

**МИТРИШКИН Юрий Владимирович**

**На правах рукописи**

**УДК 681.51:621.3.002.5:621.039.6:533.95**

**КОМПЛЕКСНАЯ РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ  
АДАПТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И РОБАСТНЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМОЙ  
В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ**

**Специальность: 05.11.16 –**

**Информационно-измерительные и управляющие системы  
(атомная наука и техника и смежные области)**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора технических наук**

**Москва – 2003**

Работа выполнена в Институте проблем управления  
им. В.А. Трапезникова Российской Академии наук

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник

**Арсенин Владимир Васильевич**

РНЦ "Курчатовский институт"

доктор физико-математических наук, профессор

**Краснов Андрей Евгеньевич**

Физический институт им. П.Н. Лебедева

доктор технических наук, профессор

**Пупков Константин Александрович**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Ведущее предприятие:**

**НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова**

Министерство атомной энергии РФ

г. Санкт Петербург

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г. в \_\_\_\_ час. \_\_\_\_ мин.  
на заседании диссертационного совета Д 520.009.04 при Российском  
научном центре "Курчатовский институт" по адресу: 123182 Москва,  
площадь академика Курчатова, д. 1, РНЦ "Курчатовский институт".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РНЦ "Курчатовский  
институт".

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



**Г.В. Яковлев**

2003-А  
11528

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

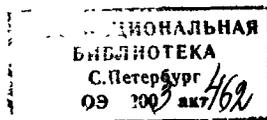
Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС), исследования по которой были начаты в начале 50-х годов прошлого столетия, является одной из центральных в науке и технике. Решение данной проблемы откроет новый, безопасный, практически неисчерпаемый источник энергии от синтеза ядер легких элементов. В нашей стране исследования по проблеме УТС были начаты и организованы академиком И. В. Курчатовым.

Идея термоядерного реактора была предложена академиками А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом, основанная на удержании плазмы в магнитном поле при нагреве ее до достаточно высокой температуры. В решении проблемы УТС наибольший прогресс имеют токамаки: тороидальные камеры с магнитными катушками. Направление токамаков получило развитие в нашей стране под руководством академика Л.А. Арцимовича, а затем распространилось по всему миру. Первые токамаки имели круглое поперечное сечение и были предназначены для широкомасштабного исследования физики высокотемпературной плазмы: Т-3, Т-4, Т-7, ТО-1, Т-10, Т-11, Т-15, Туман-3 (РФ), PLT, TFTR (США), TORE-SUPRA (Франция), TEXTOR-94 (Германия), FT-U (Италия) и др. Создан токамак Т-14 (РФ) для двойного адиабатического сжатия по малому и большому радиусам.

Последующее поколение токамаков имеет особенность, состоящую в вытянутости по вертикали поперечного сечения, что дает возможность повысить давление плазмы и увеличить нагрев собственным током. Платой за эти преимущества является неизбежная неустойчивость плазмы по вертикали. Тем не менее, токамаки с вытянутой по вертикали плазмой являются в настоящее время основной экспериментальной базой в УТС: JET (Европа), JT-60U (Япония), ASDEX UPGRADE (Германия), DIII-D (США), COMPASS-D (Англия), TCV (Швейцария), ТВД (РФ).

Прогресс токамаков оценивается параметром  $nT\tau$  ( $n$  – плотность,  $T$  – температура,  $\tau$  – время удержания плазмы), который при решении проблемы УТС монотонно возрастал и приблизился к своей критической величине (критерий Лоусона), при которой происходит самоподдерживающаяся термоядерная реакция. В 80-х годах 20-го столетия началось международное сотрудничество между Европейским Сообществом, РФ, США и Японией по проектированию Международного экспериментального термоядерного реактора-токамака: ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER). Миссией ИТЭРа является демонстрация научной и технологической осуществимости использования термоядерной энергии для мирных целей.

В 60-х годах 20-го века для удержания плазмы в магнитных ловушках стали применяться, а затем стали играть существенную роль в УТС,



системы автоматического управления с обратной связью. Это направление было начато в 1967-1968 годах в экспериментах на открытой ловушке с магнитными пробками ОГРА-2 в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова (В.В. Арсенин, В.А. Чуянов). На ОГРА-2 были подавлены желобковая (МГД) и ионно-циклотронная (кинетическая) неустойчивости плазмы. Затем системы управления получили распространение для подавления других неустойчивостей: дрейфовых, ионизационных, винтовой неустойчивости в токамаках, стабилизации  $\theta$ -пинчей и т. п.

В токамаках на начальном этапе основной задачей управления являлась стабилизация положения плазменного шнура по большому радиусу посредством полоидального магнитного поля. Первые эксперименты по решению этой задачи были проведены в 1971 г. на токамаке ТО-1 совместно сотрудниками ИАЭ (Л.И. Артеменков, И.Н. Головин и др.) и Института кибернетики АН УССР (Ю.И. Самойленко, В.Ф. Губарев и др.) с применением импедансного регулятора. На современных токамаках применяется комбинированное управление равновесием плазмы: программное управление используется для обеспечения сценария, а коррекция положения плазмы осуществляется маломощной системой обратной связи. Такие системы стали штатными и нашли применение для ортогонально развязанной стабилизации устойчивого горизонтального и неустойчивого вертикального положения плазмы в токамаках. Затем этот подход стал применяться для управления формой и током вытянутой по вертикали плазмы посредством ряда обмоток полоидального магнитного поля и объект управления стал принадлежать классу многосвязных динамических объектов, к каковым относится плазма в ИТЭР.

Эксперименты на токамаках показали, что основные параметры плазмы, непосредственно обеспечивающие условия для зажигания термоядерной реакции, исключительно чувствительны даже к небольшим смещениям внешней магнитной поверхности плазменного шнура по отношению к камере или диафрагме, ограничивающей шнур. При этом, в частности, было установлено, что от точности регулирования равновесия в значительной степени зависят приграничная теплопроводность, интенсивность поступления вредных примесей в плазму, потеря частиц плазмы, температура и энергетическое время жизни. Для эффективного использования внутреннего пространства вакуумной камеры токамаков, а также для снижения инкрементов неустойчивых смещений вытянутой по вертикали плазмы, положение границы плазмы стабилизируется как можно ближе к первой стенке, и малейший сбой системы управления, например, при действии возмущений типа малого срыва, может привести к расплавлению камеры. Нарушение герметичности камеры ведет к мощному выбросу энергии плазмы наружу, возникновению больших механических

нагрузок и повреждению термоядерной установки. Такие сбои не допустимы для будущего термоядерного реактора. Качество систем управления во многом будет определять его надежность и стоимость.

Только высокоорганизованные системы управления с обратной связью способны обеспечить наилучшие параметры плазмы в течение формирования разряда и фазы горения с выделением термоядерной энергии при автоматической стабилизации ее мощности. Детально разработанные интегрированные системы магнитного и кинетического управления плазмой в термоядерных реакторах-токамаках могут реально обеспечить их высокую конкурентоспособность по сравнению с другими источниками энергии. Поэтому в УТС к устойчивости и качеству систем управления плазмой в термоядерных установках имеется повышенное внимание.

*Отсюда возникает постановка задачи подробного изучения процессов, протекающих в высокотемпературной плазме при ее управлении, создания адекватных динамических моделей плазмы, разработки и исследования методов и систем для достижения наилучших режимов управления плазмой в магнитных ловушках как сложного, распределенного в пространстве, нелинейного динамического объекта с неопределенностями, подверженного воздействию неконтролируемых координатных и параметрических возмущений.*

Классические системы управления, имеющие наибольшее распространение на термоядерных установках, не предназначены для решения данной задачи. Это связано с тем, что классические регуляторы синтезируются для управления одним объектом с известными структурой и параметрами без неопределенности, поэтому они не позволяют достигнуть наилучших показателей качества управления и запаса устойчивости замкнутых систем управления плазмой. В этой связи для повышения эффективности и надежности управления плазмой в термоядерных установках целесообразно применять адаптивные автоколебательные и робастные системы управления.

Если имеется возможность измерять или оценивать возмущения, действующие на объект, то применение адаптивного управления позволяет непрерывно приспосабливаться к возмущениям, реализуя возможность достижения оптимальных режимов управления с расширением запаса устойчивости. Во многих случаях процесс адаптации успешно совмещается с автоколебаниями в нелинейных системах с обратной связью, которые позволяют одновременно идентифицировать объект в темпе наблюдений и оптимально управлять им. Автоколебательные системы имеют широкое распространение в технике и природе: различные ламповые и полупроводниковые генераторы, часовые механизмы, поршневые двигатели и т. д., а также системы в живых организмах, обеспечивающие, например,

устойчивые автоколебания сердца и легких. Наибольший вклад в развитие теории нелинейных колебаний внесли как зарубежные ученые – Льенар, Пуанкаре, Ван-дер-Поль, Баргаузен и др., так и российские – Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси, А.А. Андронов, Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов, Е.П. Попов и др.

Класс технических адаптивных систем имеет более короткую историю, чем автоколебательные системы. Начало активного его развития связано с разработкой автопилотов для летательных аппаратов в начале 50-х годов 20-го столетия. Адаптивные системы продолжают активно развиваться и находят практическое применение во многих технических областях для управления различными динамическими объектами: самолетами, ракетами, судами, судовыми и дизельными двигателями, электроприводами, промышленными роботами, металлорежущими станками, энергосистемами, прокатными станами, химическими реакторами и т. д. Имеется много прикладных и теоретических работ в этой области, из которых очевиден значительный вклад специалистов нашей страны: А.А. Фельдбаума, Я.З. Цыпкина, Б.Н. Петрова, В.Ю. Рутковского, С.Д. Землякова, В.В. Солодовникова, Л.Н. Фицнера, В.А. Якубовича, А.Л. Фрадкова, А.С. Позняка и многих других в решении проблемы адаптации.

Если нет возможности получать информацию о возмущениях в темпе наблюдений, то в этом случае эффективно применение робастного управления<sup>1</sup>. Оно дает возможность управлять с помощью одного динамического регулятора с постоянными параметрами множеством (ансамблем) объектов. При этом минимизируется чувствительность замкнутой системы к действию внешних возмущений и обеспечивается устойчивость системы при неопределенности в объекте. Робастная система по постановке задачи ее синтеза устойчива для любого представителя множества объектов, задаваемого неопределенностью. Теория робастного управления ( $H_\infty$  теория) берет свое начало из 80-х годов 20-го века. Она обязана своим становлением зарубежным специалистам таким как Дж. Зеймс, М. Сафонов, Дж. Дойл, К. Гловер, Б.А. Фрэнсис, М. Видьясагар, Х. Кимура, Д. Лаймбиа, К. Зу и др. Российские ученые В. Харитонов, Я.З. Цыпкин, Б.Т. Поляк, А.П. Курдюков и др. также внесли вклад в различные направления продолжающей бурно развиваться робастной теории управления.

**Актуальность темы.** Необходимость ускорения решения проблемы УТС все более возрастает из-за того, что сейчас более 86% от полной

---

<sup>1</sup> Управление при наличии неопределенности называется *робастным*. *Робастные системы* слабо чувствительны к неточностям в априорных предположениях. *Robust* (англ.) - надежный, устойчивый к ошибкам.

используемой человечеством энергии производится за счет сжигания природных ресурсов: угля, газа и нефти. При этом происходит непрерывное накопление углекислого газа в атмосфере, что вызывает нарушение энергобаланса Земли и, по оценке экспертов, может привести к необратимым климатическим последствиям за время сравнимое с жизнью одного поколения. Возможным выходом из сложившейся ситуации является изменение энергетической системы нашей цивилизации, в которой основной вклад может давать термоядерная энергия без загрязнения окружающей среды. В этой связи исключительно актуальным в решении проблемы УТС является разработка высококачественных систем автоматического управления термоядерными установками, которыми являются адаптивные автоколебательные и робастные системы управления.

**Целью работы** является комплексная разработка и применение адаптивных автоколебательных и робастных систем управления для удержания горячей плазмы в магнитном поле термоядерных установок (типа токамаков и открытых магнитных ловушек) с предельно высокими показателями качества управления в переходных и квазистационарных режимах, обеспечивающих требуемый запас устойчивости.

**Методы исследования.** Для синтеза и анализа замкнутых систем управления плазмой в термоядерных установках использованы математические методы линейной (в частности,  $H_\infty$ ) и нелинейной теории управления, теории обыкновенных дифференциальных уравнений и функционального анализа. Для верификации полученных теоретических результатов применялся метод вычислительного эксперимента с использованием современной технологии математического моделирования и метод научного физического эксперимента на действующих термоядерных установках.

**Научная новизна результатов** проведенных исследований состоит в следующем:

1. Поставлен и решен *оригинальный* цикл научно-технических задач управления равновесием и устойчивостью высокотемпературной плазмы в магнитном поле.
2. Построены *новые* адекватные модели объектов и исполнительных устройств, являющихся ключами в эффективном решении поставленных задач управления плазмой и проведенных научных исследований.
3. *Впервые* предложены, разработаны и исследованы методы адаптации с автоколебаниями для управления плазмой в токамаках и открытых магнитных ловушках.
4. Применение современной  $H_\infty$  теории управления, нелинейных методов синтеза и современного математического обеспечения MATLAB

позволило автору *впервые* разработать и исследовать многосвязные робастные системы управления положением, формой и током плазмы в ИТЭР в условиях разброса магнитных конфигураций плазмы для двух версий ИТЭР (ITER с самоподдерживающейся термоядерной реакцией,  $Q=\infty$ ; ITER-FEAT с поддерживаемым горением,  $Q>10$ ).

5. Новизна технических решений, примененных при разработке методов и структур адаптивных автоколебательных систем, подтверждена 9-ю авторскими свидетельствами и отражена в актах о внедрении и отзывах ведущих зарубежных специалистов ИТЭР.

**Практическая значимость.** Внедрение новых методов адаптации с автоколебаниями и  $H_\infty$  теории позволило существенно продвинуться в практическом достижении оптимальных режимов управления высокотемпературной плазмой с повышенным запасом устойчивости, что приводит к повышению качества и надежности работы термоядерных установок. Получены основные оценки показателей качества управления автоматических систем, а также получены новые знания о поведении плазмы в системах с обратной связью на ряде термоядерных установок из класса магнитных ловушек:

<b>ИТЭР</b>	Международный экспериментальный термоядерный реактор (Фаза технического проектирования, г. Нака, Япония)
<b>ТУМАН-3</b>	Тороидальная установка с магнитным адиабатическим нагревом (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург)
<b>T-14</b>	Токамак с сильным полем (ФИАЭ, г. Троицк, Московская область)
<b>ТВД</b>	Токамак вытянутый с дивертором (ИАЭ им. И.В. Курчатова)
<b>ОГРА-3</b>	Открытая магнитная ловушка (ИАЭ им. И.В. Курчатова, г. Москва)

Результаты, полученные автором в проекте ИТЭР, а также результаты, полученные Российской национальной командой под руководством автора, включены в Финальный Документ по проекту; их значимость и новизна отражены в отзывах руководства ИТЭР. Завершение инженерной фазы проекта ИТЭР разработкой полной технической документации для создания токамака-реактора по двум его версиям является значительным вкладом мирового сообщества в ускорение научно-технического прогресса, касающегося практического решения проблемы УТС.

