
21. Albanese R., Coccoresse V., Rubinacci G. Plasma Modelling for the Control of Vertical Instabilities // *Nuclear Fusion.* 1989. Vol. 29, № 6.
22. Ljung L. *System identification: theory for the user* // Englewood Cliffs. 1987.
23. Митришкин Ю.В. и др. Синтез и моделирование двухуровневой системы магнитного управления плазмой токамака-реактора // *Физика плазмы.* 2011. Вып. 37, № 4, с. 307.
24. *Control System Toolbox: User's Guide* // Math Works. 2016.
25. Demmel W. *Applied Numerical Linear Algebra* // Philadelphia: SIAM. 1997.
26. ITER IT documentation, Control System Design and Assessment // G 45 FDR 1 01-07-13 R1.0. 2001. Appendix D, "Plasma Current, Position and Shape Control".
27. Ambrosino G. et al. Plasma strike-point sweeping on JET tokamak with the eXtreme shape controller // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36, № 3, pp. 834-840.
28. De Vries P.C. et al. Multi-machine analysis of termination scenarios with comparison to simulations of controlled shutdown of ITER discharges // *Nucl. Fusion.* 2018. Vol. 58, p. 026019.
29. Humphreys D. et al. Experimental vertical stability studies for ITER performance and design guidance // *Nucl. Fusion.* 2009. Vol. 49, p. 115003.
30. ITER Physics Basis // *Nucl. Fusion.* 1999. Vol. 39, p. 2251.
31. Hender T.C. et al. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions // *Nucl. Fusion.* 2007. Vol. 47, p. 128-202.

32. Pustovitev V.D. Disruption-induced poloidal currents in the tokamak wall // Fusion Eng. Des. 2017. Vol. 117, pp. 1-7.
33. Villone F. et al. Electromagnetic disruption analysis in IGNITOR // Fusion Eng. Des. 2015. Vol. 93, p. 57-68.
34. Mukhovatov V.S. and Shafranov V.D. Plasma equilibrium in a Tokamak // Nucl. Fusion. 1971. Vol. 11, p. 605.
35. Moret J.M., Buhlmann F. and Tonetti G. Fast single loop diamagnetic measurements on the TCV tokamak // Rev. Sci. Instrum. 2003. Vol. 74, p. 4634.
36. Strait E.J. Magnetic diagnostic system of the DIII-D tokamak // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77, p. 023502.
37. Giannone L. et al. Note: Internal diamagnetic flux measurements on ASDEX Upgrade // Rev. Sci. Instrum. 2018. Vol. 89, p. 106101.
38. Pustovitev V.D. Extended theory of diamagnetic measurements with account of the wall currents in tokamaks // Fusion Eng. Des. 2019. Vol. 138, p. 53.
39. ITER Physics Expert Group on Disruptions, Plasma Control and MHD, ITER Physics Basis Editors // Nucl. Fusion. 1999. Vol. 39, p. 2251.
40. Gribov Y., Pustovitev V.D. Analytical study of RWM feedback stabilization with application to ITER // In: Proc. 19<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conf. Lyon. 2002. CT/P-12  
[http://pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp\\_019c/html/nodel174.htm#40432](http://pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_019c/html/nodel174.htm#40432).