

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Корнев Павел Сергеевич

**Динамические модели для магнитного управления формой и
положением плазмы в токамаках Глобус-М2 и ИГНИТОР**

1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре физико-математических методов управления физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители

– *Митришкин Юрий Владимирович*
доктор технических наук, профессор
Галяев Андрей Алексеевич
доктор технических наук, чл.-корр. РАН

Официальные оппоненты

– *Боголюбов Александр Николаевич*
доктор физико-математических наук,
профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра
математики, профессор
Романников Александр Николаевич
доктор физико-математических наук,
Акционерное общество "Государственный
научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований", научный
руководитель по плазменным технологиям
и управляемому термоядерному синтезу
Степаненко Александр Александрович
кандидат физико-математических наук,
доцент, Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», кафедра
физики плазмы, доцент

Защита диссертации состоится «26» декабря 2024 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. 5-19.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3248>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



И.Н. Карташов

Общая характеристика работы

Актуальность и степень научной разработанности темы исследования

Одной из наиболее актуальных задач современной науки является разработка технологий управляемого термоядерного синтеза. В реакциях термоядерного синтеза энергия вырабатывается в результате слияния ядер легких элементов. Топливо для термоядерного синтеза, такое как дейтерий и тритий, обильно распространено в природе. Эти изотопы водорода гораздо более доступны, чем традиционные ископаемые источники энергии, такие как нефть, уголь и газ, и лишены их главного недостатка – термоядерный синтез не производит парниковых газов и выбросов вредных веществ. Таким образом, управляемый термоядерный синтез является потенциально неограниченным и экологически чистым источником энергии для человечества.

Установки типа **токамак** – тороидальная камера с магнитными катушками, являются наиболее перспективными устройствами для осуществления управляемого термоядерного синтеза и создания термоядерных электростанций. Они представляют собой тороидальные камеры, в которых горячая плазма (ионизованный газ) создается и удерживается с помощью сильного магнитного поля, создаваемого катушками токамака и током, протекающим по самой плазме. Токамаки были изобретены в 1950-х годах в СССР (Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова). С тех пор исследования и разработка токамаков продолжают в разных странах по всему миру. Международный термоядерный экспериментальный реактор ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), сооружаемый во Франции (г. Кадараш), является самым крупным и амбициозным проектом в области токамаков в настоящее время. Целью ITER является получение импульса плазмы высокой температуры длительностью в 400 с и отношением выработанной энергии к затраченной $Q > 10$. После создания реактора ITER планируется начать работы по созданию термоядерного реактора DEMO (DEMOstration Power Plant), задачей которого будет демонстрация возможности коммерческого использования термоядерных реакторов.

Ключевую роль в достижении и поддержании условий для управляемого термоядерного синтеза играет управление плазмой посредством электромагнитного поля в вакуумной камере токамака, называемое магнитным управлением. Магнитное управление используется для удержания плазмы внутри камеры и предотвращения ее контакта со стенками камеры. Эта задача имеет особую значимость, поскольку в современных токамаках используются плазменные конфигурации с вытянутым вдоль вертикали сечением, обеспечивающие повышенное давление плазмы по сравнению с плазмой круглого сечения, но неустойчивые относительно сдвигов плазмы вдоль вертикали. Требуемая форма сечения плазмы также обеспечивается полоидальными магнитными полями, создаваемыми катушками. Управление токами в магнитных катушках токамаков позволяет индуктивно менять

протекающий по плазме ток, и приводить его к желаемому значению. Наконец, плазма в токамаках подвержена множеству магнитогидродинамических неустойчивостей, способных привести к срыву плазменного разряда, но при наличии системы магнитного управления, эффект некоторых неустойчивостей может быть подавлен, и плазма возвращена к желаемым положению, форме и току (малый срыв плазмы).

Для создания систем магнитного управления плазмой необходимы ее линейные математические модели, описывающие динамику положения, тока и формы плазмы в зависимости от подаваемых на катушки токамака напряжений. В мировой практике такие модели рассчитываются из первых принципов (first principles) на основе уравнений Кирхгофа для контуров тока в токамаке и уравнений движения плазмы [1, 2], либо при помощи линеаризации нелинейных плазмо-физических кодов [3] или посредством идентификации¹ [4]. Предварительный анализ линейной модели плазмы в токамаке позволяет выявить требования к системе управления плазмой и возможные недостатки в структуре токамака, в частности, в расположении катушек полоидального поля [5, 6].

В то же время, для эффективной работы систем управления формой плазмы необходимы средства диагностики формы. Плазма в токамаках достигает температур в десятки миллионов градусов, и поэтому ее форма должна быть оценена по измерениям магнитных полей и потоков вне плазмы. Эта обратная задача называется задачей восстановления равновесия плазмы в токамаке. На токамаке ASDEX Upgrade (Германия) для ее решения применяется метод функциональной параметризации (Function Parametrization) [7], в котором регрессионный анализ используется для выражения параметров формы плазмы через измеряемые сигналы без учета физики задачи. Однако, более распространенным в мире является использование программных кодов, подбирающих МГД равновесия плазмы, удовлетворяющие уравнениям электродинамики и гидродинамики, и согласующиеся с измерениями токамака. Самым известным из таких кодов является EFIT (Equilibrium Fitting - подгонка под равновесие) [8], позволяющий восстановить равновесие плазмы после проведения разряда. Для работы систем управления формой плазмы, однако, требуются алгоритмы, способные восстановить равновесие плазмы в реальном времени [9], что становится особенно актуальным для таких токамаков, как Глобус-М2 (Россия), обладающих малой длительностью плазменных разрядов, порядка десятков и сотен миллисекунд.

Объектом исследования является плазма в токамаке.

Предметом исследования являются математические модели плазмы необходимые для разработки, моделирования и применения систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках.

¹ Идентификация – построение математической модели объекта управления по данным наблюдения его входных и выходных сигналов.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель работы состоит в создании и анализе математических моделей плазмы, необходимых для разработки и моделирования систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм восстановления равновесия плазмы, позволяющий определять форму и положение плазмы в ходе разряда на токамаке Глобус-М2 для применения в замкнутом контуре системы магнитного управления плазмой.

2. Построить линейную нестационарную динамическую модель плазмы в токамаке Глобус-М2 для применения при синтезе и анализе систем управления положением, током и формой плазмы.

3. Построить нелинейную нестационарную динамическую модель плазмы в токамаке Глобус-М2 для моделирования работы систем управления положением, током и формой плазмы, и проверки устойчивости систем к малым срывам плазмы.

4. Построить линейную динамическую модель плазмы в проекте токамака ИГНИТОР и провести ее анализ для выработки рекомендаций по модификации системы катушек полоидального магнитного поля в токамаке ИГНИТОР с целью улучшения качества магнитного управления плазмой и повышения запасов устойчивости в замкнутой системе управления.

Методы исследования

При создании математических моделей плазмы в токамаках использовались уравнения электродинамики, магнитной гидродинамики и физики плазмы. При численном моделировании плазмы использовались методы математической физики и численные методы решения дифференциальных уравнений. При анализе математических моделей плазмы применялись методы линейной алгебры и теории управления.

Научная новизна работы

- Был разработан *новый* метод моделирования токов в камере токамака, позволяющий сократить необходимое для моделирования количество вычислений. Данный метод был применен в новом алгоритме восстановления равновесия плазмы FCDI (Flux and Current Distributions Identification) в реальном времени в токамаке. Алгоритм FCDI может работать в двух режимах: FCDI-FF (Fixed Filaments), восстанавливающий плазму методом неподвижных филаментов, и FCDI-IT (Iterative), итерационно восстанавливающий распределение плотности тока плазмы в виде полиномов от полоидального магнитного потока. Алгоритм был внедрен на токамаке Глобус-М2, став первым алгоритмом восстановления

равновесия плазмы, который может быть использован в обратной связи системы управления формой плазмы на токамаке Глобус-М2.

