

ОТЗЫВ

официального оппонента

Пустовитова Владимира Дмитриевича

на диссертацию, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Павловой Евгении Александровны на тему:

«Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках» по специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация Павловой Е.А. посвящена анализу, синтезу и математическому моделированию многосвязных и многоконтурных робастных систем управления положением, током и формой плазмы с обратной связью в токамаках Т-15МД и Глобус-М/М2 на квазистационарной фазе плазменного разряда, оценке свойств полученных систем управления, исследованию поведения замкнутых систем при воздействии на систему возмущений и при наличии неопределенностей в параметрах моделей рассматриваемых динамических объектов управления. Робастные системы управления способны работать в условиях неопределенности модели объекта, т.к. синтезируются для целого семейства моделей, аппроксимирующих неопределенность, а не только для одной модели как принято в классической теории управления.

Актуальность темы диссертационного исследования связана с необходимостью разработки и апробации методов и систем магнитного управления положением, током и формой плазмы для модернизированного сферического токамака Глобус-М2 в физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), а также токамака Т-15МД с вытянутым в вертикальном направлении поперечным сечением в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва), который в скором времени планируют ввести в эксплуатацию.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Также здесь описана методология исследования, указан личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор систем магнитного управления положением, формой и током плазмы на токамаках с некруглым сечением плазмы.

Во второй главе приведены результаты разработки и исследования систем стабилизации вертикального положения плазмы в токамаке Т-15МД на линейной модели плазмы, полученной ранее методом идентификации с использованием плазмо-физического кода DINA. Система включает два типа исполнительных устройств: многофазный тиристорный выпрямитель напряжения и инвертор напряжения релейного действия. Робастная цифровая

система управления, синтезированная методом линейных матричных неравенств с предписанным размещением полюсов, предназначена для подавления аддитивных возмущений типа «малый срыв» на квазистационарной фазе разряда, а также для стабилизации вертикального положения плазмы при возможном отклонении параметров модели плазмы от номинальных значений на 20%. Она была промоделирована на цифровом стенде реального времени Speedgoat Performance.

Третья глава посвящена разработке двухконтурной системы стабилизации положения плазмы по вертикали и горизонтали для действующего сферического токамака Глобус-М/М2. Основой служила линейная модель плазмы с использованием данных магнитных измерений вне плазмы. Регуляторы, синтезированные для полученных линейных моделей и обеспечивающие работоспособность замкнутой системы, были протестированы на коде DINA как модели плазмы с распределенными параметрами в структурной схеме замкнутой системы управления. При этом они применялись в дискретном времени с шагом 10 мкс.

В четвертой главе решена задача разработки и сравнения системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2, синтезированной методом взаимно-простой факторизации, с системой, полученной путем двойной развязки каналов управления и H_∞ автоматической настройки регуляторов. Показано, что первый метод позволяет достичь более высоких запасов робастной устойчивости, а второй дает возможность улучшить качество управления. При этом развязка каналов позволяет последовательно настраивать регуляторы в обратной связи по каждому из зазоров между сепаратрисой и первой стенкой токамака при управлении формой плазмы.

Научная новизна представленных в диссертации результатов связана, прежде всего, с разработкой новых систем управления плазмой в токамаках. В частности, модального регулятора с одним настроенным параметром для прототипа токамака Т-15МД, регулятора с двойной развязкой каналов управления для токамака Глобус М/М2 и др.

Результаты анализа и синтеза систем управления плазмой имеют научную и практическую ценность, так как позволяют синтезировать системы управления плазмой и в численном эксперименте оценить качество (быстродействие и точность) и свойства разработанных систем. При этом они позволяют выбрать наиболее эффективные системы управления, применение которых в физическом эксперименте должно противодействовать развитию возмущений плазменного разряда типа малый срыв.