**Связь с государственными планами научных исследований.** Результаты научных исследований, разработок методов и систем автоматического управления, приведенные в диссертации, связаны с темами, выполненными в Институте проблем управления РАН в

соответствии с планами научных исследований АН СССР и Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР. Научные исследования, проведенные в диссертационной работе по проблеме УТС, выполнены в соответствии с Постановлениями Совета Министров СССР и Координационным планом по Государственной научно-технической программе "УТС и плазменные процессы", а также в соответствии с договорами о научно-техническом сотрудничестве и хозяйственными договорами между ИПУ и ИАЭ, ФИАЭ им. И. В. Курчатова, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Министерством РФ по атомной энергии. Работы по управлению плазмой в ИТЭР, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в соответствии с Международным соглашением между Европейским Сообществом, Российской Федерацией, США и Японией по разработке и созданию ИТЭР.

На защиту выносятся результаты комплексной разработки и применения базовых систем управления плазмой в термоядерных установках, решения задачи идентификации плазмы и задачи оптимизации фазовых ограничений:

1. Адаптивная автоколебательная система автоматической оптимизации плотности плазмы в открытой магнитной ловушке
2. Идентификация модели горизонтального движения плазмы в токамаке с распределением токов на камере динамическим звеном низкого порядка
3. Адаптивные системы совместного оценивания в темпе наблюдения координатного возмущения и параметров плазмы в токамаках
4. Адаптивная автоколебательная система компенсации координатного неконтролируемого возмущения при стабилизации положения плазмы в токамаках
5. Адаптивные системы минимизации амплитуды автоколебаний смещений плазмы в токамаках
6. Оптимизация фазовых ограничений неустойчивого объекта: вытянутой по вертикали плазмы в токамаках
7. Автоколебательная система стабилизации положения плазменного шнура в вытянутом по вертикали токамаке с дивертором с оптимальными параметрами линейного регулятора
8. Робастные многосвязные системы управления положением, током и формой плазмы в Международном термоядерном экспериментальном токамаке-реакторе ИТЭР с  $Q=\infty$  и  $Q>10$

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, симпозиумах, совещаниях и семинарах по автоматическому управлению и УТС:

- П, III Всесоюзные конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов (г. Ленинград, 1981, 1984)
- X, XIV Европейские конференции по УТС и физике плазмы (г. Москва, 1981, г. Мадрид, Испания, 1987)
- Всесоюзные конференции по физике горячей плазмы (г. Звенигород, 1984, 1985)
- X Всесоюзное совещание по проблемам управления (г. Алма-Ата, 1986)
- Международный семинар ИФАК по оценке методов адаптивного управления, используемых в прикладных задачах (г. Тбилиси, 1989)
- V Ленинградский симпозиум по теории адаптивных систем (г. Ленинград, 1991)
- Международный семинар по устойчивости и колебаниям нелинейных систем управления (г. Москва, ИПУ, 1992)
- Международная конференция по автоматике, робототехнике и компьютерному зрению, ICARCV'94 (г. Сингапур, 1994)
- Международный аэрокосмический конгресс, IAS'94 (г. Москва, 1994)
- Международные совещания по разработке магнитной полоидальной системы ИТЭР и системы управления положением, током и формой плазмы (г. Сан-Диего, ИТЭР, США, 1996, 1998; г. Гархинг, ИТЭР, Германия, 1997; г. Нака, ИТЭР, Япония, 1997)
- Международные симпозиумы по технологии термоядерного синтеза, SOFT '96, SOFT '98 (г. Лиссабон, Португалия, 1996, г. Марсель, Франция, 1998)
- Международный семинар по применению  $H_\infty$  теории управления в ИТЭР (г. Токио, Токийский университет, Япония, 1998)
- Международная конференция по проблемам управления, посвященная 60-летию Института проблем управления РАН (г. Москва, ИПУ, 1999)
- 36-я и 40-я Международные Конференции по принятию решений и управлению, CDC'97, CDC'01 (Калифорния, г. Сан Диего, США, 1997, Флорида, г. Орландо, США, 2001)

Публикации. Автором опубликовано 94 работы, из них по теме диссертации - 84 печатных работы. Основные результаты опубликованы в монографии издательства "Наука", в ведущих отечественных и международных журналах: Автоматика и телемеханика (Перевод на англ.: Automation and Remote Control); Журнал технической физики; Вопросы атомной науки и техники, серия: Термоядерный синтез; Измерения, контроль, автоматизация; Plasma Devices and Operations; Fusion Engineering and Design; International Journal of Control; а также в трудах международных и национальных конференций [1-40].

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы из 176 наименований и приложения с актами о внедрении. Работа содержит 398 страниц, включает 131 рисунок и 21 таблицу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко характеризуется проблема УТС и роль систем управления в ней, история возникновения задач управления высокотемпературной плазмой в магнитных ловушках, определяется цели и пути исследования, кратко изложено содержание диссертационной работы по главам.

В первой главе кратко представляется поставленный и решенный в работе цикл задач адаптивного и робастного управления плазмой, а также задач идентификации, приведший к разработке ряда базовых систем управления. Постановки задач данного цикла логически взаимосвязаны, а решение каждой из задач создавало плацдарм для последующего продвижения вперед к созданию высококачественной и надежной системы управления плазмой в термоядерном реакторе.

Сложные особенности плазмы, описываемой дифференциальными уравнениями в частных производных, сложность и нелинейность динамики исполнительных устройств, неопределенности в диагностических средствах, применяемых на термоядерных установках, не позволяют математически полностью формализовать любую постановку задачи управления плазмой и найти точное решение, следовательно, делают невозможным прямое применение любой математической теории управления. Для реального использования того или иного подхода необходимо сделать обоснованные физические и технические допущения, в рамках которых поставленная задача имела бы решение, приемлемое для практики, что давало бы желаемый результат для достижения цели в соответствии с поставленной задачей.

Учитывая специфику указанных обстоятельств, в данной работе использована методология комплексной разработки систем управления плазмой. Основной концепцией методологии является разработка простых динамических моделей плазмы, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями низкого порядка, и нелинейных исполнительных устройств — преобразователей напряжения. Развитый комплексный подход включает в себя разработку и реализацию новых методов управления, принципов организации систем и их структур, их иерархию в случае адаптивных автоколебательных систем (ААС). При этом для анализа и синтеза систем применялись аналитические методы теории

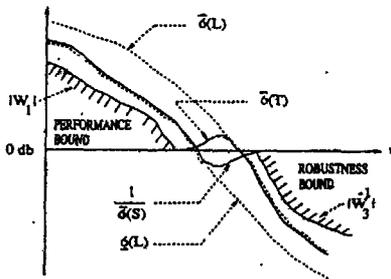
управления, метод моделирования на электронных аналоговых моделях в реальном времени, методы вычислительного эксперимента и современной технологии математического моделирования на физических моделях высокотемпературной плазмы, метод научного эксперимента на действующих термоядерных установках. В процессе продвижения к поставленным целям производилась коррекция решения промежуточных задач на разных этапах их решения.

Диссертантом разработан ряд методов адаптации с автоколебаниями, примененный для управления плазмой в термоядерных установках, которым в гл. 1 дается краткая характеристика. К ним относятся: метод управления по оценке неконтролируемого координатного возмущения; метод автоматической минимизации амплитуды автоколебаний; метод автоматического поиска с частотой автоколебаний; метод адаптивной идентификации состояния. При этом диссертантом предложена классификация ААС, позволяющая систематизировать адаптивные системы по сочетанию принципов управления на основном и адаптивном уровнях: регулирования (Р), поиска (П), распознавания ситуации (РС). Адаптивные системы разделяются на следующие группы: беспойсковые (Р/Р, Р/П, Р/ПП), поисковые (П/Р, П/П, П/ПП), с распознаванием ситуации (РС/Р, РС/П, РС/ПП), комбинированные (РП/Р, РП/П, РП/ПП).

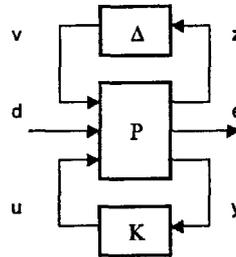
Подчеркивается ключевой вопрос при синтезе робастных регуляторов, связанный с достижением компромисса между качеством управления и запасом робастной устойчивости. При этом приводятся понятия пространства сигналов  $L_2[0, \infty)$  (ограниченных с квадратом функций), изоморфного пространству Харди  $H_2$  при применении преобразования Лапласа, и пространства Харди  $RH_\infty$ , состоящего из устойчивых правильных матричных передаточных функций:  $G \in RH_\infty$ ,  $G: H_2 \rightarrow H_2$ ,  $\|G\|_\infty = \sup_{\omega} \bar{\sigma}[G(j\omega)] < \infty$ , где  $\bar{\sigma}$  - максимальное сингулярное число матрицы.

Если последовательное соединение  $L = G_p K$  объекта  $G_p$  и регулятора  $K$  охвачено отрицательной обратной связью, то выполняются соотношения:  $y = y_p + d$ ,  $y = Le$ ,  $e = r - y$ ,  $y = Sd$ ,  $y = Tr$ ,  $S = (I + L)^{-1}$ ,  $T = L(I + L)^{-1}$ , где  $y_p$  - выходной сигнал объекта,  $d$  - возмущение на выходе объекта,  $r$  - задающее воздействие,  $e$  - ошибка регулирования,  $I$  - единичная матрица,  $S$  - функция чувствительности,  $T$  - дополнительная функция чувствительности. Если объект  $G_p = (I + \Delta)G$  содержит мультипликативную выходную неопределенность  $\Delta$ , то размер наименьшей  $\Delta$ , для которой система неустойчива, есть  $\bar{\sigma}[\Delta(j\omega)] = 1 / \bar{\sigma}[T(j\omega)]$ . Поскольку  $\|y\|_2 \leq \|S\|_\infty \|d\|_2$ , то

для подавления возмущения  $d$  необходимо уменьшать норму  $\|S\|_\infty$ , но при этом возрастает норма  $\|T\|_\infty$  и уменьшается норма  $\|\Delta\|_\infty$ , т.к.  $S+T=I$ . Компромисс достигается решением задачи смешанной чувствительности  $S/T$ :  $\left\| \frac{W_1 S}{W_2 T} \right\|_K \rightarrow \min$ , где  $K$  принадлежит множеству внутренне стабилизирующих регуляторов. Выбором весовых функций  $W_1$  и  $W_2$  обеспечивается частотное разделение коэффициентов усиления: на низких частотах  $\underline{\sigma}[L(j\omega)]$  велико, а  $\overline{\sigma}[S(j\omega)]$  мало, а на высоких частотах  $\overline{\sigma}[L(j\omega)]$  и  $\overline{\sigma}[T(j\omega)]$  малы, а поэтому  $\overline{\sigma}[\Delta(j\omega)]$  велико (рис. 1, а).



а



б

Рис. 1. Частотные характеристики разомкнутой системы (а) и обобщенная структурная схема замкнутой системы управления с неопределенностью (б):  $P$  – матричный объект с весовыми функциями,  $K$  – регулятор,  $\Delta$  – неопределенность,  $d$  – векторный сигнал, содержащий шумы, возмущения и задающие воздействия,  $e$  – векторный сигнал, содержащий все управляемые сигналы и сигналы ошибок,  $u$  – сигнал управления,  $y$  – сигнал измерений.

В зависимости от наличия или отсутствия входного сигнала  $d$  или неопределенности  $\Delta$  в обобщенной схеме системы управления рис. 1, б имеется четыре постановки задач устойчивости и управления. *Номинальная устойчивость*: система устойчива в отсутствии неопределенности в объекте ( $d=0, \Delta=0$ ). *Номинальное качество управления*: система удовлетворяет спецификации на качество управления в отсутствии неопределенности в объекте ( $d \neq 0, \Delta=0$ ). *Робастная устойчивость*: система устойчива при всех возмущенных объектах относительно номинальной модели, включая наихудший случай неопределенности модели ( $d=0, \Delta \neq 0$ ). *Робастное качество управления*: система удовлетворяет спецификации на качество управления для всех возмущенных объектов относительно номинальной модели, включая наихудший случай неопределенности модели ( $d \neq 0, \Delta \neq 0$ ).

Вторая глава посвящена идентификация моделей объектов и исполнительных устройств систем управления плазмой.

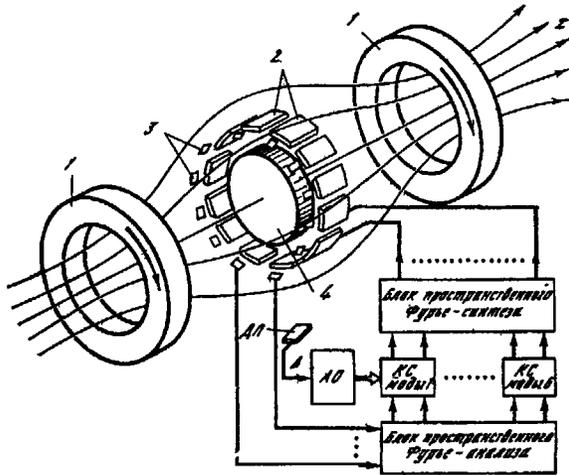


Рис. 2. Система стабилизации желобковой неустойчивости плазмы в открытой магнитной ловушке ОГРА-3: 1 – электромагниты, 2 – электроды, 3 – датчики, 4 – плазма, ДП – датчик плотности, АО – автоматический оптимизатор, КС – канал стабилизации

*Модель желобковых колебаний плазмы.* Строится и исследуется нелинейная автоколебательная модель с переменным параметром одной моды желобковых колебаний плазмы в открытой магнитной ловушке ОГРА-3. Для подавления желобковой неустойчивости, ограничивающей накопление плазмы, в ОГРА-3 применена электростатическая система управления. Эта система посредством пространственного Фурье анализа и синтеза воздействует на каждую моду желобковых колебаний плазмы (рис. 2), описываемую дифференциальным уравнением  $\ddot{x}(t) - jm\dot{x}(t) - n(t)x(t) = \nu n(t)u(t)$ , где  $n$  – плотность плазмы,  $\nu$  – параметр,  $m$  – номер моды,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $x$ ,  $u$  – двумерные выходной и входной сигналы. В течение импульса инжекции в ловушку быстрых атомов водорода многократно повторяется процесс нарастания плотности  $n$  до некоторого порога  $n_{max}$  с последующим сбросом, обусловленным развитием желобковой неустойчивости. При этом частоты желобковых колебаний – порядка сотен  $kHz$ , а частоты автоколебаний плотности – десятки  $Hz$ . Методом  $D$ -разбиения показано, что в пространстве параметров одной моды и обратной связи в виде двумерного форсирующего звена  $W_1 = \tau_F s + k + j\lambda$  и звена

фазирования  $W_2 = \exp(j\varphi) = \cos\varphi + j\sin\varphi$ , где  $\varphi$  – угол фазирования, имеются области, соответствующие  $\max n_{\max}$ .

*Модель горизонтального движения плазмы в токамаке.* Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение плазмы в токамаке Т-14, состоит из 32 уравнений наведенных токов на камере, уравнений плазменного шнура, индуктора, витков равновесия и управления. Равновесие плазмы рассчитывается с помощью нелинейного алгебраического уравнения Шафранова. (Автор модели – Ю.В. Грибов). Множество интегральных кривых данной нелинейной системы уравнений было численно спроектировано вдоль оси времени на плоскость “смещение плазмы – ток управления” посредством сдвига по времени моментов переключения тестовых ступенчатых воздействий из множества допустимых. Полученное множество фазовых траекторий было аппроксимировано множеством фазовых траекторий системы дифференциальных уравнений 2-го порядка с точностью 5% (рис. 3). Исходная система дифференциальных уравнений, представляемая непрерывным оператором  $\Phi$ , аппроксимирована оператором модели  $\Phi_M$  на конечных множествах входных воздействий и параметров в соответствии с доказанными леммой и теоремой.