- *Впервые*, на основе восстановленных равновесий были построены линейные нестационарные динамические модели плазмы в токамаке Глобус-М2, учитывающие изменение параметров плазмы в течение разряда токамака.
- Для моделирования работы систем магнитного управления плазмой с учетом изменения параметров плазмы в течение разряда был разработан *новый* магнитный эволюционный код ТРМЕС (Tokamak Plasma Magnetic Evolution Code). В отличие от плазмозфизических кодов таких как DINA [11], разработанный магнитный эволюционный код не моделирует излишние для задач магнитного управления процессы переноса в плазме, и потому работает значительно быстрее, что позволяет существенно ускорить синтез и моделирование систем магнитного управления плазмой.
- *Впервые*, был применен метод анализа величины областей управляемости по вертикали и переходных функций по горизонтали построенных моделей плазмы, для определения оптимального расположения катушек токамака для управления горизонтальным и вертикальным положением плазмы. Данный метод был применен для оптимизации расположения катушек проектного токамака ИГНИТОР.

Теоретическая и практическая значимость работы

Задача магнитного управления плазмой и модели плазмы, построенные для ее решения, обладают большой значимостью для развития управляемого термоядерного синтеза, и являются ключевыми для будущих проектов по термоядерному синтезу, таких как DEMO. Результаты работы могут внести вклад в разработку и оптимизацию будущих коммерческих термоядерных реакторов. Достоверное моделирование плазмы позволяет проводить виртуальные эксперименты, что способствует оптимизации плазменных разрядов и планированию будущих экспериментов в токамака и сокращает затрачиваемые на физические эксперименты время и ресурсы. Качественное моделирование плазмы необходимо для разработки эффективных систем управления плазмой в токамаках, обеспечивающих устойчивость и точность работы установки. Анализ полученных моделей плазмы позволяет расширить понимание механизмов магнитного управления и стабилизации плазмы в токамаках, а также позволяет выявлять недостатки в конструкции токамаков на этапе конструирования и своевременно вносить изменения в полоидальную систему токамаков, необходимых для исправления найденных недостатков и обеспечения оптимальной работы токамаков.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность разработанных моделей обеспечивается за счет использования известных физических законов и строгого математического аппарата при их создании, и согласованностью результатов моделирования с

реальными экспериментами. Достоверность работы разработанного алгоритма восстановления равновесия плазмы подтверждается согласованностью результатов восстановления с результатами работы других существующих кодов восстановления, а также с экспериментальными данными токамака Глобус-М2. Возможность работы разработанного алгоритма восстановления в реальном времени подтверждается моделированием на целевой машине Speedgoat Performance, входящую в обратную связь системы магнитного управления плазмой на цифровом стенде реального времени. Достоверность работы разработанных алгоритма восстановления и линейных моделей плазмы также подтверждается моделированием на плазмозфизическом коде DINA, представляющем собой нелинейную нестационарную модель плазмы с распределенными параметрами.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный алгоритм FCDI (Flux and Current Distribution Identification) для идентификации равновесия плазмы по магнитным измерениям в токамаках восстанавливает равновесие в реальном времени на токамаке Глобус-М2 за 16 мкс в режиме FCDI-FF (Fixed Filaments) и за 200 мкс в режиме FCDI-IT (Iterative).

2. Линейные нестационарные динамические модели плазмы, построенные на основе восстановленных равновесий, могут применяться для синтеза и анализа систем управления положением, током и формой плазмы с учетом возмущений типа малый срыв.

3. Разработанный нелинейный нестационарный магнитный эволюционный код ТРМЕС (Tokamak Plasma Magnetic Evolution Code) позволяет моделировать работу систем управления положением, током и формой плазмы при действии малых срывов.

4. Метод анализа линейных моделей плазмы позволяет определить изменения в системе катушек полоидального поля токамаков, повышающие качество и внутреннюю устойчивость магнитного управления плазмой.

Соответствие паспорту специальности 1.3.9.

В работе представлены методы и модели предназначенные для диагностики формы, положения и тока плазмы в токамаке, а также разработки систем управления этими параметрами плазмы, необходимых для работы современных токамаков. Таким образом работа соответствует следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 1.3.9:

- Управляемый термоядерный синтез с магнитным и инерциальным удержанием, пинчи, лазерный синтез и т.п.
- Разработка новых приборов и методов для изучения динамики плазмы: волны, неустойчивости, течения, нелинейные явления (самоорганизация, структуры, турбулентность и т.п), аномальный перенос, электромагнетизм и т.п.

- Разработка новых методов и создание новых приборов для диагностики плазмы.

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты, полученные автором лично за период 2014-2023 гг. Представленные в диссертации модели и алгоритмы для токамаков Глобус-М/М2 и ИГНИТОР разработаны и реализованы автором лично.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих национальных и международных конференциях:

- 11-ая и 17-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (УБС), г. Арзамас, 2014; г. Москва, 2021.
- The 20th and 21st International Federation of Automatic Control World Congress (IFAC), Toulouse, France, 2017, Berlin, Germany, 2020.
- XIV Международный симпозиум «Интеллектуальные системы» (INTELS), Москва, 2020;
- XIV международная конференция «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого), г. Москва, 2018;
- Научная конференция «Ломоносовские чтения. Секция Физика», г. Москва, 2017.
- The 41th and 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS), Berlin, Germany, 2014, Prague, Czech Republic, 2018.

Публикации

По результатам диссертации опубликованы 16 статей в рецензируемых журналах, индексируемых RSCI/Web of Science/Scopus, и зарегистрировано 2 патента. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем – 116 страниц, работа содержит 5 таблиц, 32 рисунка, список литературы из 86 наименований и приложение.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы и решаемые задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, показана достоверность и обоснованность результатов, представлены положения, выносимые на защиту, приведена информация об апробации результатов работы и личному вкладу автора.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы

управляемого термоядерного синтеза, описаны основные вызовы и препятствия на пути к созданию термоядерного реактора для выработки энергии, а также рассмотрены возможности их преодоления. Особое внимание уделено установкам типа токамак, как наиболее перспективным для создания термоядерного реактора.

Сформулированы цели и задачи магнитного управления положением, током и формой плазмы, необходимого для функционирования современных токамаков с вытянутым по вертикали поперечным сечением. Отмечена важность восстановления равновесия плазмы по магнитным измерениям вне плазмы в реальном времени в контексте этой задачи и необходимость качественного моделирования плазмы для синтеза регуляторов систем магнитного управления. Приведен обзор используемых в мире алгоритмов восстановления равновесия и моделей плазмы в системах магнитного управления плазмой в токамаках.

Во второй главе [A1, A2, A3, A5, A10, A11, A12, П2] рассматривается задача восстановления равновесия плазмы в токамаке. Ограничивающая плазму токамака магнитная поверхность может быть найдена как поверхность равного уровня функции полоидального магнитного потока:

$$\psi(r, z) = \int_0^r r' B_z(r', z) dr'.$$

Распределение полоидального потока, описывающее равновесие плазмы в токамаке, определяется дифференциальным уравнением в частных производных:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\mu_0 r J_\phi,$$

$$\psi|_{r=0} = 0, \quad \psi|_{r^2+z^2 \rightarrow \infty} = 0.$$

Здесь J_ϕ – плотность тороидального тока в токамаке. В области плазмы S_p уравнение равновесия принимает форму уравнения Грэда-Шафранова:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\mu_0 r^2 p'(\psi) - F'(\psi) F(\psi), \quad (r, z) \in S_p,$$

где p – давление плазмы, F – функция полоидального тока $F = rB_\phi$.

