

## **Отзыв**

на автореферат диссертации Павловой Евгении Александровны  
**«Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем**  
**управления положением, током и формой плазмы в токамаках»**  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.2

**«Приборы и методы экспериментальной физики»**

Темой диссертации Павловой Е.А., как следует из названия диссертации, является разработка и приложение современных методов теории управления к построению системы управления нестационарным объектом, которым является токамак, с последующей проверкой эффективности предложенных решений путем математического моделирования разработанной системы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Ее общий объем – 146 страниц. Основной список литературы включает 134 наименования. Кроме того, имеется дополнительный список публикаций автора по теме диссертации, включающий 15 работ. Отметим, что часть этих работ опубликован в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI (всего 5 работ). Текст диссертации основан на публикациях Павловой Е.А. с соавторами в научных журналах.

Во введении к диссертации приведен достаточно полный обзор известных результатов по теме диссертации. Актуальность темы диссертационных исследований Павловой Е.А. подтверждается работами, которые ведутся в России с участием российских ученых и практиков в проектах, осуществляемых в рамках создания международного термоядерного экспериментального реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) в г. Кадараш (Франция) и проектирующейся термоядерной электростанции DEMO (DEMOstration Power Plant).

Цель работы состоит в анализе, синтезе и математическом моделировании многосвязных и многоконтурных робастных систем управления положением, током и формой плазмы с обратной связью на квазистационарной фазе

плазменного разряда, оценке рабочих свойств полученных систем управления, исследовании поведения замкнутых систем при воздействии на систему неконтролируемых возмущений и при наличии неопределенностей в параметрах моделей рассматриваемых объектов управления.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Осуществить анализ, синтез и математическое моделирование систем управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в прототипе токамака Т-15МД для двух типов исполнительных устройств: многофазного тиристорного выпрямителя и транзисторного инвертора напряжения.
2. Провести идентификацию, анализ, синтез методом  $H_\infty$ -оптимизации и математическое моделирование многосвязной и многоконтурной системы управления положением, током и формой плазмы в токамаке Глобус-М/М2.
3. Реализовать на нелинейном плазмофизическом коде DINA математическое моделирование системы магнитного управления положением плазмы на квазистационарной стадии разряда токамака Глобус-М/М2.
4. Выполнить структурный анализ, синтез и математическое моделирование системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М/М2 с двойной связью каналов управления.

Теоретическая часть исследований проводилась с применением современных методов теории управления.

Краткий обзор представленных в диссертации материалов исследования:

### **Глава 1. Магнитное управление плазмой в токамаках**

Данная глава обобщает ряд результатов, полученных учеными и практиками различных стран в области практических исследований управления плазмой. Подчеркивается, что магнитное управление плазмой является ключевым звеном, обеспечивающим работоспособность токамаков, однако задачу выбора и разработки системы магнитного управления плазмой в токамаке решенной окончательно. Отмечается, что данная область активно развивается в течение последних десятилетий.

## **Глава 2. Системы управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в прототипе токамака Т-15МД**

В начале главы автор диссертации в целях обоснования актуальности темы диссертации приводит обзор состояния проблемы управления плазмы в токамаке, начиная с работ 70-х годов прошлого века. На основании анализа состояния проблемы управления плазмой ставится задача выбора исполнительного устройства для прототипа токамака Т-15МД, который сооружен в НИЦ «Курчатовской институт». Для достижения поставленной задачи была синтезирована и исследована трехконтурная система управления этого токамака вертикальным положением плазмы со статической обратной связью и линейной моделью многофазного тиристорного выпрямителя в качестве исполнительного устройства. Правомерность аппроксимации импульсного нелинейного тиристорного выпрямителя линейной моделью первого порядка подтверждается сравнением с точной моделью выпрямителя и демонстрацией того, что линейная аппроксимация имеет достаточно высокую точность. Основным результатом этой главы, отмечает автор диссертации, «является обнаружение того факта, что высокая робастность систем управления при синтезе робастных регуляторов методом LMI может привести к неоправданно большой мощности управления при отработке задающего воздействия и аддитивного возмущения на модели вертикального движения плазмы». *Этого и следовало ожидать, потому что по своей природе робастное управление, строящееся на «пределный случай», является «затратным».*