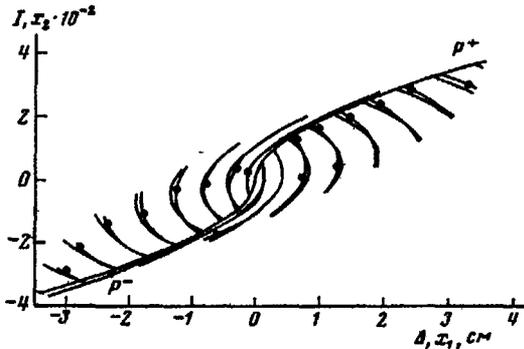


Рис. 3. Численное совмещение фазовых портретов объекта  $\Phi_0$  и модели  $\Phi_M$

Лемма (о существовании функционала). Пусть  $X, Y, Z$  - метрические пространства,  $A \subset X, B \subset Y$ , оператор  $\Phi_0 : A \rightarrow Z$  непрерывен на  $A$ , оператор  $\Phi_M : A \times B \rightarrow Z$  непрерывен на  $A \times B$ . Тогда если подпространства  $A$  и  $B$  компактны, то существует функционал  $J(y) = \sup_{x \in A} \rho[\Phi_0(x), \Phi_M(x, y)]$ ,  $y \in B$ , достигающий точной нижней грани на компакте  $B$ .

*Теорема* (о точности аппроксимации). Пусть  $S$  – метрическое пространство одноступенчатых функций на отрезке  $[0, T]$ ,  $B$  – замкнутый прямоугольник в  $R^2$ ,  $C[0, T]$  – пространство непрерывных функций с равномерной метрикой,  $Z = C[0, T] \times C[0, T]$ , оператор  $\Phi_o : S \rightarrow Z$  непрерывен на  $S$ ,  $\Phi_M : S \times B \rightarrow Z$  непрерывен на  $S \times B$ . Пусть заданы последовательности измельчений  $\{e_k(t)\}^n$  и  $\{\xi_{L,k}(t)\}^m$  с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  соответственно  $S$  и  $B$ , тогда

$$\limsup_{\substack{n \rightarrow \infty \\ d_1 \rightarrow 0}} \rho[\Phi_o\{e\}^k, \Phi_M(\{e\}^k, \xi)]_Z = \sup_{e \in S} \rho[\Phi_o(e), \Phi_M(e, \xi)]_Z, \xi \in B,$$

$$\liminf_{\substack{m \rightarrow \infty \\ d_2 \rightarrow 0}} \sup_{k, l} \rho[\Phi_o(e), \Phi_M(e, \{\xi_{k,l}\}^m)]_Z = \inf_{\xi \in B} \sup_{e \in S} \rho[\Phi_o(e), \Phi_M(e, \xi)]_Z.$$

Результатом численного решения задачи аппроксимации модели с распределенными параметрами является линейная модель вида

$$\dot{x} = -ax + b(I + w), \quad (1, a)$$

$$\dot{I} = -cI + du, \quad (1, b)$$

где  $a, u, w \in R$ ,  $b, d > 0$ ,  $c \geq 0$ ,  $x$  – смещение плазменного шнура,  $w$  – координатное возмущение,  $a, b, c = r/L$ ,  $d = 1/r$  – параметры,  $L, r$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки управления.

Таблица 1: Параметры проектирования ITER и ITER-FEAT

Параметры	ITER	ITER-FEAT
Ток плазмы (МА)	21	15
Большой радиус (м)	8.1	6.2
Малый радиус (м)	2.8	2.0
Вытянутость	1.6	1.85
$Q = \frac{\text{Мощность термоядерного синтеза}}{\text{Мощность дополнительного нагрева}}$	$\infty$	$> 10$
Мощность термоядерного синтеза (GW)	1.5	0.5
Продолжительность горения (sec)	1000	400
Постоянная времени вертикальной неустойчивости (sec)	$\approx 1$	$\approx 0.1$

*Многосвязная модель плазмы в токамаке.* В работе решалась задача управления током, положением и формой плазмы для двух версий ИТЭР: ITER ( $Q = \infty$ ) и ITER-FEAT [Fusion Energy Advanced Tokamak] ( $Q > 10$ ). Параметры проектирования данных версий ИТЭР приведены в табл. 1. В проекте ИТЭР требуется управлять границей плазмы в диверторной конфигурации посредством управления расстояниями (щелями) между

сепаратрисой и первой стенкой в шести различных точках. Поперечное сечение плазмы двух версий ИТЭР, расположение обмоток полоидального магнитного поля (PF), центрального соленоида (CS), а также расположение управляемых щелей ( $g_1 \rightarrow g_6$ ) представлены на рис. 4.

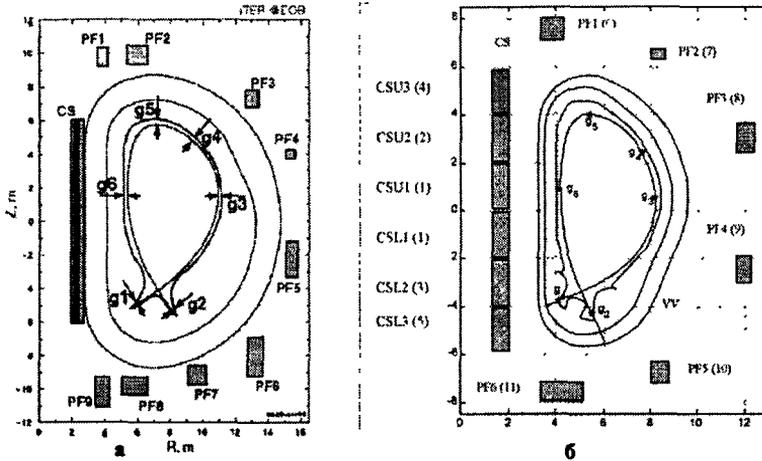


Рис. 4. Поперечное сечение двух версий ИТЭР с расположением измеряемых щелей между сепаратрисой и первой стенкой: а - ИТЭР ( $Q=\infty$ ), б - ИТЭР-FEAT ( $Q>10$ ): PF – Poloidal Field, CS – Central Solenoid, VV – Vacuum Vessel

Линейные модели плазмы получались центральной и домашними командами проекта ИТЭР посредством процедуры численной линеаризации нелинейных моделей плазмы относительно базовых плазменных магнитных конфигураций. При этом в плазмозфизических кодах, реализующих нелинейные модели плазмы, использовалось разбиение проводящих структур на ряд магнитно-взаимосвязанных контуров, расположенных в горизонтальной плоскости и пронизываемых полоидальными магнитными потоками, включая плазменный виток. Для описания равновесия плазмы использовалось уравнение Грэда-Шафранова. Динамика токов в обмотках полоидальных полей и в металлических структурах описывается векторным уравнением  $d\Psi/dt + RI = TV$ , где  $\Psi$  - вектор магнитных потоков, связанных с каждым пассивным или активным контуром,  $R$  - диагональная матрица активных сопротивлений,  $V$  - вектор напряжений на обмотках полоидальных полей,  $I$  - вектор токов в полоидальных обмотках и проводящих структурах,  $T$  - матрица из нулей и единиц, в соответствии с которой входные напряжения  $V$  прикладываются только к полоидальным обмоткам. Линейная форма дифференциальных уравнений получается посредством разложения токов  $I$  относительно их равновесных значений  $I_{ref}$

в выбранной магнитной конфигурации  $I(t) = I_{ref} + \delta I(t)$ :  $L^* d\delta I / dt + R\delta I + Q\delta w / dt = TV$ , где  $L^* = \partial\Psi / \partial I$  - полная матрица индуктивностей, включающая в себя плазменный вклад,  $\delta V$  - вектор управляющих напряжений. Вектор  $\delta W = [\beta_p, I_i]^T$  является возмущением, воздействующим на профиль плазменного тока,  $I_i$  - внутренняя индуктивность плазменного шнура,  $\beta_p$  - отношение газокINETического давления плазмы к давлению внешнего магнитного поля,  $Q = \partial\Psi / \partial W$  - матрица возмущений, определяющая чувствительность магнитных полей к изменениям  $I_i$  и  $\beta_p$ . В итоге, линейная модель объекта может быть представлена в форме  $dx/dt = Ax + Bv + Edw/dt$ ,  $y = Cx + Fw$ , где  $A = -L^{*-1}R$ ,  $B = L^{*-1}T$ ,  $E = -L^{*-1}Q$ ,  $x = \delta I$  - вектор состояния,  $w = \delta W$ ,  $v = \delta V$ ,  $F$  - матрица возмущения в уравнении наблюдения,  $y = [\delta g, \delta I_{PF}, \delta I_p, \delta Z_p, \delta R_p]^T$  - вектор наблюдения, содержащий векторы вариации щелей  $\delta g$ , токов в обмотках полоидального поля  $\delta I_{PF}$ , вариацию плазменного тока  $\delta I_p$ , вертикальное  $\delta Z_p$  и горизонтальное  $\delta R_p$  смещения центра плазменного тока. Применяя подстановку  $x = p + Ew$ , приходим к более удобной форме уравнений для численного моделирования, которая не содержит производной от возмущения  $w$ :

$$dp/dt = Ap + Bv + AEw, \quad y = Cp + (CE + F)w. \quad (2)$$

Порядок модели (2) при синтеза регуляторов задавался в диапазоне 35 ÷ 67.

*Модель инвертора напряжения.* В ААС используются исполнительные устройства, содержащие нелинейные звенья со сложными разрывными характеристиками. К ним, в частности, относятся мостовые преобразователи напряжения, применяемые для создания магнитных полей, управляющих плазмой. Они позволяют реализовать законы управления оптимальные по быстродействию, т. к. с их помощью напряжение источника питания может скачком прикладываться к нагрузке и практически мгновенно изменять на ней полярность.

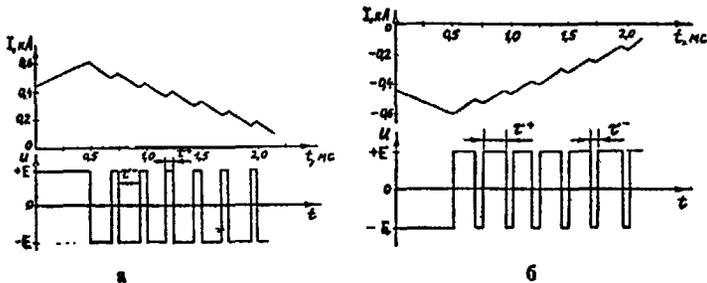


Рис. 5. Осциллограммы идентификации инвертора напряжения токамака Туман-3:  
а -  $I_0 > 0$ , б -  $I_0 < 0$

Для измерения временных зон нечувствительности инвертора напряжения, как исполнительного устройства токамака Тумен-3, использовались режимы его работы с максимальной частотой автоколебаний при замыкании отрицательной обратной связью на индуктивную нагрузку без объекта управления. На рис. 5 представлены осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $u$ , полученные при работе инвертора напряжения в данных режимах. Отсюда видно, что инвертор напряжения имеет две характерные временные зоны нечувствительности:  $\tau^+$  и  $\tau^-$ , длительность которых определяется знаком тока  $I$  в индуктивной нагрузке. Зона  $\tau^+$  соответствует положительной величине напряжения  $+E$ , приложенного к нагрузке, а зона  $\tau^-$  - отрицательной:  $-E$ . При этом выполняются следующие соотношения:  $I > 0$ ,  $\tau^- = 200 \mu\text{s}$ ,  $\tau^+ = 50 \mu\text{s}$ ;  $I < 0$ ,  $\tau^- = 50 \mu\text{s}$ ,  $\tau^+ = 200 \mu\text{s}$ , которые обеспечивают стремление тока  $I$  к нулю при любом знаке начального условия  $I_0$ . Минимальный период, с которым можно переключать инвертор,  $T_{\min} = \tau^+ + \tau^- = 250 \mu\text{s}$ , а максимальная частота -  $f_{\max} = 1/T_{\min} = 4 \text{kHz}$ .

*Модель многофазного тиристорного выпрямителя.* В больших токамаках и в ИТЭР обмотки полоидальных магнитных полей питаются от управляемых многофазных тиристорных выпрямителей: преобразователей напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока (AC/DC convertors). Такого типа нелинейное устройство импульсного действия со сложной динамикой представляется как последовательное соединение нелинейного блока насыщения и линейного звена с передаточной функцией вида  $[\exp(-Ts)]/(1+Ts)$ .

В третьей главе разрабатывается адаптивная автоколебательная система автоматической оптимизации плотности плазмы в открытой магнитной ловушке ОГРА-3.

Для решения задачи автоматической оптимизации системы обратной связи при стабилизации желобковой неустойчивости плазмы был предложен импульсный метод поиска с переменной частотой пробных воздействий, определяемой частотой релаксационных автоколебаний. Во время нарастания плотности плазмы при каждом выходе замкнутой системы за границу устойчивости, когда возникают неустойчивые колебания, приводящие к сбросу плотности до некоторого уровня, с помощью многоканального автоматического оптимизатора на верхнем уровне ААС формируется направление изменения параметров обратной связи в зависимости от знака получаемых приращений пороговой плотности.

Этот метод дает возможность отыскивать и поддерживать оптимальные значения параметров обратной связи, соответствующие максимальной

пороговой плотности. Экстремальное управление данным объектом сводится к поиску максимума порогового критерия качества. Для реализации метода предложено использование шаговых алгоритмов поиска с совмещенными пробными и рабочими шагами.

Для одномерного случая поиск представляет собой алгоритм с дискретным шагом при сбросах плотности  $n$ . При этом рабочее смещение управляемого параметра  $\lambda$  на  $i$ -том шаге  $\delta\lambda_i$  поиска  $\max n_{\max}$  записывается в виде рекуррентной формулы

$$\delta\lambda_i = \delta\lambda_{i-1} \text{sign}[n_{\max}(\lambda_{i-1}) - n_{\max}(\lambda_{i-2}) + \kappa], \quad (3)$$

где  $\kappa$  - зона нечувствительности автоматического оптимизатора,  $i$  - номер сброса  $n$ . Когда сброс  $n$  происходит до некоторого фиксированного уровня  $n_{\min}$ , можно применить алгоритм поиска с постоянным изменением параметра до порога

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} - a\delta t_i - 2b, \lambda_{i+1} = \lambda_i + a\delta t_{i+1} + 2b, \quad (4)$$

где  $\delta t_i, \delta t_{i+1}$  - интервалы времени между соседними сбросами плотности плазмы,  $a, b > 0$ .

Для решения задачи поиска по многим параметрам предложены два алгоритма с совмещенными пробными и рабочими шагами. Эти алгоритмы являются обобщением однопараметрических алгоритмов (3), (4) на многомерный случай. Первый алгоритм является алгоритмом со сменой переменной при каждом шаге. При сбросах  $n$  совершаются шаги поочередно по каждой переменной. Если после шага по какому-либо параметру  $\beta_r$  знак разности

$$\delta n_{\max}^N = n_{\max}(\beta^N) - n_{\max}(\beta^{N-1}) + \kappa, \quad (5)$$

где  $N$  - номер сброса  $n$ , изменится с положительного на отрицательный, то в следующем рабочем такте в момент сброса  $n$  совершаются одновременно два шага в обратном направлении по предыдущему параметру и очередной шаг по последующему. Рекуррентное соотношение для этого алгоритма записывается в виде

$$\beta^N = \beta^{N-1} + e_r \delta\beta_r^N + e_{r-1} \delta\beta_{r-1}^N, \quad (6)$$

где

$$\delta\beta_r^N = \begin{cases} \delta\beta_r^{N-M}, & \delta\beta_r^{N-M+1} = 0, \\ (\delta\beta_r/2)^{N-M+1}, & \delta\beta_r^{N-M+1} \neq 0, \end{cases} \quad \delta\beta_{r-1}^N = \begin{cases} -2\delta\beta_{r-1}^{N-1}, & \delta n_{\max}^N < 0, \\ 0, & \delta n_{\max}^N > 0, \end{cases}$$

$r$  - номер параметра,  $M$  - число параметров,  $e_1, e_2, \dots, e_M$  - координатные орты,  $q$  - номер цикла обхода переменных,  $r = N - (q-1)M$ ,  $N, q = 1, 2, 3, \dots$ .