Дано описание датчиков магнитной диагностики токамака, а именно поясов Роговского и магнитных петель, показания которых используются для восстановления равновесия.

В задаче восстановления равновесия необходимо найти распределение плотности тороидального тока J_ϕ и соответствующее ему распределение полоидального потока ψ , удовлетворяющие уравнению равновесия плазмы и минимизирующие квадратичный функционал невязки

$$\chi^2(J_\phi, \psi) = \sum_i w_i^2 (d_i^M - d_i(J_\phi, \psi))^2,$$

где d_i^M и d_i – значения i -го сигнала диагностики и соответствующей ему

восстановленной величины, w_i^2 – положительные весовые коэффициенты.

Дано описание алгоритма FCDI, разработанного для восстановления равновесия плазмы на токамаке Глобус-М2 в реальном времени. Алгоритм FCDI включает в себя режим FF, в котором плазма аппроксимируется набором филаментов (токовых колец) с заданными пользователем координатами, соответствующим плотности тороидального тока плазмы:

$$J_p = \sum_k I_k \delta(r - r_k, z - z_k),$$

и режим IT, в котором уравнение Грэда-Шафранова решается итерационно с функциями $p'(\psi)$ и $F'(\psi)F(\psi)$, аппроксимируемыми полиномами от полоидального потока $\psi(r, z)$ предыдущей итерации:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \psi^{(n+1)} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi^{(n+1)} = -\mu_0 r^2 p'(\psi^{(n)}) - F'(\psi^{(n)})F(\psi^{(n)}), \quad (r, z) \in S_p.$$

Коэффициенты полиномов, токи в филаментах и величины токов в камере токамака находятся минимизацией квадратичного функционала ошибок χ^2 между измеренными и получаемыми алгоритмом значениями полоидального потока на магнитных петлях и тока плазмы, а также между восстановленными величинами наведенных в камере токамака токов и их оценкой, рассчитанной согласно закону Фарадея по измеренным токам катушек и плазмы.

Для уменьшения количества вычислений, необходимых для восстановления равновесия, в алгоритме FCDI используется новый метод моделирования токов в камере токамака, заключающийся в разложении наводимых в камере токов на индуктивно независимые токовые моды, и отбрасывании токовых мод с малыми временами затухания. Данный метод позволил сократить размерность задачи и моделировать токи на камере токамака Глобус-М2, состоящей из 56-ти проводящих элементов, решая систему из 9-ти дифференциальных уравнений первого порядка вместо 56-ти. Качество восстановления при этом практически не изменяется – средний модуль разности между восстановленными и измеренными сигналами диагностики при уменьшении числа используемых мод увеличивается менее чем на 1%.

Описаны численные методы, используемые в программной реализации алгоритма, позволившие ему восстанавливать равновесие за 200 мкс в режиме FCDI-IT на сетке 33×33 , и за 16 мкс в режиме FCDI-FF с 14 филаментами на нерегулярной сетке из 1000 точек, что достаточно для работы в реальном времени на токамаке Глобус-М2. Моделирование с использованием полной модели камеры показало быстроедействие 28 мкс в режиме FCDI-FF и 1,5 мс в режиме FCDI-IT. Измерение быстроедействия проводилось на целевой машине реального времени Speedgoat Performance с процессором Intel i7-7700K, работающим на частоте 4,2 ГГц.

Алгоритм FCDI был реализован в программной среде MATLAB/Simulink и внедрен в рабочий процесс токамака Глобус-М2 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург (имеется акт о внедрении).

Третья глава [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A8, A9, A10, A12, A13, A14, A15,

A16, П1] посвящена построению линейных моделей плазмы токамака для синтеза и настройки регуляторов магнитного управления и моделирования их работы в замкнутых системах магнитного управления.

Подробно описывается методика построения линейной модели плазмы «из первых принципов». «Первыми принципами» являются закон Фарадея для контуров тока в токамаке и уравнение движения плазмы:

$$\frac{d}{dt}\Psi(J_p, I) + RI = U, \quad m \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_p = \vec{F}(J_p, I).$$

Для конфигураций плазмы с достаточно большим временем развития неустойчивости вертикального положения плазмы массой плазмы можно пренебречь, и уравнение движения плазмы принимает вид уравнения баланса действующих на плазму сил

$$\vec{F}(J_p, I) = 0.$$

Вектор токов I включает в себя токи в катушках полоидального поля токамака, ток плазмы и токи на камере токамака. При этом может быть использовано представление токов камеры через индуктивно независимые токовые моды, описанное в предыдущей главе. Как и в задаче восстановления равновесия, токовые моды с малыми временами затухания могут быть отброшены, уменьшая размерность результирующей модели.

Для описания формы плазмы в токамаке используются вектор дескрипторов формы:

$$g = g(J_p, I).$$

В зависимости от поставленной задачи управления, дескрипторы g могут включать в себя зазоры между плазмой и камерой токамака, параметры формы плазмы, такие как вытянутость и треугольность, либо значения полоидального потока и магнитного поля в точках желаемого положения границы плазмы.

Для получения линейной модели, эти уравнения должны быть линеаризованы вблизи восстановленного или полученного другим образом равновесия плазмы. При этом используется приближение «жесткой плазмы», в котором плазма может перемещаться горизонтально и вертикально, сохраняя форму распределения плотности тороидального тока. Линеаризованные уравнения имеют вид:

$$L \frac{d}{dt} \delta I + \frac{\partial}{\partial \vec{r}_p} \Psi \frac{d}{dt} \delta \vec{r}_p + R \delta I = \delta U,$$

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial I} \delta I + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{r}_p} \delta \vec{r}_p = 0, \quad \delta g = \frac{\partial g}{\partial I} \delta I + \frac{\partial g}{\partial \vec{r}_p} \delta \vec{r}_p.$$

Вводя вектор входов $u = \delta U$, вектор выходов $y = \left[\delta \vec{r}_p^T \quad \delta I^T \quad \delta g^T \right]^T$ и вектор состояний $x = \delta I$, линеаризованные уравнения приводятся к стандартному виду линейной модели в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du.$$

В таких моделях для плазмы современных токамаков, матрица A имеет одно положительное собственное значение, отражающее неустойчивость вертикального положения вытянутой по вертикали плазмы, и равное инкременту неустойчивости.

В ряде задач возникает необходимость построить модель плазмы в токамаке с работающей системой управления вертикальным положением плазмы, точные передаточные функции регуляторов которой неизвестны. В этом случае положение плазмы описывается уравнением:

$$\tau \frac{d}{dt} \delta z_p + \delta z_p = \delta z_{ref},$$

заменяющим собой уравнения для контуров тока в управляющих положением плазмы катушках. Здесь δz_{ref} – значение уставки вертикального смещения плазмы, а τ – длительность переходных процессов в системе. В этом случае входы модели включают в себя уставки по положению $u = \begin{bmatrix} \delta U^T & \delta z_{ref} \end{bmatrix}^T$, а состояния включают в себя вертикальное смещение плазмы $x = \begin{bmatrix} \delta I^T & \delta z_p \end{bmatrix}^T$.

Поскольку неустойчивость вертикального положения плазмы компенсируется системой управления, в такой модели матрица A не имеет собственных значений с положительной действительной частью.