## **Глава 3. Идентификация и синтез многосвязных и многоконтурных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаке Глобус-М/М2**

Успех разрабатываемой системы управления в полной мере зависит от адекватности математической модели объекта процессам, подлежащим управлению, и используемой при синтезе управляющих воздействий, включающей знание интервалов изменения ее параметров и оценки действующих возмущений. Как следует из приведенных результатов в первой

главе диссертации, построение системы управления плазмой требует знания всего пространства состояния объекта управления. В условиях неполной информации о состоянии объекта в работе предложен метод построения наблюдателя пониженной размерности. Для этого в работе используется метод определение параметров и структуры математической модели, обеспечивающей наилучшее совпадение выходных координат объекта и модели при одинаковых входных воздействиях, т.е. метод идентификации. Но прежде чем приступить к задаче построения наблюдателя и организации управления с использованием информации, получаемой из наблюдателя, следовало бы проверить выполнение требований по наблюдаемости и управляемости как исходного объекта, так и его усеченной модели.

Метод синтеза по состоянию линеаризованной системы, примененный в данной главе, обеспечивает устойчивость и живучесть при наличии насыщения входа/выхода, простоту регулятора и высокое качество замкнутой системы. Относительно высокий уровень робастной устойчивости линеаризованной системы является результатом большого запаса устойчивости по фазе и амплитуде каждого контура трехконтурной системы управления состоянием без наблюдателя в обратной связи и с прямым доступом к полностью управляемым состояниям системы.

*Синтез и анализ управлений для нелинейной системы с использованием ее линеаризованной модели можно сравнить с методом построения системы управления по первому приближению (Н.Н. Красовский). Поэтому, если матрица  $A$  (стр.68) не имеет собственных значений на мнимой оси, то этот случай является не критическим в противном случае устойчивость или неустойчивость зависит от вида нелинейных членов.*

Полученная в диссертации система является результатом структурного анализа. Объект описывается уравнением высокого порядка  $x \in R^{75}$ , выход системы имеет  $y \in R^7$ , организуются два управления:  $U_{HFC} \in R^1$  и  $U_{VFC} \in R^6$ . В теоретическом плане следовало бы проверить организуемую систему на выполнение свойств наблюдаемости и управляемости. Линейная модель

объекта управления пониженного порядка была получена в результате идентификации полной модели, полученной на основе экспериментальных данных токамака Глобус-М/М2. Идентификация проводилась по методу подпространств с помощью пакета System Identification Toolbox в MATLAB.

Разработка двухконтурной системы стабилизации вертикального и горизонтального положения плазмы для сферического токамака Глобус-М/М2 и ее тестирование на нелинейном плазмофизическом коде DINA являются важными результатами третьей главы.

#### **Глава 4. Структурный анализ и синтез систем магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М/М2 с двойной связью каналов управления**

Несмотря на то, что структура системы существенным образом влияет на качество управления, в большинстве случаев выбор структуры системы осуществляется исходя из экспериментального опыта и научно-инженерного понимания сути процессов, происходящих в системе. В данной главе продемонстрирована методика анализа структуры системы управления током и формой плазмы в токамаке Глобус-М/М2 с применением строгого математического аппарата и численной оценки взаимосвязей в системе. Также для полученной структуры системы синтезирована система управления формой плазмы с двойной связью каналов управления.

Для определения наиболее эффективной структуры управления в работе рассматриваются основные 4 варианта структур. Показано, что предварительный анализ структуры системы и обоснованный выбор конфигурации системы, позволяет применять для управления током плазмы простые ПИД-регуляторы в обратной связи. Сравнительный анализ двух систем: с  $H_\infty$  регулятором в обратной связи и автоматически настроенной системы с связью каналов ПИД регуляторов и матрицей в обратной связи, показал, что ошибка слежения за зазорами во второй системе меньше, чем в первой.

В **Заключении** представленной работы перечислены все основные результаты исследований, к которым относятся:

Разработаны и исследованы системы стабилизации неустойчивого вертикального положения плазмы в токамаке Т-15МД на линейной модели плазмы, разработана робастная цифровая система управления с использованием метода линейных матричных неравенств и размещением полюсов в области, лежащей в единичном круге.