Второй алгоритм представляет собой последовательное применение процедуры (4) с постоянным изменением параметра до порога к каждой переменной  $\beta_r$ , т. е.

$$\beta_r^N = \beta_r^{N-1} - a_r \delta^N - 2b_r, \quad \beta_r^{N+1} = \beta_r^N + a_r \delta^{N+1} + 2b_r. \quad (7)$$

При этом поисковыми шагами являются приращения настроечных параметров за интервалы времени, определяемые соседними сбросами плотности  $n$ .

Исследование одно- и многопараметрических алгоритмов настройки (3)-(7) проведено на аналоговой модели одной моды желобковых колебаний плазмы, стабилизированной двумерным форсирующим звеном, с помощью разработанных оптимизаторов. Работа двухканального варианта автоматического оптимизатора со сменой параметра при каждом шаге (5), (6) в случае пологого гребня функции качества  $n_{\max} = f_1(\xi, \lambda)$ , где  $\xi = \tau/T_0$ , дает сходимость траекторий поиска к гребню, вдоль которого они "блуждают". Если на гребне располагаются локальные экстремумы (функция  $n_{\max} = f_2(\lambda_1, \lambda_2)$ , где  $\lambda_1, \lambda_2$  - параметры перекрестных связей двумерного форсирующего звена), то траектории поиска сходятся к одному из них в зависимости от начальных условий. На рис. 6 приведены осциллограммы поиска  $n_{\max}$  при настройке трехканальным вариантом дискретного автоматического оптимизатора по алгоритму (5), (6) параметров двумерного форсирующего звена  $\lambda_1, \lambda_2, \xi$  в обратной связи одной моды.

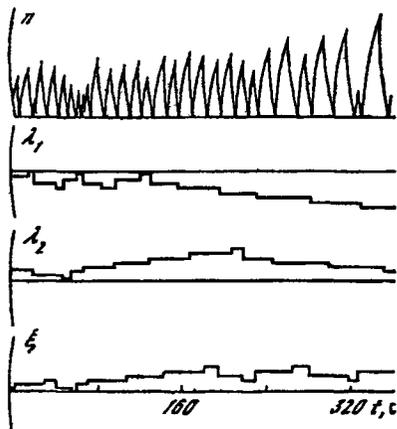


Рис. 6. Работа трехканального автоматического оптимизатора

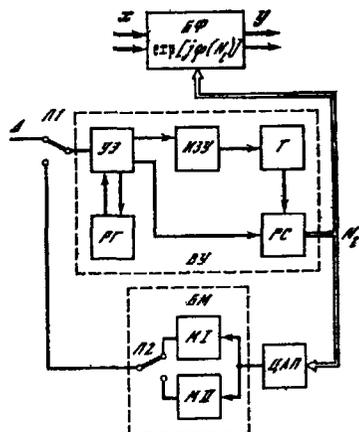


Рис. 7. Блок-схема электронного автоматического оптимизатора

Аналитически исследованы алгоритмы поиска (3), (5), (6) с дискретным изменением переменной при сбросах оптимизируемой величины  $n$  и  $c$

постоянным изменением переменной  $n$  до порога (4), (7) при использовании пороговой функции качества  $\hat{n}$  вида  $\hat{n} = n^* - g|x - x^*|$ , где  $x \in [x^* - g^{-1}n^*, x^* + g^{-1}n^*]$ ,  $n^* > 0$ ,  $g > 0$  для одномерного поиска и для двумерной пороговой функции качества  $\hat{n} = n^* - g_1|x_1 - x_1^*| - g_2|x_2 - x_2^*|$ , где  $g_1 > 0$ ,  $g_2 > 0$ , а область определения переменных  $x_1, x_2$  задана неравенством  $g_1|x_1 - x_1^*| + g_2|x_2 - x_2^*| < n^*$ . Получены аналитические соотношения, позволяющие оценить точность (потери на "рысканье") и быстродействие (время поиска) предложенных алгоритмов поиска автоматической оптимизации с пороговым критерием качества  $\hat{n}$ . Для исследования алгоритма с постоянным изменением переменной до порога применены методы многолистной фазовой плоскости и точечных отображений, которые позволили доказать сходимость к экстремуму пороговой функции качества как в одномерном, так и в двумерном случае.

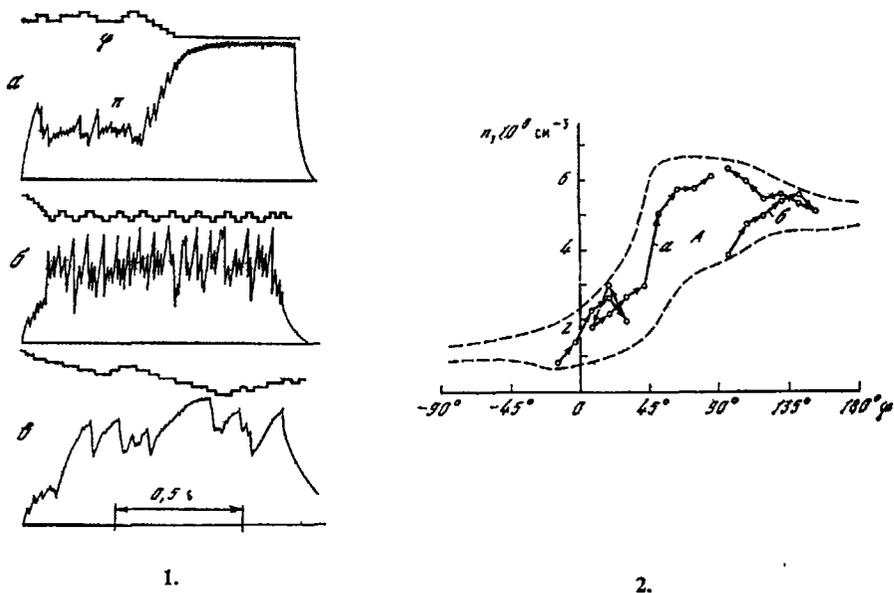


Рис. 8. Поиск  $\varphi_{opt}$  на установке Огра-3: 1) а – прекращение сбросов плотности после нахождения  $\varphi_{opt}$ , б – рысканье в области максимальных пороговых значений плотности, в – автоматический переход на отыскание  $\varphi_{opt}$  с частотой внешнего воздействия; 2) поиск  $\max n_{max}$  на плоскости "плотность  $n$  – угол фазирования  $\varphi$ "

С целью экспериментальной проверки на термоядерной установке ОГРА-3 поисковых принципов автоматической оптимизации системы обратной связи был разработан электронный автоматический оптимизатор (АО) для настройки угла фазирования  $\varphi$  (рис. 7). Оптимизатор содержит вычислительное устройство (ВУ), блок фазирования (БФ), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и блок моделей (БМ). Сигнал  $n$ , пропорциональный плотности плазмы, поступает на вход ВУ с датчика плотности. Вычислительное устройство своим выходным двоичным кодом  $N_l$  ( $l$  – номер кода) управляет БФ, преобразующим код  $N_l$  в фазовый сдвиг между двумерным вращающимся вектором входных  $\vec{x}$  и выходных  $\vec{y}$  величин в соответствии с уравнением  $\vec{y} = \exp[j\varphi(N_l)]\vec{x}$ . Эксперименты проводились с первой модой желобковых колебаний, которая в процессе накопления плазмы возникает раньше других мод. Блок фазирования включался в двумерный тракт обратной связи 1-й моды при включенных каналах стабилизации (с постоянными параметрами) 2-й и 3-й мод (рис. 1).

В экспериментах наблюдался разный характер поведения плотности  $n$  в зависимости от вакуумных условий при поиске  $\max n_{\max}$  (рис. 8.1). После нахождения АО оптимального угла фазирования  $\varphi_{opt}$  сбросы либо прекращались (рис. 8.1, а), либо происходило “рысканье” в области максимальных пороговых значений плотности (рис. 8.1, б). В первом случае возникла необходимость в изменении алгоритма поиска. Распознавание ситуации и введение автоматического перехода на отыскание  $\varphi_{opt}$  с частотой внешнего воздействия позволило продолжить поиск, когда сбросы плотности исчезали (рис. 8.1, в).

Оциллограммы поиска максимума пороговой плотности из разных начальных условий на плоскости на плоскости “ $n-\varphi$ ” (рис. 8.2) представляются в виде траекторий, проходящих через точки с координатами поисковых шагов. Траектории расположены в некоторой области  $A$  и сходятся к зоне экстремальных значений в пределах  $5.5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3} < \max n_{\max} < 6.5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$  при  $45^\circ < \varphi < 100^\circ$ . Максимальная плотность определяется техническими параметрами установки ОГРА-3 в выбранном режиме работы. Оптимизатор находил  $\varphi_{opt}$  в течение импульса инжекции плазмы длительностью 1-2 sec не более чем за 15-16 шагов. При этом наблюдалось увеличение пороговых значений плотности в 7-8 раз (рис. 8.2). Частоты желобковых колебаний первой моды не превышали 150 kHz и находились в пределах частотного диапазона БФ.

В четвертой главе рассматриваются адаптивные системы непрерывного оценивания координатного возмущения и параметров модели плазмы в токамаках, представляемой уравнением вида (1,а), полученным на

этапе идентификации в гл. 3. Требуется одновременно оценивать параметры  $a$ ,  $b$  и возмущение  $w$  по наблюдениям выходной величины объекта  $x$  и входного воздействия  $I$ .

Для решения задачи оценивания разработан метод адаптивной идентификации состояния. Основой идентификатора состояния (наблюдателя) является система уравнений с моделью объекта вида (1,а) и расширенным вектором состояния, две компоненты которого отводятся на оценивание возмущения  $w$  и его скорости  $\mu = \dot{w}$

$$\dot{\hat{x}} = -\hat{a}\hat{x} + \hat{b}(I + \hat{w}) + K_1(x - \hat{x}), \quad \dot{\hat{w}} = \hat{\mu} + K_2(x - \hat{x}), \quad \dot{\hat{\mu}} = K_3(x - \hat{x}), \quad (8)$$

где  $\hat{x}$ ,  $\hat{w}$ ,  $\hat{\mu}$  - оценки соответствующих компонент расширенного вектора состояния объекта,  $K_1, K_2, K_3$  - коэффициенты. Априори предполагается, что величины  $a, b, w$  изменяются значительно медленнее, чем  $x$  и  $I$ , поэтому при синтезе алгоритмов настройки (адаптации)  $\hat{a}, \hat{b}$  они считаются постоянными. Если считать, что параметры объекта (1,а) и его модели в (8) равны  $a = \hat{a}, b = \hat{b}$ , то задав корни характеристического уравнения для вектора ошибки оценивания равными  $\lambda_0$ , получим выражения для коэффициентов идентификатора (8) в виде

$$K_1 = -(a + 3\lambda_0), \quad K_2 = 3\lambda_0^2 / b, \quad K_3 = -\lambda_0^3 / b.$$

Предложены алгоритмы раздельной и совместной автоматической подстройки коэффициентов модели объекта в идентификаторе (8) к параметрам объекта (1,а). Настройка коэффициента  $\hat{b}$  в (8) проводилась по разности модулей и квадратов выходных величин объекта и его модели

$$\dot{\hat{b}} = \xi_1(|x| - |\hat{x}|), \quad \dot{\hat{b}} = \xi_2(x^2 - \hat{x}^2), \quad \xi_1, \xi_2 > 0, \quad (9)$$

а настройка коэффициента  $\hat{a}$  в (8) - по разности фаз  $\psi - \hat{\psi}$  этих величин

$$\dot{\hat{a}} = \xi_3 \langle x\hat{x} \rangle \approx \xi(\psi - \hat{\psi}). \quad (10)$$

Здесь знак  $\langle \rangle$  означает усреднение на периоде автоколебаний.

Алгоритм совместной настройки коэффициентов идентификатора были получены с использованием прямого метода Ляпунова и движения по антиградиенту функции рассогласования выходных величин объекта и его модели. Функция Ляпунова выбиралась в виде положительно определенной квадратичной формы

$$V = \kappa \varepsilon^T P \varepsilon + \varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2, \quad \text{где}$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_w \quad \varepsilon_\mu]^T = [x - \hat{x} \quad w - \hat{w} \quad \mu - \hat{\mu}]^T, \quad \varepsilon_a = a - \hat{a}, \quad \varepsilon_b = b - \hat{b},$$

$P = P^T, P > 0, \kappa > 0$ . Алгоритм настройки параметров  $\hat{a}, \hat{b}$  получен из условия  $\dot{V} < 0$ :

$$\dot{\hat{a}} = -\eta \varepsilon_x \hat{x}, \quad \dot{\hat{b}} = \eta \varepsilon_x (I + \hat{w}), \quad \eta > 0. \quad (11)$$

Алгоритм градиентной настройки  $\hat{a}, \hat{b}$  имеет вид

$$\dot{\chi} = -\Gamma \nabla_{\hat{a}, \hat{b}} Q, \quad (12)$$

где  $\chi = [\hat{a} \ \hat{b}]^T$ ,  $\Gamma = \text{diag}[\lambda_a \ \lambda_b]$  - матрица весовых коэффициентов, а непрерывно минимизируемая функция качества в (12) применительно к (8) выбиралась в двух вариантах:  $Q = \varepsilon_x^2$  и  $Q = \dot{\varepsilon}_x^2$ . Тогда (12) для  $Q = \varepsilon_x^2$  можно записать в виде системы уравнений

$$\dot{\hat{a}} = 2\lambda_a (x - \hat{x})\alpha_1, \quad \dot{\hat{b}} = 2\lambda_b (x - \hat{x})\alpha_2, \quad (13)$$

где  $\alpha_1 = \partial \hat{x} / \partial \hat{a}$ ;  $\alpha_2 = \partial \hat{x} / \partial \hat{b}$  - функции чувствительности переменной  $\hat{x}$  идентификатора по параметрам модели  $\hat{a}, \hat{b}$ . Система дифференциальных уравнений для определения  $\alpha_1, \alpha_2$  находится дифференцированием уравнений (8) по  $\hat{a}, \hat{b}$

$$\dot{\alpha}_1 = -\dot{\hat{x}} - (\hat{a} + K_1)\alpha_1 + b\beta_1, \quad \beta_1 = \gamma_1 - K_2\alpha_1, \quad \dot{\gamma}_1 = -K_3\alpha_1, \quad (14, a)$$

$$\dot{\alpha}_2 = -(\hat{a} + K_1)\alpha_2 + b\beta_2 + I + \dot{\hat{w}}, \quad \beta_2 = \gamma_2 - K_2\alpha_2, \quad \dot{\gamma}_2 = -K_3\alpha_2, \quad (14, b)$$

где  $\beta_1 = \partial \hat{w} / \partial \hat{a}$ ,  $\gamma_1 = \partial \hat{\mu} / \partial \hat{a}$ ,  $\beta_2 = \partial \hat{w} / \partial \hat{b}$ ,  $\gamma_2 = \partial \hat{\mu} / \partial \hat{b}$  - функции чувствительности переменных  $\hat{w}, \hat{\mu}$  по параметрам  $\hat{a}, \hat{b}$ .