Приводится методика моделирования самых вероятных возмущений при работе токамака – возмущений типа «малый срыв», выражающихся в резком падении газокINETического давления плазмы и увеличением пологости распределения плотности тока плазмы [12]. Для моделирования малых срывов

плазме дается еще две степени свободы – полоидальное бета $\beta_p = \frac{8\pi}{\mu_0 I_p^2} \int p dS$,

отражающее относительную величину газокINETического давления плазмы, и

внутренняя индуктивность $l_i = \frac{2}{r_p \mu_0 I_p^2} \int B_p^2 dV$, характеризующая пологость

профиля тока плазмы. Изменения полоидального бета и внутренней индуктивности моделируются через изменения профиля тока плазмы, сопровождающиеся изменением индуктивности плазмы и действующих на

плазму сил. Вводя вектор возмущений $w = \begin{bmatrix} \delta \beta_p & \delta l_i \end{bmatrix}^T$, модель с возмущениями принимает вид:

$$dx / dt = Ax + Bu + Edw / dt, \quad y = Cx + Du + Fw.$$

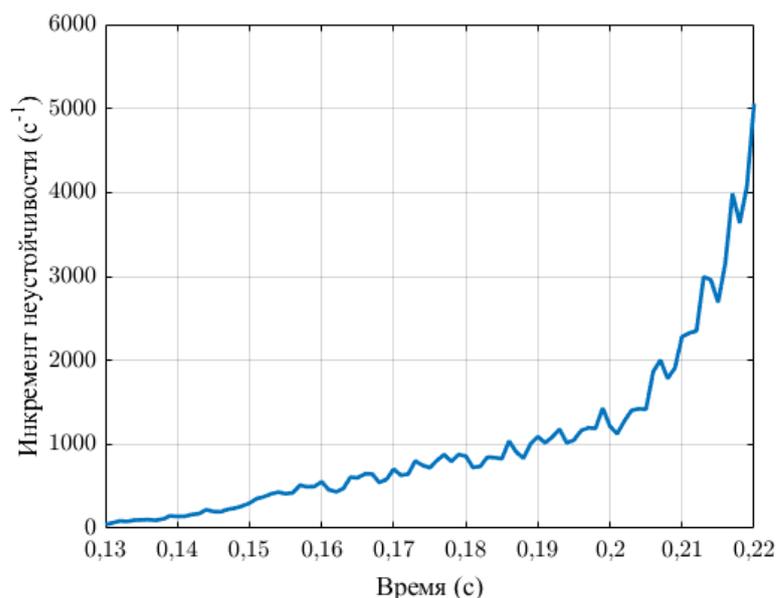


Рис. 1. Инкремент неустойчивости модели плазмы в Глобус-М2 в течение разряда № 43345.

Существующие методики построения линейных моделей плазмы в токамаке обладают существенным недостатком – в них не отражается изменение параметров плазмы в течение разряда, которое может быть весьма значительным. Так, величина инкремента неустойчивости моделей плазмы может меняться на порядок в течение разряда (Рис. 1). Как следствие, модель, построенная для малых отклонений от магнитного равновесия в один момент разряда, может плохо описывать динамику системы в другие моменты разряда. Чтобы отразить изменение параметров плазмы, матрицы линейных моделей для различных временных точек разряда предлагается интерполировать, получая в итоге LPV-модель (Linear Parameter Varying):

$$dx / dt = A(t)x + B(t)u + E(t)dw / dt,$$

$$y = C(t)x + D(t)u + F(t)w.$$

Полученная LPV модель описывает динамику плазмы при малых отклонениях от заданного сценария $I_0(t)$, $\vec{r}_{p0}(t)$. Однако на практике не всегда имеется такой заранее подготовленный сценарий разряда.

Для более точного моделирования плазмы в токамаке необходимо отказаться от предположения о «жесткости» плазмы и допустить эволюцию профиля плотности тока плазмы. Омическое сопротивление плазмы зависит от распределений температуры и плотности плазмы, к тому же градиенты температуры и плотности могут создавать неомический бутстрэп-ток. Таким образом, для расчета распределения тока плазмы необходимо рассматривать процессы переноса частиц и энергии в плазме. Для решения этих задач в мире разработаны ряд плазмозфизических кодов (DINA [11], ASTRA [13], TSC [14]), рассчитывающих эволюцию как кинетических, так и магнитных параметров плазмы. Недостатком данных кодов является большая численная сложность необходимых вычислений и, как следствие, медленная скорость работы.

Для быстрого моделирования эволюции магнитного равновесия

произвольных разрядов плазмы токамака, автором была разработана магнитная эволюционная модель ТРМЕС для плазмы в токамаках, не требующая расчета кинетических параметров. На каждом временном шаге, расчет магнитного равновесия в модели происходит в два этапа (Рис. 2):

1. Расчет линейной модели для текущего равновесия и ее использование для расчета значений полного тока и положения плазмы, а также токов в катушках и элементах камеры токамака для следующего момента времени.

2. Расчет новых распределений полоидального потока и тороидального тока плазмы, а также формы плазмы, удовлетворяющих уравнению Грэда-Шафранова и заданным заранее значениям полоидального бета β_p и внутренней индуктивности l_i .

После чего, для нового равновесия строится новая линейная модель и процесс повторяется.

Рассчитанные токи и положение плазмы используются для перерасчета распределения плотности тока плазмы в соответствии с уравнением Грэда-Шафранова. При этом функции $r'(\psi)$ и $F'(\psi)F(\psi)$ аппроксимируются полиномами от полоидального потока. Коэффициенты полиномов рассчитываются так, чтобы итоговое равновесие удовлетворяло граничным условиям, полученным на предыдущем шаге значениям токов и заданным значениям β_p и l_i .

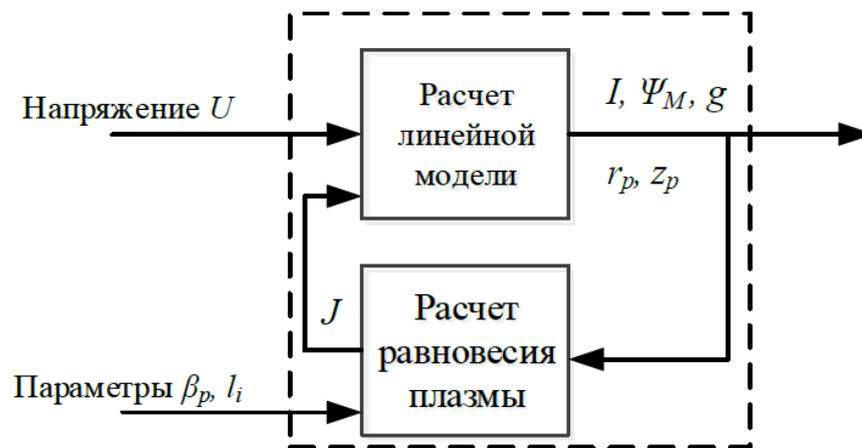


Рис. 2. Блок-схема алгоритма магнитной эволюционной модели ТРМЕС плазмы в токамаке

Разработанная магнитная эволюционная модель плазмы в токамаке была реализована в виде кода на языке MATLAB и применена для моделирования разрядов токамака Глобус-М. Для проверки разработанной модели, рассчитанные при помощи кода магнитные равновесия были сопоставлены с равновесиями, восстановленным по экспериментальным данным магнитной диагностики. Как показано на Рис. 3, рассчитанные формы и положения плазмы совпадают с восстановленными.