Достоверность результатов данного исследования подтверждается результатами математического моделирования синтезированных систем управления на линейных моделях плазмы с помощью пакета прикладных программ MATLAB и графической среды имитационного моделирования Simulink, а также результатами численного моделирования на нелинейном плазмо-физическом коде DINA и цифровом стенде реального времени Speedgoat Performance.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем – 146 страниц, работа содержит 5 таблиц, 70 рисунков, список литературы из 134 наименований и приложение.

Результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 5 статей в международных журналах: Fusion Engineering and Design (издательство Elsevier), Mathematics (издательство MDPI), регистрируемых в библиографической базе данных Web of Science (WoS, Q1), а также Physics of Atomic Nuclei (Q3) и Advances in Systems Science and Applications (Q2), регистрируемых в библиографической базе данных Scopus, остальные в трудах международных и российских конференций.

Диссертация представляет собой завешенное научное исследование и соответствует паспорту специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. Диссертация посвящена разработке «робастных систем управления», эта формулировка вошла даже в название работы. Слово «робастный» присутствует во всех пяти положениях, выносимых на защиту. Однако смысл этого слова нигде не разъяснен.

2. Точно так же не разъяснен смысл выражений «синтез систем», «синтез регуляторов», «идентификация».

3. На стр. 5 делается неверное утверждение «выбирают вытянутую по вертикали конструкцию».

4. На стр. 8 (см. также стр. 32) еще одна двусмысленная формулировка «посредством идентификации кода DINA».

5. Еще два подобных примера на стр. 9: «система управления ..., предназначенная для работы со структурной неопределенностью моделей объекта» и ««квадратной» структуре модели формы плазмы».

6. На стр. 17 еще одна неверная формулировка: «Чтобы удерживать плазму в ограниченном объеме необходимо замкнуть линии магнитного поля на себя».

7. На стр. 19 непонятно, о какой связи идет речь в утверждении «развитие токамаков связано с особенностью, состоящей в вытянутости по вертикали поперечного сечения» и почему указанное свойство является особенностью.

8. На стр. 19 неверное утверждение «Система магнитной диагностики ... генерирует основные параметры плазмы».

9. На стр. 37 «экспериментальный опыт, полученный немецкими исследователями на токамаке ASDEX Upgrade» полностью игнорирует вклад физиков, имеющих иное гражданство.

10. На стр. 89 «в вертикально вытянутых токамаках» – это грубый жаргон.

11. На стр. 103 явно жаргонным является выражение «идентификация ... составляет ~ 80-90%».

12. В физике токамаков существует понятие «запас устойчивости». Это количественная мера скорости вращения силовых линий магнитного поля: отношение числа ее оборотов при движении вдоль тора к числу оборотов по малому радиусу. В диссертации, посвященной системам управления плазмой в токамаках, тот же термин «запас устойчивости» используется в совершенно ином смысле, причем без определения. Некое пояснение приводится лишь на стр. 105: «Под запасом устойчивости понимается величина H_{∞} -нормы наибольшей структурной неопределенности». Однако без определения «неопределенности» это также остается неопределенным.

Приведенные выше замечания не умаляют достоинства диссертационной работы. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Выносимые на защиту положения обоснованы и четко сформулированы. Выводы соответствуют проделанной работе и адекватно отражают содержание представленной к защите диссертации. Автором проделан большой объем исследований, и диссертация выполнена на высоком научном уровне. Основные результаты работы достаточно полно отражены в публикациях автора. Результаты работы успешно доложены на научном семинаре «Теория магнитного удержания плазмы» в НИЦ «Курчатовский институт» 07.04.2023 с получением выписки из протокола с рекомендацией по защите диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Павловой Е.А. полностью соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а ее автор, Павлова Евгения Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
отдел теории плазмы,
НИЦ «Курчатовский институт»


В.Д. Пустовитов

Контактные данные:

Адрес места работы: Москва, 123182, пл. Курчатова, 1

Тел.: 499-196-16-03

E-mail: Pustovitov_VD@nrcki.ru

Подпись В.Д. Пустовитова  удостоверяю
Главный ученый секретарь Центра

Борисов К.Е.