Алгоритмы настройки (9)-(14) были исследованы численным моделированием на моделях горизонтального движения плазменного шнура с распределенными и сосредоточенными параметрами токамаков Т-14 и ТУМАН-3. Наилучший результат по точности оценивания показали алгоритмы (9), (12). На рис. 9 а приведены графики процессов совместного оценивания постоянных параметров объекта  $a, b$  и изменяющегося по треугольному закону возмущения  $w$ , когда модель объекта (1, а, б) включена в релейный автоколебательный контур системы стабилизации положения плазмы токамака Т-14.

Для одновременного оценивания коэффициента усиления  $k = b/a$  объекта (1, а) и возмущения  $w$  в реальном времени был разработан идентификатор состояния с двумя моделями объекта. Во второй модели шумом  $\dot{\hat{x}}$  будем считать сигнал  $\dot{\hat{x}} = k(\dot{w}(t) + \dot{y}(t))$ , где  $T_2$  - постоянная времени второй модели в (8), отсутствует корректирующий сигнал  $K_1(x - \hat{x})$ .

Поэтому это техническое решение позволяет повысить точность оценивания коэффициента  $k$ . Данное устройство было применено в физическом эксперименте на токамаке ТУМАН-3 при стабилизации горизонтального положения плазмы с целью выяснения эволюции и диапазона изменения коэффициента усиления и координатного возмущения. Адаптивный идентификатор состояния, принимая входные сигналы  $x$  и  $I$ , подключался к токамаку с инвертором напряжения в автоколебательном контуре управления. На рис. 9,б показаны осциллограммы оценок  $\hat{w}$ ,  $\hat{k}$ , полученных в трех различных импульсах плазменного разряда при неизменных условиях эксперимента. Длительность разряда – 50  $ms$ . В эксперименте наблюдалась достаточно хорошая повторяемость оценок в проведенных разрядах, причем расхождение оценок  $w$  меньше, чем  $k$ .

Выходные сигналы идентификатора использовались как для диагностики параметров плазмы в темпе наблюдений, так и для работы адаптивных систем управления плазмой.

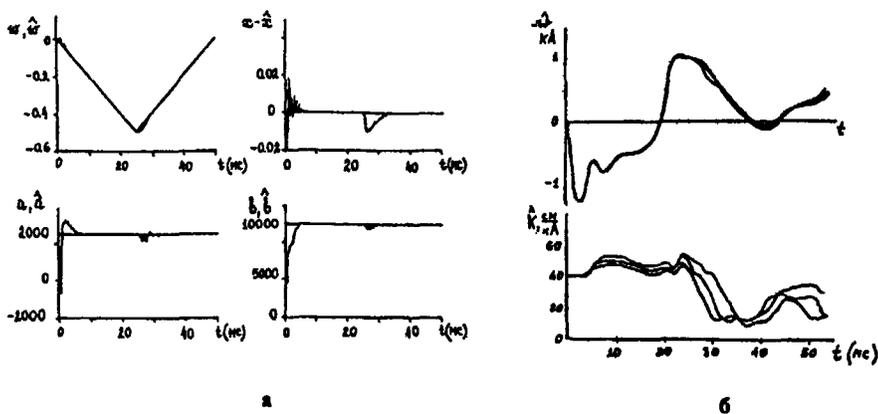


Рис. 9. Оценивание параметров и возмущения: а – градиентным методом на модели токамака Т-14, б – посредством двух моделей идентификатора состояния в эксперименте на токамаке Туман-3

В разд. 4.3 приводится связь параметров  $k=b/a$ ,  $T=1/a$  и возмущения  $w$  модели объекта (1,а) с физическими параметрами плазмы. Рассмотрен токамак с вакуумной камерой, имеющей малый радиус  $\rho$ , большой радиус  $R_0$  ( $R_0/\rho \gg 1$ ), толщину стенок  $h$  и удельную проводимость  $\sigma$ . Если постоянная времени затухания тороидальных токов в такой камере  $\tau$  меньше временного масштаба изменения параметров плазмы, входящих в уравнение

равновесия, то искомые соотношения имеют вид:  $T = 2R_0^2 \tau / [\rho^2 \Gamma(n_{eq} - n_{ex})]$ ,  
 $k = b_c^* R_0^2 / [I_p \Gamma(n_{eq} - n_{ex})]$ ,  $w = c(\bar{B}_{ex} - B_{eq}^0) / b_c$ ,  $\Gamma = \ln(8R_0 / a^0) + I_m^0 / 2 + \beta - 3/2$ ,  
 где  $B_{ex}$  - вертикальная компонента удерживающего магнитного поля на оси  
 плазменного шнура (без учета поля токов камеры),  $B_{eq}$  - вертикальная  
 компонента удерживающего поля, необходимая для равновесия  
 плазменного шнура с большим радиусом  $R_0$ ,  $n_{eq} = -(R_0 / B_{eq}^0) (\delta B_{eq} / \delta x)_{R_0}$ ,  
 $n_{ex} = -(R_0 / B_{eq}^0) (\delta B_{ex} / \delta x)_{R_0}$ ,  $b_c, b_c^*$  - коэффициенты, связывающие токи в  
 обмотках полоидального поля и магнитную индукцию. Коэффициент  
 усиления объекта  $k$  обратно-пропорционален току плазмы  $I_p$ .

В пятой главе представляются результаты по разработке релейных  
 систем управления положением плазмы в токамаках. Ставится и решается  
 задача достижения наилучшей точности стабилизации положения плазмы в  
 релейных автоколебательных системах посредством оптимизации  
 стационарных регуляторов и адаптации на верхнем уровне ААС.

*Система с ПД-регулятором токамака Т-14.* Исследуется релейная  
 автоколебательная система с ПД-регулятором токамака Т-14, в которой  
 инвертор напряжения имеет временную зону нечувствительности в режиме  
 клямпинга длительностью  $\tau_2$ . Объект описывается системой уравнений  
 $T_0 \dot{x} + x = K_d I, \dot{I} = \xi u, \xi = 1/L$ . Закон управления задается прямой  
 переключения  $u = K_d^{-1} x, \dot{x} = y$ , где  $K_d$  - коэффициент усиления  
 дифференциатора. Рассматривая динамику замкнутой системы на фазовой  
 плоскости  $x, y$  и преобразование точек  $S$  полуоси  $x > 0$  в точки  $S'$   
 $x < 0$ , приходим к функции соответствия вида  $S = -\alpha \hat{x} - \beta \ln|1 - \gamma \hat{x}|$ ,  
 $S' = +\alpha \hat{x} - \beta \ln|1 + \gamma \alpha \hat{x}|$ , где  $\hat{x}$  - параметр, являющийся абсциссой точки  
 переключения,  $\alpha = T_0 / K_d - 1$ ,  $\beta = K_0 T_0 \xi E_0$ ,  $\gamma = (K_d K_0 \xi E_0)^{-1}$ ,  $\sigma = e^{\tau / T_0}$ .  
 Положив  $S = S' = S^*$ , получим нелинейное уравнение  
 $(1 + \gamma \alpha \hat{x}) / (1 - \gamma \hat{x}) = \exp(2\alpha \hat{x} / \beta)$  для определения параметра  $\hat{x}^*$ . Решение  
 этого уравнения позволяет найти период  $T = 2 \sum_{i=1}^3 \tau_i$ , где  
 $\tau_1 = T_0 [1 - (K_d \xi K_0 E_0)^{-1} \hat{x}^*]^{-1}$ ,  $\tau_3 = T_0 \ln[1 + \hat{x}^* (K_d \xi K_0 E_0)^{-1} e^{-\tau / T_0}]$ , и амплитуду  
 $S^*$  автоколебаний.

*Система с П-регулятором токамака ТУМАН-3.* Для релейной системы  
 управления токамака ТУМАН-3 разработана методика оценки величины

распределенного запаздывания в контуре обратной связи по экспериментальным данным. В основу методики положены рассчитанные зависимости амплитуды смещения плазмы и периода автоколебаний от времени запаздывания при работе системы стабилизации с пропорциональным законом управления.

В этом случае процесс управления можно описать системой уравнений с безразмерным временем запаздывания  $\theta$

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{y}, \quad \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} = -\bar{y} + \delta, \quad \delta = -\text{sign } \bar{x}(\bar{t} - \theta), \quad (15)$$

где  $\bar{x} = x/x^0$ ,  $\bar{y} = y/y^0$ ,  $\bar{t} = t/t^0$ ,  $x^0, y^0, t^0$  - параметры нормирования,  $\delta \in \{+1, -1\}$  - безразмерное входное воздействие. Фазовый портрет системы (15) приведен на рис. 10,а.

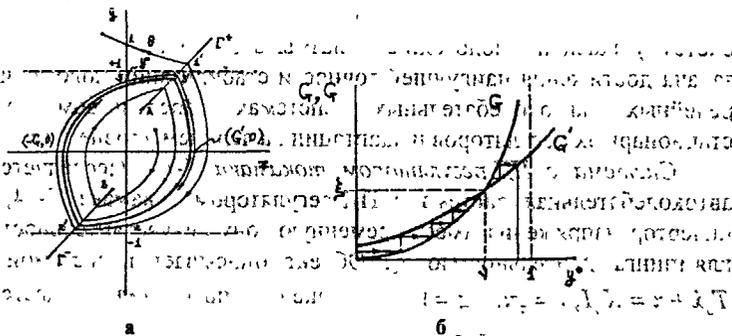


Рис. 10: Фазовый портрет а) и диаграмма точечных отображений б) релейной системы с П- регулятором и запаздыванием токаака ТУМАН-3

Функции соответствия для точечного преобразования полуоси  $\bar{x} < 0$  в полуось  $\bar{x} > 0$   $G_1 = -\bar{y}^0 - \ln(1 - \bar{y}^0)$ ,  $G_2 = \bar{y}^0 + \theta - \ln[2 - (1 - \bar{y}^0)e^\theta]$  приведены на рис. 10,б в виде зависимостей от параметра  $\bar{y}^0$ . Эти зависимости имеют единственную точку пересечения, определяющую существование единственного предельного цикла. Сходимость фазовых траекторий к предельному циклу доказывает построенная между линиями  $G_1$  и  $G_2$  лестница Ламерея, соответствующая итерационному процессу  $G_i \rightarrow \xi$ ,  $i=1,2,3,\dots$ , начинающемуся из любой точки полуоси  $\bar{x} < 0$ . Построены безразмерные зависимости амплитуды  $\xi = \xi(\theta)$  и периода  $k = k(\theta)$  автоколебаний посредством решения нелинейного уравнения  $G(\bar{y}^0) = G(\bar{y}^0, \theta)$  для каждого значения  $\theta$ . Эти зависимости были аппроксимированы функциями  $\xi \approx 1,3\theta$ ,  $k \approx 3,5\sqrt{\theta}$ . Из них получены простейшие формулы для расчета времени запаздывания  $\delta t$  в контуре

системы управления либо по коэффициенту усиления объекта  $K_0$ :  $\delta = 0.77Lx_m / (K_0 E_0)$ , либо по его постоянной времени  $T_0$ :  $\delta = 0.082^2 / T_0$ . Для системы управления ТУМАН-3:  $\delta t \approx 77 \mu s$ .

*Система с компенсацией возмущения.* Разработан метод компенсации неконтролируемого возмущения, действующего на вход объекта управления, применительно к релейной автоколебательной системе стабилизации устойчивого горизонтального положения плазмы в токамаках. Блок-схема системы, реализующей данный метод по закону управления (16), приведена на рис. 11.

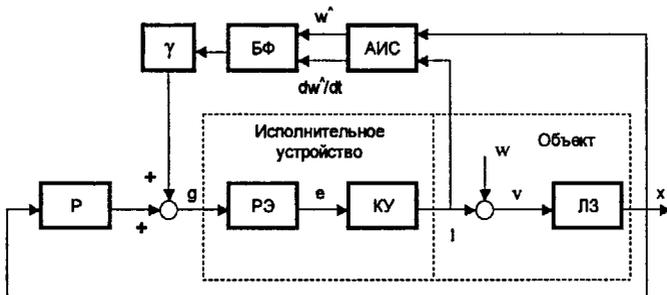


Рис. 11. Блок-схема системы управления с компенсацией неконтролируемого возмущения: ЛЭ – линейное звено, КУ – катушка управления, РЭ – релейный элемент, Р – регулятор, АИС – адаптивный идентификатор состояния, БФ – блок формирования

Идея метода состоит в том, что на вход объекта управления подается оценка величины возмущения  $\hat{w}$  с обратным знаком для компенсации  $w$  с целью ликвидации статической ошибки в выходной величине объекта  $x$ :

$$g = -[x + K_d d\hat{x} / dt + \gamma(\hat{w} / K_L + T_L / K_L \cdot d\hat{w} / dt)], \quad (16)$$

где  $K_L = 1/r$  и  $T_L = L/r$  – коэффициент передачи и постоянная времени катушки управления КУ. При рассмотрении медленных изменений возмущения  $w$  уравнение замкнутой системы для усредненных значений имеет вид

$$T_0 T_L \ddot{x} + (T_0 + T_L) \dot{x} + K_0 K_L K_n K_d \ddot{x} + (1 + K_0 K_L K_n) \dot{x} = K_0 [(T_L \dot{w} - \gamma K_n T_L \hat{w}) + w - \gamma K_n \hat{w}]. \quad (17)$$

После окончания переходного процесса приближения  $\hat{w}$  к  $w$ ,  $\dot{\hat{w}}$  к  $\dot{w}$ ,  $\ddot{\hat{x}}$  к  $\ddot{x}$  в адаптивном идентификаторе состояния АИС справедливы равенства  $\hat{w} = w$ ,  $\dot{\hat{w}} = \dot{w}$ ,  $\ddot{\hat{x}} = \ddot{x}$ . Подставляя их в (17) при  $\gamma = K_n^{-1}$ , где  $K_n$  – коэффициент пропорциональности, получаемый из условий вибрационного сглаживания автоколебаниями нелинейной характеристики

исполнительного устройства, получим стремление к нулю статической ошибки, т. е.  $\bar{x} \rightarrow 0$ . Таким образом, условие компенсации возмущения  $w$  посредством закона управления (16) имеет простой вид:  $\gamma = K_n^{-1}$ .