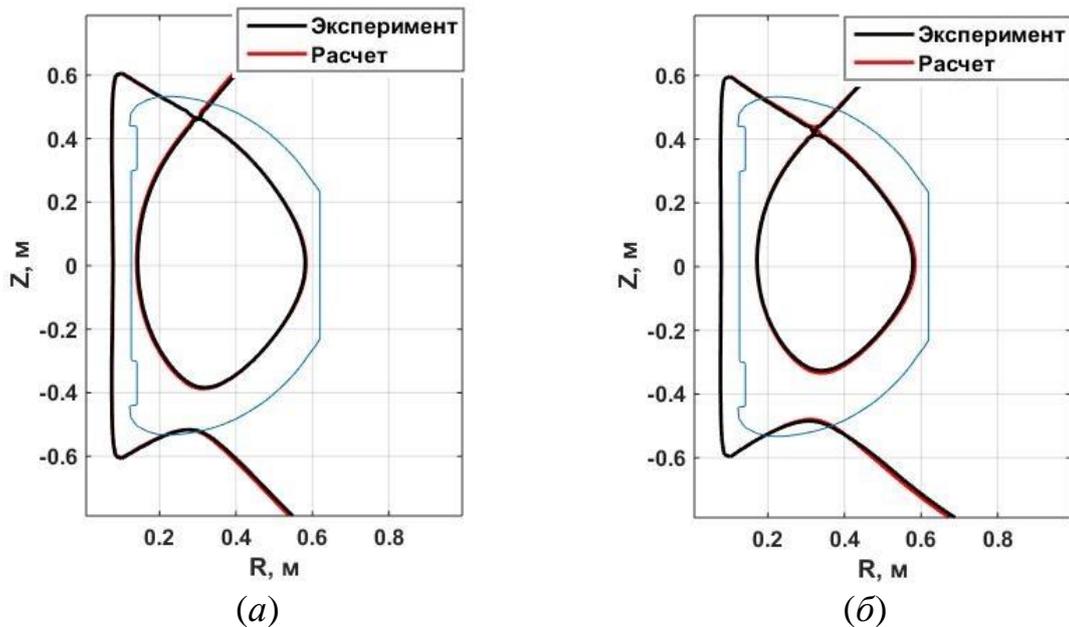


Рис. 3. Сравнение рассчитанных магнитным эволюционным кодом TRMES и восстановленных из эксперимента границ плазмы. Токамак Глобус-М, разряд №31648
(а) $t=180$ мс, (б) $t=200$ мс.

В четвертой главе [А6, А7, А8, А9] рассматривается задача выбора расположения катушек управления положением плазмы в проектируемом токамаке ИГНИТОР для повышения качества магнитного управления плазмой.

Важным параметром, характеризующим надежность и возможности работы системы магнитного управления плазмой, является максимально возможная управляемая величина вертикального смещения плазмы ΔZ_{max} при заданном ограничении напряжения на катушке горизонтального поля, называемая областью управляемости по вертикальной координате. При выходе плазмы за пределы области управляемости система управления в общем случае теряет управление вертикальным положением плазмы, что приводит к VDE (Vertical Displacement Event) – неконтролируемому налету плазмы на стенку камеры и срыву разряда. Большая величина области управляемости позволяет предотвратить VDE, считается, что для устойчивой работы токамака размер области управляемости должен составлять не менее 5% от малого радиуса токамака, желательно не менее 10%.

Рассмотрим модель плазмы вида:

$$\frac{d}{dt}x = Ax + BU, \quad z_p = Cx,$$

где A – матрица размерности $N \times N$, B – матрица размерности $N \times 1$, C – матрица $1 \times N$, U – напряжение на управляющей вертикальным положением плазмы z_p катушке HFC (Horizontal Field Coil), ограниченное величиной U_{max} , $|U_{HFC}| < U_{max}$. Неустойчивость вертикального положения плазмы отражается в существовании единственного положительного собственного значения γ матрицы A , что позволяет перейти к базису в пространстве состояний, в

котором модель принимает вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_s \\ x'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s & 0 \\ 0 & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x'_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_s \\ b_N \end{bmatrix} U,$$

$$z_p = C_s x_s + c_N x'_N,$$

где A_s – матрица размера $N-1 \times N-1$, не имеющая собственных значений с положительной действительной частью и определяющая динамику устойчивой компоненты модели. Значения x_s при этом стремятся к конечным значениям и их вклад в z_p лишь смещает положение равновесия плазмы. Вклад неустойчивой компоненты x'_N способен к неограниченному росту, и для сохранения управляемости необходимо, чтобы система управления могла менять знак производной x'_N . Из уравнения модели следует, что это возможно при выполнении условия

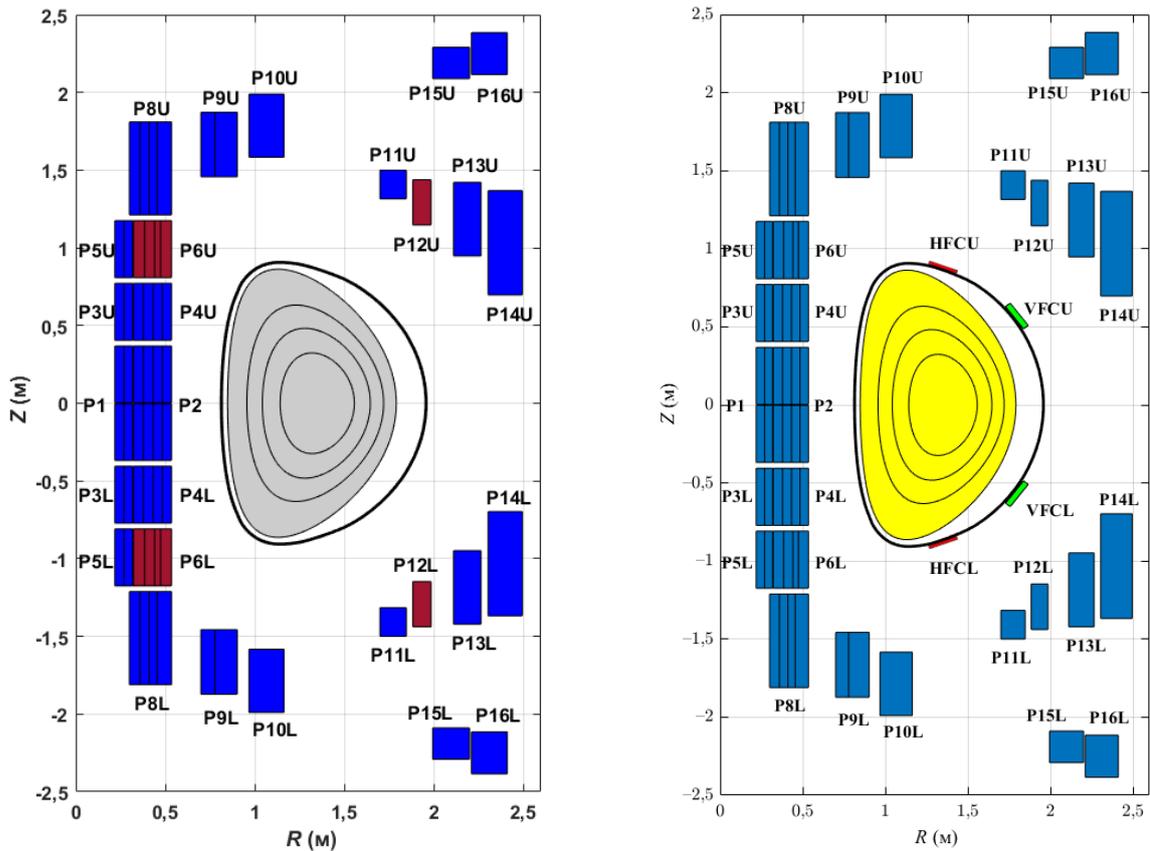
$$|\gamma x'_N| < |b_N U_{\max}|,$$

т.е. система управляема при $|x'_N| < |b_N U_{\max} / \gamma|$, откуда следует, что плазма может быть управляема при отклонении z_p от положения равновесия $|\Delta z_p| < |c_N b_N U_{\max} / \gamma|$. Это условие дает величину области управляемости плазмы по вертикали

$$\Delta Z_{\max} = |c_N b_N U_{\max} / \gamma|.$$

В первоначальном проекте токамака ИГНИТОР планировалось осуществлять управление вертикальным положением плазмы с помощью катушек P6 & P12 (Рис. 4а). Оценка размера области управляемости плазмы в такой конфигурации катушек дала величину $\Delta Z_{\max} = 1,5$ см, при малом радиусе токамака 47 см. Данная величина области управляемости недостаточна для предотвращения VDE. Для предотвращения вызываемых VDE срывов плазмы было предложено ввести новую катушку HFC для управления вертикальным положением плазмы.