На основе линейной модели плазмы, построенной по экспериментальным данным разработана двухконтурная система стабилизации положения плазмы по вертикальной и горизонтальной координатам для действующего сферического токамака Глобус-М/М2.

Предложен идентификации каскадов управления положением, током плазмы и зазорами с дальнейшим синтезом регуляторов и применением их на исходной модели.

Разработана каскадная система управления с двойной связью каналов для управления формой плазмы в токамаке Глобус-М/М2.

Перечисленное выше составляет **научную новизну и практическую значимость** представленных исследований Павловой Евгении Александровны.

#### Недостатки

Отмеченных недостатков немного и они носят скорее стилистический характер и определяю для автора диссертации некоторые направления дальнейших исследований.

1. «Модели объекта управления, которые с высокой степенью точности соответствуют реальному физическому эксперименту (стр.97)...». *Объект и его модель разные «физические» понятия.*
2. Математические модели объекта управления позволяют имитировать физический эксперимент (стр.98). *Слово имитировать не из теории управления.*
3. Линейная модель плазмы в пространстве состояний для плазмы в токамаке Глобус-М/М2 может быть записана в виде линейной стационарной системы уравнений (формула (9))... *Прежде чем*

*заниматься идентификацией следует убедиться, что модель является управляемой и наблюдаемой.*

4. Модель низкого порядка, определенная по исходной модели высокого порядка, будет использована в качестве модели идентификации. *Каким образом «определенная»?*
5. В качестве моделей исполнительных устройств – инверторов тока, в системе применялись их линеаризованные звенья, как коэффициенты пропорциональности между входной и выходной величинами. *Что означает линеаризация коэффициентов?*
6. *В теоретическом плане не проверено: смогут ли управления  $U_{HFC} \in R^1$  и  $U_{VFC} \in R^6$  с наблюдателем третьего порядка  $y(t) \in R^3$  обеспечить устойчивость объекта  $x(t) \in R^{75}$ ?*
7. Освоен подход идентификации...(стр.113). *Второй раз встречается слово «освоен» (стр.97) в описании результатов исследований. Это слово не определяет большую работу, проведенную доктором наук над проблемой идентификации.*

Ряд замечаний по представленному материалу расположены в тексте отзыва.

### **Общий вывод по диссертационной работе**

Диссертационная работа Павловой Е.А. вносит существенный вклад в развитие методов, теории и технологий построения многосвязанных систем управления положением, током и формой плазмы с обратной связью на квазистационарной фазе плазменного разряда, оценке робастных свойств полученных систем управления, исследовании поведения замкнутых систем при воздействии на систему неконтролируемых возмущений и при наличии неопределенностей в параметрах моделей рассматриваемых объектов управления.

### **Соответствие диссертации специальности 1.3.2.**

Диссертация «Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках»

полностью удовлетворяет требованиям, сформулированным в Паспорте специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» (п.п. 3-5). В работе синтезируются, изучаются и моделируются системы автоматического управления плазмой в токамаках с обратной связью, в которые включаются объекты управления в виде плазмы в токамаках, исполнительные, измерительные и управляющие устройства. Разработаны новые робастные модели регуляторов, способные функционировать в замкнутых системах в условиях неопределенности, представляющие собой алгоритмическую основу физических приборов для экспериментального изучения и управления плазмой в магнитном поле токамаков. Модели регуляторов синтезированы методами теории управления, направленными на внедрение систем управления в практику физического эксперимента токамаков Т-15МД и Глобус-М/М2.

Считаю, что диссертационная работа «Анализ, синтез и математическое моделирование робастных систем управления положением, током и формой плазмы в токамаках» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики», а автор диссертации, Евгения Александровна Павлова, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Д.т.н., профессор В.Н. Афанасьев

Департамент прикладной математики Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Подпись Валерия Николаевича Афанасьева заверяю:

Контактные данные:

Адрес места работы: 123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34

Тел: +7 919 968 70 80

E-mail: afanval@mail.ru