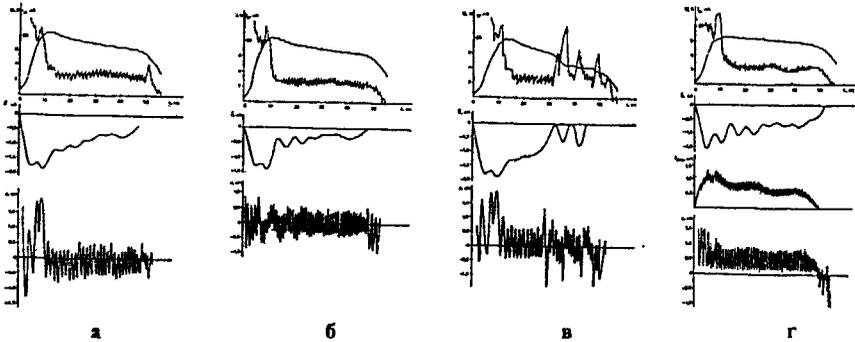


Рис. 12. Результаты экспериментов на токамаке ТУМАН-3:  $U$  – напряжение на обходе плазменного шнура,  $I_p$  – ток плазмы,  $\hat{\psi}$  – оценка координатного возмущения,  $x$  – смещение плазмы; а  $\gamma < \gamma_{opt}$ , б  $\gamma = \gamma_{opt}$ , в  $\gamma > \gamma_{opt}$ , г – стабилизация ПД-регулятором

Разработанный метод компенсации возмущения был верифицирован на моделях токамака Т-14 с сосредоточенными и распределенными параметрами, а также в экспериментах на токамаке ТУМАН-3. Эксперименты проводились с упрощенным вариантом алгоритма (16) при  $K_d=0$ . С целью выяснения влияния компенсирующего сигнала в алгоритме регулятора (16) исследована работа системы при различных значениях параметра регулятора  $\gamma$ , что отражено на рис. 12,а-в (разряды с током плазмы  $I_p \approx 80$  кА). При  $\gamma = 1.05 \cdot 10^{-3}$  см/В  $< \gamma_{opt}$  имеется недокомпенсация (рис. 12,а):  $\bar{x} \approx -0.13$  см; при  $\gamma = 2.1 \cdot 10^{-3}$  см/В  $= \gamma_{opt}$  – компенсация (рис. 12,б):  $\bar{x} \approx 0$ ; при  $\gamma = 3 \cdot 10^{-3}$  см/В  $> \gamma_{opt}$  перекомпенсация (рис. 12,в):  $\bar{x} \approx 0.13$  см. Зная величину  $\gamma_{opt}$ , можно определить коэффициент передачи исполнительного устройства:  $K_n = 1/\gamma_{opt} = 470$  В/см. Ликвидация статической ошибки является экспериментальным подтверждением правомерности уравнения (1,а) динамики плазменного шнура. На рис. 12,г показаны осциллограммы релейной стабилизации положения плазменного шнура при работе ПД-регулятора с параметрами  $K_d = 0.2$  мс,  $T_d = 50$  мкс при токе плазмы  $I_p \approx 70$  кА. За счет присутствия производной смещения в законе управления амплитуда смещения и тока управления несколько уменьшаются:  $x_m \approx 0.34 \div 0.4$  см,  $I_m \approx 0.16$  кА, а частота

возрастает:  $f \approx 1 \text{ kHz}$ . При этом статическая ошибка стабилизации имеет масштаб амплитуды смещения плазмы:  $\bar{x} \approx 0.6 \text{ см}$ .

*Оптимальная система стабилизации токамака ТВД.* Токамак ТВД предназначен для исследования плазмы с вытянутым поперечным сечением. Автоматическое управление положением вытянутого плазменного шнура в токамаке ТВД осуществляется двухконтурной ортогональной релейной системой управления. Оптимизация проводилась для контура горизонтальной стабилизации плазмы. Блок-схема системы стабилизации горизонтального положения плазмы приведена на рис. 13.

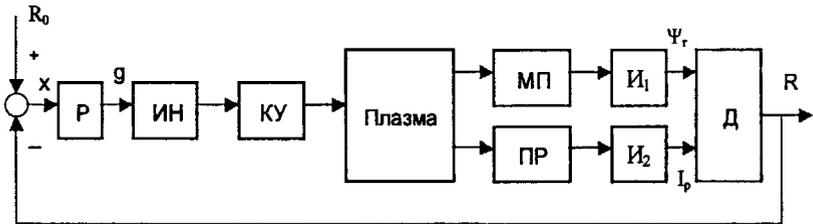


Рис. 13. Блок-схема системы стабилизации горизонтального положения плазмы в токамаке ТВД: Р – регулятор, ИН – инвертор напряжения, КУ – катушка управления, МП – магнитная петля, ПР – пояс Роговского, И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> – интеграторы, Д – делитель; сигналы:  $x$  – смещение плазмы,  $g$  – выходной сигнал регулятора,  $I_p$  – ток плазмы,  $R$ ,  $R_0$  – текущее и заданное значения большого радиуса,  $\Psi_r$  – магнитный поток

За критерий оптимизации была выбрана сумма  $\hat{x} = \tilde{x}_m + \bar{x}$  максимальной амплитуды автоколебаний  $\tilde{x}_m$  и статической ошибки  $\bar{x}$ . Проведены эксперименты с П- и ПД- регуляторами в замкнутом контуре управления при изменении в промежутках между разрядами величины коэффициента усиления дифференциатора  $K_d$  от нуля (П- регулятор) до  $K_d = 5 \text{ ms}$  при фиксированном напряжении источника питания инвертора напряжения  $E_0 = 200 \text{ V}$ . На рис. 14,а приведены зависимости  $\tilde{x}_m$  и  $\bar{x}$ , а также их суммы  $\hat{x}$  в функции от  $K_d$ . Отсюда видно, что при использовании ПД-регулятора в системе управления положением плазменного шнура по большому радиусу оптимальное значение коэффициента  $K_d$  лежит в интервале  $0.2 \div 1 \text{ ms}$ . Оптимизация  $K_d$  приводит к уменьшению, примерно, в 2 раза максимального значения величины модуля отклонения плазменного шнура от заданного горизонтального положения равновесия за время разряда по сравнению с наиболее неблагоприятным случаем (рис. 14,а).

На рис. 14,б показана зависимость частоты автоколебаний от коэффициента  $K_d$ . При увеличении  $K_d$  возрастает частота переключений

инвертора напряжения, что и приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний. При оптимальном значении  $K_d$  частота переключений инвертора ниже предельно возможной, т. е. ПД-регулятор не позволяет полностью использовать частотные возможности инвертора напряжения.

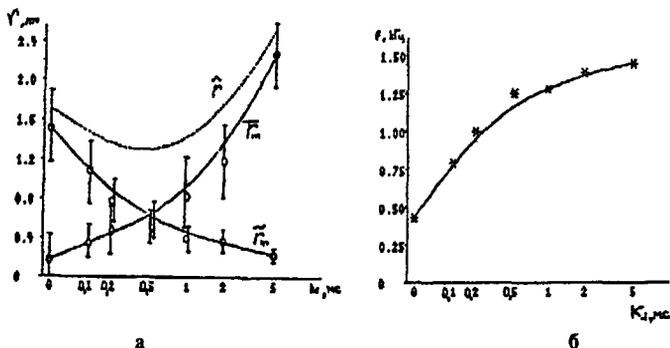


Рис. 14. Графики а) точности и б) частота автоколебательной системы управления в функции  $K_d$

*Оптимизация фазовых ограничений неустойчивого объекта.* При управлении неустойчивыми вертикальными смещениями плазмы в вытянутом по вертикали токамаке, область управляемости на плоскости смещения плазмы и тока управления ограничена, в силу ограниченности напряжения на управляющей обмотке. Поэтому возникает задача оптимизации выходной величины управляющего устройства с целью наилучшего использования области управляемости. Уравнение плазмы в вытянутом токамаке совместно с уравнением катушки управления в безразмерных параметрах имеют вид

$$d\bar{z} / d\bar{t} = \bar{z} + \bar{I} + \alpha \dot{\bar{I}} + \bar{w}, \quad d\bar{I} / d\bar{t} = \bar{u}, \quad |\bar{u}| \leq 1, \quad (18)$$

$$\bar{z} = z/z^0, \quad \bar{I} = I/I^0, \quad \bar{w} = w/w^0, \quad \bar{u} = u/u^0, \quad \bar{t} = t/t^0, \quad z^0 = K_0 ET/L,$$

$I^0 = ET/L, w^0 = ET/L, u^0 = E, t^0 = T, 0 \leq \alpha \leq 0.3$ . На рис. 15 построен фазовый портрет системы уравнений (18), представляющий собой два наложенных друг на друга семейства границ траекторных воронок вместе со штриховкой. Область управляемости в  $R^2$  ограничена полосой

$$X_u = \left\{ (\bar{z}, \bar{I}) \mid \bar{z} \in R, -\bar{z} - 1 - \alpha < \bar{I} < -\bar{z} + 1 + \alpha \right\}.$$

Если  $(\bar{z}_0, \bar{I}_0) \in R^2 / X_u$ , то никаким входным воздействием  $|\bar{u}| \leq 1$  фазовую точку невозможно перевести в полосу управляемости  $X_u$ .

Фазовые ограничения на координаты  $\bar{z}, \bar{I}$  определяют на плоскости область  $X$ , ограниченную прямоугольником. Если полоса управляемости  $X_u$  пересекает область ограничений  $X$ , то часть области  $X$ , не будет использоваться. Если  $X \subset X_u$ , то тогда не будет эффективно использоваться область управляемости  $X_u$ , т. к. ограничения слишком малы. Данное противоречие было разрешено путем нахождения оптимального случая, соответствующему квадрату среди множества вписанных прямоугольников ограничений в область управляемости  $X_u$  (рис. 16). При этом были учтены области черных дыр данных прямоугольников, в которые изображающая точка может попасть, но не может выйти согласно штриховке.

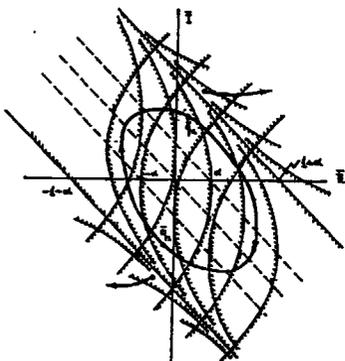


Рис. 15. Фазовый портрет неустойчивого объекта

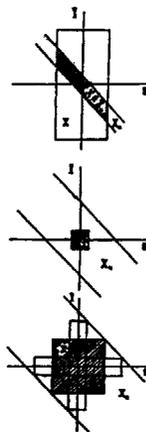


Рис. 16. Соотношения областей управляемости и фазовых ограничений

Оптимизация применительно к ИТЭР привела к увеличению проектного значения величины максимального выходного напряжения исполнительного устройства в 3.5 раза по сравнению с первой стадией расчетов, что дало возможность в 4 раза уменьшить величину перегулирования в системе управления и в 2.5 раза увеличить коэффициент использования области фазовых ограничений при наибольшем токе плазмы.

В шестой главе предлагаются и исследуются адаптивные системы минимизации амплитуды автоколебаний смещений плазмы в токамаках, позволяющие достигнуть предельной точности стабилизации при нулевой статической ошибке выходного сигнала.

Оптимальные автоколебания в релейных системах с апериодическими объектами второго порядка. Метод нахождения замкнутых оптимальных кривых автоколебаний основан на наложении друг на друга семейств фазовых траекторий уравнений объекта (1) при разных знаках  $u = \pm U$  с совмещением координатных осей и последующем отыскании замкнутой кривой, соответствующей удвоенной временной зоне нечувствительности релейного элемента. В качестве двухпозиционной модели релейного элемента исполнительного устройства принимается модель инвертора напряжения токамака Туман-3 (гл. 2) с симметричной временной зоной нечувствительности  $\tau^- = \tau^+ = \tau$  (рис. 17). Существование и единственность такой кривой доказывается следующей теоремой.

**Теорема.** Пусть дана система линейных дифференциальных уравнений объекта вида (1) с управляющим воздействием  $u$  при  $w=0$ . Тогда для каждого значения времени  $\tau \in R^+$  на фазовой плоскости  $x, I$  существует единственная замкнутая симметричная относительно начала координат кривая, состоящая из двух отрезков фазовых траекторий из семейства траекторий, определяемых двумя значениями входного воздействия  $u = \pm U = const \in R$ . Причем изображающая точка обегает эту кривую за время  $2\tau$ .

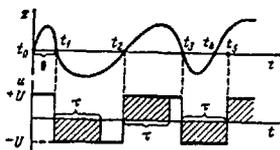


Рис. 17. Переключения релейного элемента

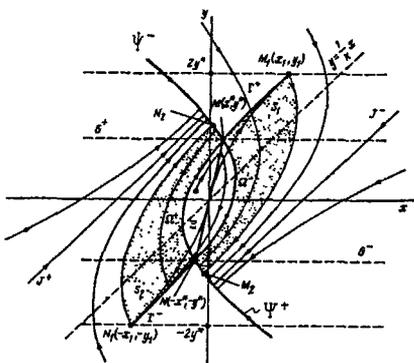


Рис. 18. Фазовый портрет оптимальных автоколебаний

Получены нелинейные законы управления, выводящие и удерживающие изображающую точку на замкнутой кривой автоколебаний  $\Omega$

$$g = f(I) - x, \quad f(I) = \begin{cases} f^-(I), & I^* < I, \\ f^0(I), & -I^* < I < I^*, \\ f^+(I), & I < -I^*. \end{cases} \quad (19)$$

В качестве примера на рис. 18 показан фазовый портрет оптимальной автоколебательной системы с нейтральным устойчивым объектом ( $a > 0, c = 0$ ,

$$v = |a|), \quad \text{для которого} \quad f^{\pm}(I) = \frac{b}{v} \left( I \mp \frac{U}{v} \right) \pm \frac{2Ub}{v^2 (1 + e^{-v\tau})} e^{\mp \frac{v}{U} \left( I \pm \frac{U}{2} \right)},$$

$$f^0(I) = \frac{b}{v} \left( 1 - \frac{2}{v\tau} \frac{1 - e^{-v\tau}}{1 + e^{-v\tau}} \right) I. \quad \text{В случае неустойчивого объекта } (a < 0 \text{ в } 1,а) \text{ для}$$

удержания объекта в области управляемости должно выполняться неравенство:  $\tau < \ln 2 / v$ .

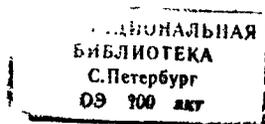
*Система адаптивной минимизации амплитуды автоколебаний входной величины устойчивого объекта.* Законы минимизации амплитуды типа (19), синтезированные по входной  $I$  и выходной  $x$  величинам объекта (1), являются труднореализуемыми на практике. Это связано с тем, что необходима непрерывная информация не только о неконтролируемом возмущении  $w$ , но и о неизвестных параметрах объекта  $a, b$ . Оценки  $w, a, b$  должны подставляться в довольно сложные нелинейные соотношения (19), причем необходима реализация перехода с одной функции  $f^{\pm}, f^0$  на другую.

Поэтому диссертантом предложено минимизировать не амплитуду выходного сигнала устойчивого линейного объекта  $x$ , а минимизировать амплитуду его входного сигнала  $v(t) = I(t) + w(t)$  в (1,а). Это возможно для линейных объектов с монотонно убывающей АЧХ. Такой подход существенно упрощает разработку способа минимизации амплитуды выходного сигнала  $x$  устойчивых объектов, т. к. объектом оптимизации теперь является только исполнительное устройство, содержащее динамическое звено (1,б) с уравнением 1-го порядка и известными параметрами катушки управления (КУ). Если  $w=0$ , то закон управления, обеспечивающий  $\min I_m$  при охватывании релейного элемента (РЭ) и КУ отрицательной обратной связью, имеет вид

$$g = \sigma \frac{u}{U} - I, \quad u = \pm U, \quad c = 0, \quad |u/U| = 1, \quad (20)$$

где  $\sigma = U\tau/2$ . Автоколебания в простейшей системе "РЭ - КУ" вызывают процесс установления устойчивого предельного цикла на фазовой плоскости  $x, I$  (рис. 19) при подаче пилообразного сигнала с выхода КУ на вход разомкнутого инерционного звена (1,а). Точечные преобразования

$\Pi^{\pm}$  прямых  $G^+ (I = +\sigma)$  и  $G^- (I = -\sigma)$  в себя приводят к линейным функциям соответствия (рис. 20)  $\Pi^{\pm} : x' = \alpha x \pm \beta$ , где  $\alpha = e^{-2v\tau}$ ,  $\beta = bUv^{-1} \left[ (1/v + \tau/2)(1 - e^{-v\tau}) - \tau \right] (1 - e^{-v\tau})$ . Поскольку  $\alpha < 1$ , то линейные



преобразования  $\Pi^\pm$  прямых в себя являются сжимающими в полном метрическом пространстве  $R$ , а следовательно, имеют единственные неподвижные точки:  $\Pi^\pm(\pm x^*) = \pm x^*$ . Проведенные точечные преобразования показывают, что существует единственная замкнутая кривая между прямыми  $G^+$  и  $G^-$  на плоскости  $x, I$  (предельный цикл), время движения по которой (период) равно  $2\tau$ .