Рассматривались двухсекционные катушки HFC, расположенные симметрично относительно центральной горизонтальной плоскости токамака на расстояниях 1 и 2 см от вакуумной камеры, с углом раствора от 20° до 160° градусов (Рис. 4б). Для рассматриваемых расположений катушек были построены линейные модели, и проведена оценка размера области управляемости (Рис. 5а). Максимальный размер области управляемости достигается при угле раствора 88° и расстоянии 1 см между HFC и камерой, и равняется $\Delta Z_{\max} = 37$ см, что составляет 80% от малого радиуса токамака и дает большой запас устойчивости для предотвращения VDE.



(а)

(б)

Рис. 4. Конфигурации полоидальной системы токамака ИГНИТОР. а) Управляющая катушка – пара P6 & P12. б) Новые управляющие катушки HFC и VFC, расположенные вблизи камеры.

Для управления горизонтальным положением плазмы в исходном проекте токамака ИГНИТОР рассматривалась катушка P12 и новая катушка VFC расположенная на расстоянии 1 см от вакуумной камеры токамака. Рассматривались двухсекционные конфигурации катушек VFC с углом раствора от 20° до 160° . Для данных конфигураций катушек были построены линейные модели плазмы, и рассчитаны горизонтальные смещения плазмы при подаваемом на катушку напряжением 100 В (переходные функции модели). Как показано на Рис. 5б, катушка P12 двигает плазму приблизительно на 2,5 мм за 1 с при подаваемом на катушку напряжении 100 В. Использование же двухсекционной VFC с углом раствора секций 40° позволяет усилить влияние управляющей катушки более чем в 4 раза, до 1,1 см за 1 с при подаваемых на катушку 100 В.

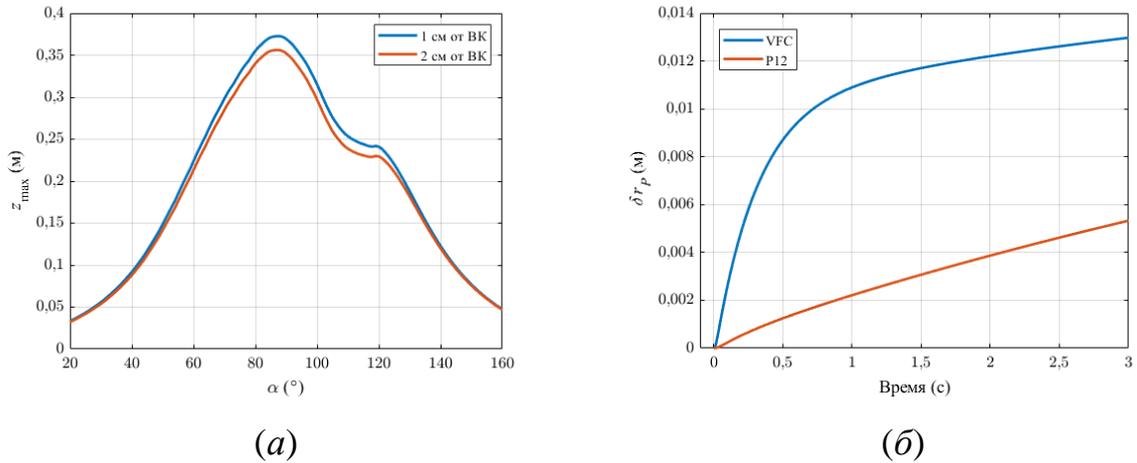


Рис. 5. а) Размер области управляемости в зависимости от угла раствора катушки HFC и расстояния от вакуумной камеры. б) Горизонтальное смещение плазмы при подаче напряжения 100 В на управляющие катушки P12 и оптимально расположенную VFC.

В Заключение сформулированы основные результаты работы:

1. Разработан метод моделирования токов в камере и пассивных структур токамака, заключающийся в разложении токов камеры на индуктивно независимые токовые моды и пренебрежением модами с малым временем затухания. Метод позволяет сократить количество вычислений необходимых для восстановления равновесия плазмы, моделирование показало, что использование 9-ти мод увеличивает погрешность восстановления сигналов магнитной диагностики токамака Глобус-М2 менее чем на 1% по сравнению с полной моделью камеры из 56-ми токовых мод.
2. Разработан алгоритм FCDI (Flux and Current Distribution Identification) для восстановления равновесия плазмы в реальном времени. Алгоритм может работать в двух режимах: FCDI-IT (Iterative), в котором плазма аппроксимируется непрерывным распределением плотности тока, и FCDI-FF (Fixed Filaments), в котором плазма аппроксимируется набором токовых колец с заданными координатами. Алгоритм принимает на вход сигналы магнитной диагностики токамака и выдает геометрические параметры формы плазмы (величины зазоров между плазмой и камерой, положение геометрического центра плазмы, вытянутость и треугольность). Алгоритм реализован в программной среде MATLAB/Simulink. Моделирование на машине реального времени Speedgoat показало, что алгоритм FCDI-IT позволяет восстанавливать равновесие плазмы на численной сетке 33×33 за 200 мкс, что достаточно для применения в реальном времени на токамаках с продолжительностью разряда более 1 с, а алгоритм FCDI-FF за 16 мкс, что достаточно для применения в реальном времени на токамаках с малой продолжительностью разряда, в числе которых и токамак Глобус-М2. Высокая скорость работы достигается использованием метода токовых

мод для моделирования токов в камере токамака – использование полной модели камеры приводит к увеличению времени восстановления равновесия до 1,5 мс для FCDI-IT и 28 мкс для FCDI-FF. Алгоритмы были внедрены в рабочий процесс токамака Глобус-М2 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, где используются для обработки результатов эксперимента.

3. Для токамака Глобус-М2 были построены линейные нестационарные модели движения плазмы, связывающие подаваемые на катушки токамака напряжения с изменением тока, смещением и изменением геометрических параметров плазмы. Построенные модели учитывают изменение инкремента неустойчивости вертикального положения плазмы в течение плазменного разряда и могут использоваться для разработки регуляторов систем магнитного управления плазмы и моделирования их работы на плазменных разрядах близких к опорному, для которого была построена модель.
4. Была разработана нелинейная модель плазмы в токамаке ТРМЕС (Tokamak Plasma Magnetic Evolution Code), позволяющая проводить моделирование работы систем магнитного управления плазмой токамака. В модели ТРМЕС для каждого момента времени проводится расчет линейной динамической модели плазмы в плазме токамака, которая используется для расчета равновесия плазмы в следующий момент времени. Обновление линейной модели плазмы на каждом временном шаге снимает ограничение на близость моделируемого разряда плазмы к опорному, и ТРМЕС позволяет моделировать произвольные плазменные разряды. В отличие от более сложных плазмофизических кодов в модели ТРМЕС не моделируются процессы переноса частиц и энергии в плазме, распределение тока плазмы строится исходя из уравнения Грэда-Шафранова и заданных пользователем значений полоидального бета и внутренней индуктивности плазмы, что обеспечивает более быструю работу модели в сравнении с более сложными алгоритмами. Модель также позволяет моделировать малые срывы плазмы, путем резкого изменения параметров полоидального бета и внутренней индуктивности плазмы, что позволяет моделировать работу систем магнитного управления в условиях развития неустойчивостей плазмы.
5. Система полоидальных катушек проектного токамака ИГНИТОР была проанализирована на возможность управления плазмой токамака. В ходе анализа было установлено, что проектные катушки токамака обеспечивают размер области управляемости вертикальным положением плазмы 1,5 см и позволяют сдвигать плазму на 2 мм за 1 секунду после подачи напряжения 100 В на управляющую катушку, что недостаточно для безопасной работы токамака с малым радиусом 47 см и большим радиусом 1,32 м. Для повышения возможности управления плазмой в токамаке ИГНИТОР было предложено ввести в его полоидальную систему две новые катушки – HFC для управления вертикальным положением плазмы и VFC для управления горизонтальным положением плазмы. Для различных расположений катушек были построены и

проанализированы линейные модели движения плазмы, и было определено оптимальное расположение катушки HFC, позволяющее увеличить размер области управляемости вертикальным положением плазмы до 36 см, что достаточно для безопасной работы токамака, и оптимальное положение катушки VFC, позволяющее смещать плазму по горизонтали на 1,1 см за 1 секунду при подаче напряжения 100 В на VFC.

Список цитируемой литературы

1. Walker M. L., Humphreys D. A. Valid coordinate systems for linearized plasma shape response models in tokamaks // *Fusion science and technology*. – 2006. – V. 50. – P. 473–489. – DOI: 10.13182/FST06-A1271.
2. Yuan Q. P., Xiao B. J., Luo Z. P., Walker M. L., Welander A. S., Hyatt A., Qian J. P., Zhang R. R., Humphreys D. A., Leuer J. A., Johnson R. D., Penaflor B. G., Mueller D. Plasma current, position and shape feedback control on EAST // *Nuclear Fusion*. – 2013. – V. 53. – P. 043009. – DOI: 10.1088/0029-5515/53/4/043009.
3. Докука В. Н., Кадурын А. В., Митришкин Ю. В., Хайрутдинов Р. Р. Синтез и моделирование H_{∞} -системы магнитного управления плазмой в токамаке-реакторе // *Автоматика и телемеханика*. – 2007. – № 8. – С. 126–145. – DOI: 10.1134/S0005117907080127.
4. Павлова Е. А. Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках. // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. – 2023.
5. Humphreys D. A., Casper T. A., Eidietis N., Ferrara M., Gates D. A., Hutchinson I. H., Jackson G. L., Kolemen E., Leuer J. A., Lister J., LoDestro L. L., Meyer W. H., Pearlstein L. D., Portone A., Sartori F., Walker M. L., Welander. A. S., Wolfe S. M. Experimental vertical stability studies for ITER performance and design // *Nuclear Fusion*. – 2009. – V. 49. – P. 115003. – DOI: 10.1088/0029-5515/49/11/115003.
6. Mitrishkin Y. V., Zenckov S. M., Kartsev N. M., Efremov A. A., Dokuka V. N., Khayrutdinov R. R. Linear and Impulse Control Systems for Plasma Unstable Vertical Position in Elongated Tokamak // *Proc. the 51st IEEE Conference on Decision and Control, Maui Hawaii, USA*. – 2012. – P. 1697–1702. – DOI: 10.1016/S0920-3796(00)00109-5.
7. Schneider W., McCarthy P. J., Lackner K., Gruber O., Behler K., Martin P., Merkel R. ASDEX upgrade MHD equilibria reconstruction on distributed workstations // *Fusion Engineering and Design*. – 2000. – V. 48, № 1-2. – P. 127–134. – DOI: 10.1016/S0920-3796(00)00109-5.
8. Lao L., John H., Stambaugh R., Kellman A., Preiffer W. Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in tokamaks // *Nuclear Fusion*. – 1985. – V. 25, №. 11. – P. 1611–1622. – DOI: 10.1088/0029-5515/25/11/007.

9. Huang Y., Xiao B., Luo Z., Yuan Q. Improvement of GPU parallel real-time equilibrium reconstruction for plasma control // *Fusion Engineering and Design*. – 2018. – V. 128. – P. 82–85. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.01.043.
10. Swain D. W., Neilson G. H. An efficient technique for magnetic analysis of non-circular, high-beta tokamak equilibria // *Nuclear Fusion*. – 1982. – V. 22. – P. 1015. – DOI: 10.1088/0029-5515/22/8/002.
11. Лукаш В. Э., Докука В. Н., Хайрутдинов Р.Р. Программно-вычислительный комплекс ДИНА в системе МАТЛАВ для решения задач управления плазмой токамака // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. – 2004. – Вып. 1. – С. 40–49.
12. International atomic energy agency. Technical Basis for the ITER-FEAT Outline Design // *ITER EDA Documentation Series No. 19, IAEA*. – 2001.
13. Pereverzev G. V., Yushmanov P. N. ASTRA Automated System for Transport Analysis in a Tokamak // *Tech. rep. 5/98. IPP Report*. – 2002.
14. Jardin, S. C., Pomphrey N., Delucia J. Dynamic modeling of transport and positional control of tokamaks // *Journal of Computational Physics*. – 1986. – V. 66, № 2. – P. 481–507. – DOI: 10.1016/0021-9991(86)90077-X.

Список основных публикаций по теме диссертации

- A1. Коренев П. С., Митришкин Ю. В., Патров М. И. Реконструкция равновесного распределения параметров плазмы токамака по внешним магнитным измерениям и построение линейных плазменных моделей // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 254-266. – DOI: 10.17587/mau.17.254-266. – (РИНЦ: ИФ – 0,84; авт. вклад 0,7 из 0,8 п.л.).
- A2. Докука В. Н., Коренев П. С., Митришкин Ю. В., Павлова Е. А., Патров М. И., Хайрутдинов Р. Р. Исследование полоидальной системы токамака Глобус-М и управление положением плазмы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. – 2016. – Т. 39, № 3. – С. 80–90. DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-80-90. – (РИНЦ: ИФ – 0,64; авт. вклад 0,2 из 0,7 п.л.).
[Dokuka V. N., Korenev P. S., Mitrishkin Y. V., Pavlova E. A., Patrov M. I., Khayrutdinov R. R. Study of Globus-M tokamak poloidal system and plasma position control // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2017. – V. 80, № 7. – P. 1298–1306. – DOI: 10.1134/S1063778817070055. – (WoS: JIF – 0,3; авт. вклад 0,2 из 0,6 п.л.).]
- A3. Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Kartsev N. M., Kuznetsov E. A., Prokhorov A. A., Patrov M. I. Plasma magnetic cascade multiloop control system design methodology in a tokamak // *Control Engineering Practice*. – 2019. – V. 87. – P. 97-110. – DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.03.018. – (WoS: JIF – 5,4; авт. вклад 0,2 из 0,9 п.л.).
- A4. Mitrishkin Y. V., Prokhorov A. A., Korenev P. S., Patrov M. I. Hierarchical robust switching control method with the equilibrium reconstruction code based on improved Moving Filaments approach in the feedback for tokamak plasma shape //