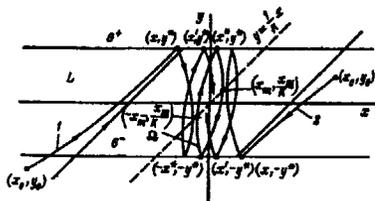


Рис. 19. Сходимость фазовых траекторий к устойчивому предельному циклу

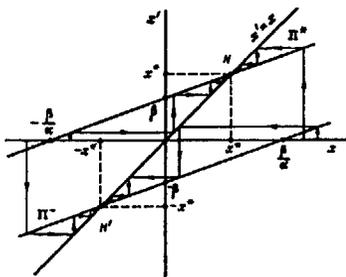


Рис. 20. Диаграмма точечных преобразований

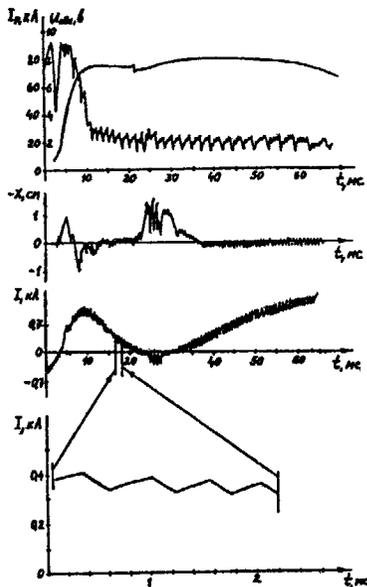


Рис. 21. Адаптивная минимизация амплитуды автоколебаний в токамаке ТУМАН-3

В общем случае при  $w \neq 0, c \neq 0$  в законе управления (20) порог переключения РЭ зависит от линейной комбинации  $w, \dot{w}$

$$\sigma = \max(\sigma^+, \sigma^-), \quad \sigma^\pm = \frac{U}{c} \frac{1 - e^{-c\tau}}{1 + e^{-c\tau}} (1 \pm \varepsilon), \quad (21)$$

где  $\varepsilon = (cw + \dot{w})/U$ . Порог переключения  $\sigma$  в (21) получается интегрированием уравнения  $\dot{v} = -cv + \dot{U}(\kappa + \varepsilon(t))$ ,  $\kappa = \pm 1, |\varepsilon| < 1$  полученного подстановкой  $I = v - w$  в (1,6) при  $d=1$ , с учетом начальных и

конечных условий между моментами переключения РЭ:  $\kappa = \pm 1$ ,  $v(t_0) = \mp \sigma^\pm$ ,  $v(t_0 + \tau) = \pm \sigma^\pm$ ,  $t = t_0 + \tau$ ,  $\varepsilon = \text{const}$ . При практической реализации закона минимизации амплитуды автоколебаний (20), (21) в выражении для величины  $\varepsilon$  используются оценки возмущения и его производной  $\hat{w}$ ,  $\dot{w}$ , получаемые посредством адаптивного идентификатора состояния (гл. 4).

Оценка уменьшения амплитуды выходного сигнала  $\tilde{x}_m$  устойчивого объекта (1) посредством управления вида (20), (21) по сравнению с любым другим законом управления получается для первой гармоники колебаний, преобладающей в автоколебательном контуре управления, из (1,а,б) в виде

$$\frac{\tilde{x}_m}{\min \tilde{x}_m} = \sqrt{\frac{[(\pi/\tau_{\min})^2 + a^2][(\pi/\tau_{\min})^2 + c^2]}{[(\pi/\tau)^2 + a^2][(\pi/\tau)^2 + c^2]}}$$
, где  $\tau > \tau_{\min}$ ,  $\tau$  - полупериод

колебаний при любом законе управления,  $\tau_{\min}$  - временная зона нечувствительности релейного элемента. Поскольку обычно на практике  $\pi/\tau \gg a$ ,  $\pi/\tau \gg c$ , то  $\tilde{x}_m / \min \tilde{x}_m \approx (\tau/\tau_{\min})^2$ .

*Эксперименты на токамаке ТУМАН-3.* Для реализации закона управления (20), (21) было разработано управляющее устройство на электронных микросхемах и применено на токамаке ТУМАН-3. Несмотря на заметное снижение амплитуды автоколебаний по сравнению с ПД-регулятором наблюдалась колебательная составляющая по средней величине процесса стабилизации. Это объясняется тем, что в законе (20) управление осуществляется по непрерывной оценке сигнала  $\hat{v} = I + \hat{w}$ , а не по его реальной величине  $v$ . С целью устранения этого недостатка была разработана релейная система с законом адаптации в виде

$$g = \hat{b} \max(\sigma^+, \sigma^-) \text{sign } u \div (\dot{x} + ax), \quad (22)$$

в котором используется для определения величины  $v$  непосредственно измеряемые сигналы  $x$ ,  $\dot{x}$ . На рис. 21 представлена серия осциллограмм для одного импульса разряда в токамаке ТУМАН-3 с использованием закона управления (22): тока плазмы  $I_p$ , напряжения на обходе плазменного шнура  $u_{\text{обх}}$ , инвертированного сигнала смещения плазмы ( $-x$ ), тока управления  $I$ . Закон адаптивного управления (22) привел к уменьшению амплитуды автоколебаний смещения плазмы в 2-4 раза по сравнению с системами с П- и ПД- регуляторами. Это существенно ослабило взаимодействие плазмы с камерой, улучшило параметры плазмы и диагностические сигналы.

На нижней осциллограмме показан ток обмотки управления при более быстрой развертке. Из этой осциллограммы видно, что на каждом

квазипериоде автоколебаний время спада положительного значения тока приблизительно равно временной зоне нечувствительности  $\tau^- = 200 \mu s$  управляемого инвертора напряжения. Это означает, что частота автоколебаний в релейной системе с законом управления (22) близка к максимально возможной для данного исполнительного устройства.

В седьмой главе проектируются, исследуются и моделируются робастные многосвязные системы управления током, положением и формой плазмы для двух версий ИТЭР:  $Q=\infty$  и  $Q>10$ .

*Требования к регулятору.* Регулятор обратной связи должен быть способен управлять с требуемым качеством 6-ю базовыми щелями между плазмой и первой стенкой при действии возмущений типа малого срыва, одновременно стабилизируя вертикальное неустойчивое положение плазмы. Малые срывы моделируются сбросами относительного давления плазмы  $\beta_p$  и ее внутренней индуктивности  $I_i$  с возможным последующим восстановлением возмущенного параметра (см. гл. 2). При действии возмущений отклонения щелей от заданного положения равновесия должны быть минимизированы, причем все щели должны восстанавливаться в течение 20 sec с ошибкой менее 2 см в конце переходного процесса. Максимальная величина полной мощности управления  $p = \sum_k u_k I_k$ , где  $u_k, I_k$  – напряжения и токи обмоток полоидального поля, не должна превышать 250 (100) MW, производная мощности должна быть меньше 200 MW/s, скачки мощности не должны превышать 60 MW.

*Система управления для ИТЭР с самоподдерживающейся термоядерной реакцией ( $Q=\infty$ ).* Для управления формой и током плазмы диссертантом разработан робастный регулятор  $H_\infty$  NCF по желаемой частотной характеристике расширенного весовыми функциями  $W_1(s)$  и  $W_2(s)$  объекта, представленного в виде левой нормализованной взаимно-простой факторизации (Normalized Coprime Factorization)  $G = W_2 G_{\text{ном}} W_1 = M_1^{-1} N_1$ , где  $M_1 M_1^* + N_1 N_1^* = I$ ,  $M^*(s) = M^T(\bar{s})$ . Возмущенный объект записывается в виде  $G_p = \left\{ (M_1 + \Delta_M)^{-1} (N_1 + \Delta_N) : \left\| \begin{matrix} \Delta_N \\ \Delta_M \end{matrix} \right\|_\infty < \varepsilon \right\}$ , где  $\Delta_N, \Delta_M$  есть устойчивые передаточные функции, которые характеризуют неопределенность в номинальном объекте  $G$ , представляемым в пространстве состояний уравнениями (2). Для объекта  $G$  синтезируется  $H_\infty$  регулятор обратной связи  $K_\infty$ , который стабилизирует семейство возмущенных объектов, а  $\varepsilon < 1/\|M\|_\infty$  является робастным запасом устойчивости, причем  $M = [K_x \ I]^T (I - M_1^{-1} M_1 K_\infty)^{-1} M_1^{-1}$ . Финальный

робастный регулятор имеет вид  $K = W_1 K_\infty W_2$ . Дополнительно к линейному  $H_\infty$  NCF робастному регулятору был разработан нелинейный блок коррекции полной мощности управления, позволяющий на 30-40% уменьшить пики мощности при моделировании системы в присутствии возмущений без существенного изменения поведения щелей. При этом сигнал полной мощности управления  $p$  вводится в обратную связь и уменьшает входные напряжения при сильном возрастании мощности. Вектор корректирующих напряжений  $\Delta u$  формируется в соответствии с зависимостью:  $\Delta u = -|p|u$ , где  $u$  – вектор управляющих напряжений.

Европейской ДК разработан робастный регулятор  $\mu$ -Syn с использованием  $\mu$ -синтеза. Российская ДК разработала линейно-квадратичный гауссовский регулятор (LQG), минимизирующий функционал вида  $\int_0^\infty (y^T R y + c_0 u^T Q u) dt$ , где  $R, Q$  – весовые матрицы,  $c_0 > 0$ .

Разработанные регуляторы были промоделированы в замкнутых системах на линейных (CREATE-L, PET-L, TSPS-L, CORSICA-L) и нелинейных (TSC, DINA, CORSICA, PET, MAXFEA, TSPS) моделях объекта при действии возмущений типа малого срыва. Моделирование, проведенное на линейных моделях, показало, что системы с разработанными регуляторами отвечают техническим требованиям. Показатели качества управления, полученными для SOB&EOB точках сценария линейной модели объекта PET-L, приведены в табл. 2. Здесь показаны пики полной мощности управления  $P_p$  (MW), скачки мощности  $P_s$  (MW), производная мощности  $P_d$  (MW/s), время переходного процесса  $t_s$  (s), максимальные и минимальные значения вариаций щелей  $\delta g$  (mm).

Таблица 2: Характеристики переходных процессов (малые срывы; SOB&EOB; PET-L)

Регул.	$\delta g1$	$\delta g2$	$\delta g3$	$\delta g4$	$\delta g5$	$\delta g6$	$P_p$	$P_s$	$P_d$	$t_s$
NCF	-6/96	-3/77	-50/165	-56/109	-49/126	-11/62	55	-57	159	10
$\mu$ -Syn	-11/104	-6/96	-25/201	-45/148	-20/193	-10/73	39	0	24	13
LQG	-7/90	-2/90	-32/160	-42/102	-42/104	-28/52	180	0	190	8

Во время аварийных ситуаций или при достаточно сильных возмущениях полюидальные токи могут достигать своих уровней насыщения. Насыщенные обмотки не в состоянии реагировать на сигналы регулятора и изменять свои токи в соответствии с запросами регулирования. В этом случае необходимо гарантированное обеспечение устойчивости системы и требуемое качество управления. Для исследования линейных регуляторов в данных ситуациях автором разработана нелинейная модель источника питания, позволяющая удерживать заранее определенный

уровень тока насыщения посредством локальной обратной связи в каждой катушке, когда соответствующий ток достигает данного уровня. Исследование состояло из двух видов тестирования: 1) до появления возмущения ни одна PF катушка не была насыщена; 2) одна из PF катушек принудительно насыщена в течение всего интервала численного моделирования. Тест (1) проведен для всех базовых магнитных конфигураций ИТЭР: XPF (X-Point Formation), SOF (Start of Flattop), SOB (Start of Burn), EOB (End of Burn), EOC (End of Cooling), тест (2) - только для SOB. Моделирование выполнено на PET FDR модели с  $\mu$ -Syn регулятором. Во всех случаях сохранялась устойчивость замкнутой системы, а смещения щелей сходились к нулевым значениям.

Робастные регуляторы  $H_\infty NCF$  и  $H_\infty \mu$ -Syn, были исследованы в замкнутой системе с линейной моделью объекта по критерию робастной устойчивости как в частотной области, так и в пространстве параметров. Регулятор  $H_\infty NCF$  показал более широкий запас робастной устойчивости в рабочем диапазоне частот, что было подтверждено моделированием на нелинейной модели равновесия плазмы с учетом диффузии плазменного тока, реализованной кодом DINA (авторы кода: В.Э.Лукаш, Р.Р.Хайрутдинов). Моделирование было проведено по всем магнитными конфигурациями сценария базы данных ИТЭР при  $I_i=0.7, 0.9, 1.1$ . Регулятор  $H_\infty NCF$  был неустойчив только в одной точке сценария SOF ( $I_i=0.7$ ). Регулятор  $H_\infty \mu$ -Syn неустойчив в четырех точках: XPF ( $I_i=0.9$ ), SOF ( $I_i=0.7, 0.9, 1.1$ ). Регулятор LQG в данном цикле моделирования не исследовался, т.к. на линейных моделях объекта он показал большие пики мощности управления (табл. 2).

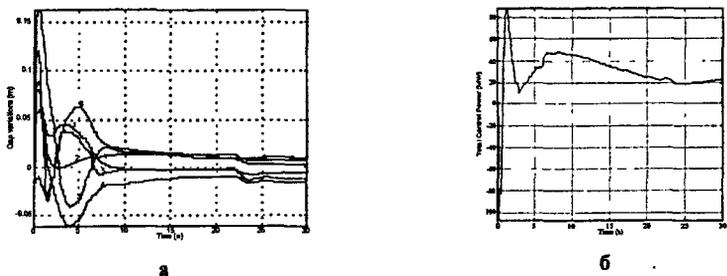


Рис. 22. Изменения щелей (а) и полной мощности (б) для  $H_\infty NCF$  регулятора (DINA)

На рис. 22 показаны графики изменения щелей и полной мощности для  $H_\infty NCF$  регулятора, SOB,  $I_i=0.9$ , в течение 30 sec времени моделирования

процесса после приложения возмущения на коде DINA. Из данных численного моделирования с кодом DINA были получены показатели качества управления посредством специально разработанных программ автоматической обработки данных на языке MATLAB, а также посредством EXCEL. Максимальные и минимальные значения показателей качества работы системы в SOB & EOB ( $l_i = 0.7, 0.9, 1.1$ ) с исследуемыми регуляторами сведены в табл. 3. Здесь также представлены временные интервалы  $T_1$  и  $T_2$ , в течение которых изменение 1 и 2 щелей соответственно превышают уровень 100 мм. Это весьма безопасный уровень для изменения щелей в зоне дивертора. Более быстрая система управления с  $H_\infty$  NCF регулятором и полосой пропускания  $6.5 \text{ rad/sec}$  дает меньшее изменение 1-й и 2-й щелей, меньшие значения интервалов времени  $T_1$  и  $T_2$ , чем система с регулятором  $H_\infty \mu\text{-Syn}$  и полосой пропускания  $2.0 \text{ rad/sec}$ , но приводит к большим пикам и скачкам мощности управления.