- Fusion Engineering and Design. – 2019. – V. 138. – P. 138-150. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.10.031. – (WoS: JIF – 1,9; авт. вклад 0,1 из 0,8 п.л.).
- A5. Mitrishkin Y. V., Prokhorov A. A., Korenev P. S., Patrov M. I. Plasma magnetic time-varying nonlinear robust control system for the Globus-M/M2 tokamak // Control Engineering Practice. – 2020. – V. 100. – P. 104446. – DOI: 10.1016/j.conengprac.2020.104446. – (WoS: JIF – 5,4; авт. вклад 0,2 из 1,1 п.л.).
- A6. Митришкин Ю. В., Корнев П. С., Коньков А. Е., Карцев Н. М. Подавление смещений плазмы по вертикали системой управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в D-образном токамаке // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 4. – С. 100–124. – DOI: 10.31857/S0005231022040067. – (РИНЦ: ИФ – 1,3; авт. вклад 0,5 из 1,6 п.л.).
[Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Konkov A. E., Kartsev N. M. Suppression of Vertical Plasma Displacements by Control System of Plasma Unstable Vertical Position in D-Shaped Tokamak // Automation and Remote Control. – 2022. – V. 83, № 4. – P. 579-599. – DOI: 10.1134/S0005117922040051. – (WoS: JIF – 0,6; авт. вклад 0,4 из 1,3 п.л.)]
- A7. Митришкин Ю. В., Коньков А. Е., Корнев П. С. Сравнительное исследование систем управления реального времени вертикальным положением плазмы в токамаке с разными источниками питания обмотки горизонтального управляющего поля // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2022. – Т. 45, вып. 3. – С. 34-49. – (РИНЦ: ИФ – 0,64; авт. вклад 0,2 из 1 п.л.).
[Mitrishkin Y. V., Konkov A. E., Korenev P. S. Comparative Study of Real-Time Control Systems of Vertical Plasma Position in Tokamak with Different Power Supplies for Horizontal Control Field Coil // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – V. 86, № 7. – P. 1616–1628. – DOI: 10.1134/S1063778823070165. – (WoS: JIF – 0,3).]
- A8. Mitrishkin Y. V., Kruzhkov V. I., Korenev P. S. Methodology of Plasma Shape Reachability Area Estimation in D-Shaped Tokamaks // Mathematics. – 2022. – V. 10, № 23. – P. 4605. – DOI: 10.3390/math10234605. – (WoS: JIF – 2,3; авт. вклад 0,1 из 1,1 п.л.).
- A9. Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Konkov A. E., Kartsev N. M., Smirnov I. S. New horizontal and vertical field coils with optimised location for robust decentralized plasma position control in the IGNITOR tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2022. – V. 174. – P. 112993. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112993. – (WoS: JIF – 1,9; авт. вклад 0,5 из 1,3 п.л.)
- A10. Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Konkov A. E., Kruzhkov V. I., Ovsyannikov N. E. New identification approach and methods for plasma equilibrium reconstruction in D-shaped tokamaks // Mathematics. – 2022. – V. 10, № 1. – P. 40. – DOI: 10.3390/math10010040. – (WoS: JIF – 2,3; авт. вклад 0,4 из 1,4 п.л.).
- A11. Корнев П. С., Коньков А. Е., Митришкин Ю. В., Балаченков И. М., Киселев Е. О., Минаев В. Б., Сахаров Н. В., Петров Ю. В. Усовершенствованный алгоритм FCDI для восстановления равновесия плазмы в токамаке // Письма в журнал технической физики. – 2023. – Т. 49, вып. 7. –

С. 36-39. – DOI: 10.21883/PJTF.2023.07.54920.19468. – (РИНЦ: ИФ – 0,73; авт. вклад 0,2 из 0,3 п.л.).

[Korenev P. S., Konkov A. E., Mitrishkin Y. V., Balachenkov I. M., Kiselev E. O., Minaev V. B., Sakharov N. V., Petrov Yu. V. Improved FCDI algorithm for tokamak plasma equilibrium reconstruction // Technical Physics Letters. – 2023. – V. 49. № 7. – P. 34–37. – DOI: 10.21883/TPL.2023.04.55873.19468. – (WoS: JIF – 0,8; авт. вклад 0,2 из 0,3 п.л.).]

A12. Коньков А. Е., Корнев П. С., Митришкин Ю. В., Балаченков И. М., Киселев Е. О. Система магнитного управления плазмой реального времени с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи для токамака Глобус-М2 // Физика Плазмы. – 2023. – Т. 49, № 12. – С. 1348-1356. – DOI: 10.31857/S0367292123600760. – (РИНЦ: ИФ – 1,4; авт. вклад 0,3 из 0,6 п.л.).

[Konkov A. E., Korenev P. S., Mitrishkin Y. V., Balachenkov I. M., Kiselev E. O. Real-Time Plasma Magnetic Control System with Equilibrium Reconstruction Algorithm in the Feedback for the Globus-M2 Tokamak // Plasma Physics Reports. – 2023. – V. 49, № 12. – P. 1552 – 1559. – DOI: 10.1134/S1063780X23601827. – (WoS: JIF – 0,9; авт. вклад 0,3 из 0,5 п.л.).]

Иные публикации по теме диссертации

A13. Mitrishkin Y. V., Prokhorov A. A., Korenev P. S., Patrov M. I., Robust H_{∞} switching MIMO control for a plasma time-varying parameter model with a variable structure in a tokamak // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – V. 50, Issue 1. – P. 11385-11390. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1795. – (Scopus: SJR – 0,37; авт. вклад 0,1 из 0,4 п.л.).

A14. Prokhorov A., Mitrishkin Yu., Korenev P., Patrov M. The plasma shape control system in the tokamak with the neural network as a plasma equilibrium reconstruction algorithm // IFAC PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, Issue 2. – P. 857-862. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.843. – (Scopus: SJR – 0,37; авт. вклад 0,1 из 0,4 п.л.).

A15. Konkov A., Mitrishkin Yu., Korenev P., Patrov M. Robust Cascade LMI Design of MIMO Controllers for Plasma Position, Current, and Shape Model with Time-Varying Parameters in a Tokamak // IFAC PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, Issue 2. – P. 7344-7349. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1000. – (Scopus: SJR – 0,37; авт. вклад 0,1 из 0,4 п.л.).

A16. Mitrishkin Yu., Kartsev N., Korenev P., Patrov M. Model Predictive Control with Time Varying Parameters for Plasma Shape and Current in a Tokamak // IFAC PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, Issue 2. – P. 6631-6636. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.083. – (Scopus: SJR – 0,37; авт. вклад 0,1 из 0,4 п.л.).

Патенты:

П1. Заявка 2018132882 Россия, МПК G21B1/00. Способ формирования модели магнитного управления формой и током плазмы с обратной связью в токамаке / Ю. В. Митришкин, А. А. Прохоров, П. С. Корнев, М. И. Патров (Россия); заявитель ФГБОУВО «Московский государственный университет

имени М.В.Ломоносова» (МГУ) (RU). — № RU 2 702 137 C1; опубл. 10.04.2019, приоритет 28.04.2017 (Рос. Федерация). — 33 с. : ил.

П2. Заявка 2022117882 Россия, МПК G21B1/00. Способ быстродействующего определения формы плазмы в камере токамака в течение диверторной фазы плазменных разрядов / Ю. В. Митришкин, А. Е. Коньков, П. С. Коренев, В. И. Кружков (Россия); заявитель ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ) (RU). — № RU 2 787 571 C1; опубл. 11.01.2023, приоритет 30.06.2022 (Рос. Федерация). — 20 с. : ил.