Таблица 3: Характеристики переходных процессов (SOB&EOB; DINA)

Регул.	$\delta g1$	$\delta g2$	$\delta g3$	$\delta g4$	$\delta g5$	$\delta g6$	$P_p$	$P_s$	$P_d$	$T_1$	$T_2$
NCF	-13/123	-16/104	-50/226	-69/157	-59/203	-88/86	162	145	200	0.94	0.32
$\mu\text{-Syn}$	-33/192	-14/177	-32/290	-45/238	-48/451	-88/101	95	84	200	3.05	3.05

Система управления с  $H_\infty \mu\text{-Syn}$  и  $H_\infty$  NCF регуляторами была промоделирована при действии возмущений типа Edge Localized Modes (ELMs) в отсутствии малых срывов. Возмущения типа ELMs являются мелкомасштабными: быстрые сбросы  $\beta_p$  на  $-0.03$  с частотой  $1 \text{ Hz}$  с последующим линейным восстановлением в течении  $0.2 \text{ сек}$  (SOF, SOB, EOB). Проведено сравнение двух видов кривых моделирования: с включенной и выключенной обратной связью. Амплитуды изменения токов обмоток полоидального поля в данных случаях очень близки друг к другу. Поэтому регуляторы не увеличивают потери на переменном токе в сверхпроводящих обмотках, которые бы существенно превышали уровень потерь в отсутствии обратной связи.

Система управления для ИТЭР с поддерживаемым горением ( $Q > 10$ ). Основными отличительными признаками полоидальной системы ITER-FEAT (<http://www.iter.org/>) являются разбиение центрального соленоида на секции (рис. 4,б) и введение быстрого (мощного) преобразователя напряжения для стабилизации скорости неустойчивых вертикальных смещений плазмы относительно нулевого значения. Данный преобразователь гальванически связан с обмотками PF7-10, а его введение вызвано уменьшением постоянной времени вертикальной неустойчивости

плазмы на порядок по сравнению с ITER (табл. 1). Регулятор плазмы принял структуру блок-диагонального регулятора  $K_{BD} = \text{diag}\{K_{SISO}, K_{MIMO}\}$ : один диагональный элемент его занимает скалярный регулятор скорости вертикального положения плазмы  $K_{SISO}$ , а другой элемент представляет собой многомерный регулятор формы и тока плазмы  $K_{MIMO}$  (рис. 23). Система стала содержать два контура управления: быстрый (VS scalar loop) и медленный (Plasma current and shape loop).

Измененная структура системы вызвала необходимость разработки с первым приоритетом регулятора  $K_{SISO}$ . Для этого вначале скалярная модель объекта управления, содержащая 71 нуль и 73 полюса, была редуцирована в точке сценария SOB посредством методики сбалансированного усечения. Редуцированная модель содержала 2 нуля и 2 полюса, что дало достаточную точность приближения для синтеза регулятора в частотном диапазоне до 100 rad/sec.

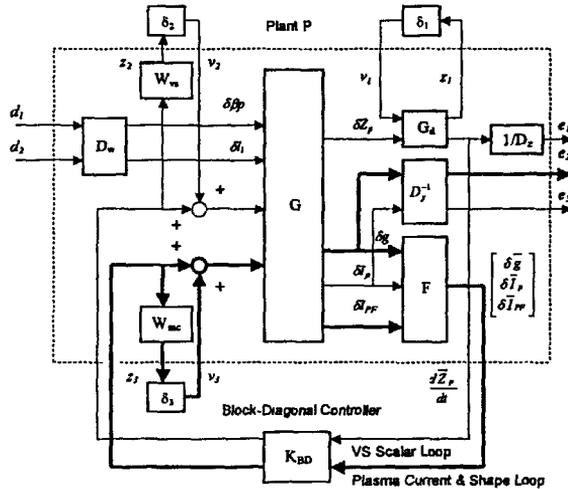


Рис. 23. Система управления с блок-диагональным регулятором и неопределенностями:  $G$  – объект управления с исполнительными устройствами,  $G_d$  – дифференцирующий фильтр,  $F$  – фильтр щелей, тока плазмы и токов  $PF$  обмоток,  $K_{BD}$  – блок-диагональный регулятор,  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – неопределенности,  $W_{vs}, W_{mc}$  – весовые функции,  $D_w, D_z$  – масштабирующие множители

На основе редуцированной модели были синтезированы два  $H_\infty$  регулятора:  $K_{ncf}$  (3 нуля/3 полюса) методом формирования частотной характеристики разомкнутого объекта и  $K_{ms}$  (2 нуля/2 полюса) методом смешанной чувствительности (гл. 1). Регуляторы  $K_{ncf}$  и  $K_{ms}$  были сравнены с

другими регуляторами:  $K_{gain}$  (ЦК ИТЭР),  $K_{lqg}$  (Российская ДК),  $K_{lead-lag}$  (Европейская ДК). Переходные процессы в величине  $dZ_p/dt$  при малых срывах для всех тестируемых регуляторов довольно схожи между собой (рис. 24,а,б). Все регуляторы отвечают требованиям к пику и скачкам мощности управления, кроме  $K_{lead}$ , который в ЕОС дает скачок мощности в 120 MW.

Робастные устойчивость и качество управления регуляторов исследованы с помощью  $\mu$ -анализа. Размер наименьшей структурированной неопределенности  $\Delta$ , которая приводит к равенству  $\det(I-M\Delta)=0$ , определяется как многомерный запас устойчивости  $K_m(M)=\bar{\sigma}(\Delta_{min})$  (М.Сафонов). Обратная величина к  $K_m(M)$  называется структурной сингулярной величиной  $\mu_\Delta(M)=1/K_m(M)$  (Дж. Дойл). Если номинальная система  $M$  и матрица  $\Delta$  являются устойчивыми, то  $M-\Delta$  конфигурация на рис. 1,б устойчива, когда  $\|\Delta\|_\infty < 1/(\max_\omega \mu_\Delta(M(j\omega)))$ . Частотные графики робастной устойчивости  $\mu_\Delta(M)$  были получены для системы с  $K_{ncf}$ ,  $K_{lqg}$ ,  $K_{gain}$ ,  $K_{lead}$  регуляторами в точках сценария XPF, SOF, SOB, EOC при наличии смешанной неопределенности: мультипликативной входной неопределенности и параметрической неопределенности в постоянной времени дифференцирующего фильтра. Частотные  $\mu$ -графики в точке SOF приведены на рис. 24,в. Наибольший запас робастной устойчивости показан регулятором  $K_{ncf}$ , а запасы робастной устойчивости для систем со всеми другими регуляторами оказались заметно меньше и находились в диапазоне  $0.14 \div 0.60$  по отношению к регулятору  $K_{ncf}$ .

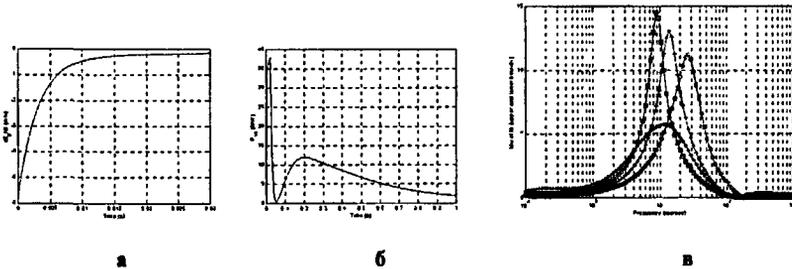


Рис. 24. Переходные процессы  $dZ_p/dt$  (а) и  $P$  (б) в SOF при малом срыве; частотные  $\mu$ -графики робастной устойчивости в SOF:  $K_{ncf}$  (\*),  $K_{lqg}$  (+),  $K_{gain}$  (квадраты),  $K_{lead}$  (о)

Если разбить матрицу объекта  $P$  на блоки, совместимые с матрицей регулятора  $K$  (рис. 1,б), то номинальная система представляется как нижнее дробно-линейное преобразование  $N = F_L(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}$ . Передаточная функция замкнутой системы  $F$  с неопределенностью ( $e=Fd$ ),



неравенству  $\|F_l(P, K)\|_\infty < \gamma$ , где  $\gamma > \gamma_{min}$   $F_l(P, K) = \begin{bmatrix} W_1 SG_w W_3 & W_1 SG_u \\ W_2 KSG_w W_3 & W_2 KSG_u \end{bmatrix}$

- передаточная функция от внешнего возмущения  $d = [d_1 \quad d_2]^T$  к выходу

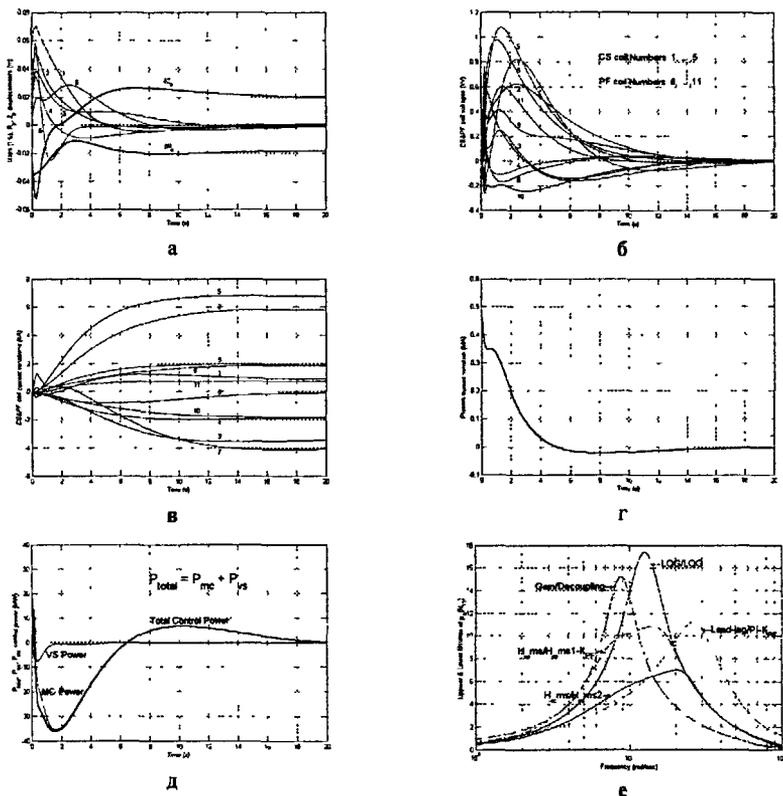


Рис. 26. Переходные процессы при малом срыве в системе с  $K_{H, bd2}$  регулятором в SOF: а - вариации щелей,  $Z_p$ ,  $R_p$ ; б - напряжения на CS&PF обмотках; в - вариации токов в CS&PF обмотках; г - вариация тока плазмы; д - полная, VS и MC мощности управления, е - Частотные  $\mu$ -характеристики робастной устойчивости для GAIN<sub>ba</sub>, PI<sub>bd</sub>, LQG<sub>bd</sub>, H<sub>∞bd1</sub>, H<sub>2bd2</sub> регуляторов в SOF

расширенного объекта  $z = [z_1 \quad z_2]^T$ ,  $S$  - функция чувствительности,  $G_u$ ,  $G_w$  - передаточные функции объекта и возмущения. Робастные блочдиагональные регуляторы тока, положения и формы плазмы были сравнены

с LQG, PI и развязывающими многомерными регуляторами, разработанными ЦК и ДК ИТЭР, в базовых точках сценария XPF, SOF, EOB, EOC по критериям качества управления при малых срывах, робастному запасу устойчивости и робастному качеству управления в соответствии со схемой рис. 23. На рис. 26,а-д приведены переходные процессы при малом срыве в системе с  $H_{\infty bd2}$  регулятором, а на рис. 26,е - частотные  $\mu$ -характеристики робастной устойчивости для  $GAIN_{bd}$ ,  $PI_{bd}$ ,  $LQG_{bd}$ ,  $H_{\infty bd1}$ ,  $H_{\infty bd2}$  регуляторов в SOF. Блок-диагональные  $H_{\infty}$  системы управления показали меньшее время переходного процесса, меньшие отклонения щелей между сепаратрисой и первой стенкой, меньшие пики и скачки полной мощности управления, а также большие запасы робастной устойчивости и меньшую чувствительность к внешнему возмущению (табл. 4).

Таблица 4. Диапазоны изменения запаса робастной устойчивости  $K_m$  и  $\mu$ -пиков  $\beta$  блок-диагональных регуляторов

Регулятор/Параметр	$min(K_m)$	$max(K_m)$	$min(\beta)$	$max(\beta)$
$K_{gambd}$	0.0996	0.7453	1.3738	11.4681
$K_{PIbd}$	0.4895	0.7011	1.4237	1.8197
$K_{LQGbd}$	0.0427	0.5879	1.6837	23.2402
$K_{H_{\infty}bd1}$	0.1922	0.7437	1.3143	5.2229
$K_{H_{\infty}bd2}$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Поставлен и решен цикл научно-технических задач управления и идентификации при обеспечении равновесия и устойчивости высокотемпературной плазмы. В итоге выполнена комплексная разработка базовых адаптивных автоколебательных и робастных систем управления плазмой в термоядерных установках.
2. Созданы теоретические и экспериментальные основы методологии анализа, синтеза и внедрения в практику физического и вычислительного эксперимента адаптивных автоколебательных и робастных систем управления плазмой в магнитном поле.
3. Разработанные и примененные системы обеспечили оптимальные режимы управления плазмой при неопределенности и нестационарности ее характеристик.
4. Проведенные исследования на термоядерных установках ТУМАН-3, Т-14, ТВД, ОГРА-3 и их моделях позволили получить новые знания о поведении плазмы в замкнутых системах управления.

5. Методом математического моделирования на ряде линейных и нелинейных моделей равновесия и переноса плазмы показано, что разработанные многомерные робастные  $H_\infty$  системы управления током, положением и формой плазмы в ИТЭР удовлетворяют техническим требованиям проекта ИТЭР.

6. Практическое использование полученных научных результатов подтверждается актами о внедрении на экспериментальных термоядерных установках и отзывами ведущих зарубежных специалистов по проекту ИТЭР. Результаты работы, полученные автором в проекте ИТЭР, включены в Финальный Документ проектирования этого термоядерного реактора.

7. Определены главные направления в разработке и применении систем автоматического управления плазмой в термоядерных установках – направления, связанные с реализацией адаптивных и робастных систем. Развитие данных направлений позволит создать интегрированные интеллектуальные системы для магнитно-кинетического управления плазмой в экспериментальных термоядерных установках и в будущих термоядерных токамаках-реакторах. Системы такого класса будут выполнять комплексный анализ текущего состояния объекта управления – плазмы – и оперативно находить оптимальные решения в непредвиденных ситуациях. Это обеспечит предельно высокие надежность и качество управления термоядерных установок.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Митришкин Ю.В. Об алгоритме управления экстремальными динамическими объектами // Автоматика и телемеханика. – 1976. – №1. – С. 117-126.
2. Митришкин Ю.В. Автоматическая оптимизация параметров обратной связи нестационарного неустойчивого объекта // Автоматика и телемеханика. – 1977. – №5. – С. 66–76.
3. Митришкин Ю.В. Устройство для автоматической настройки системы обратной связи при стабилизации плазмы // Моделирование и управление в развивающихся системах. – М., Наука, 1978. – С. 12–17.
4. Дроздов А.И., Митришкин Ю.В. Функциональный преобразователь // А.с. №607235. – Б.И., 1978. – №18. – С. 154.
5. Фицнер Л.Н., Митришкин Ю.В., Чуянов В.А. Способ стабилизации плазмы // А.с. №646474. – Б.И., 1979. – №5. – С. 210.
6. Митришкин Ю.В., Фицнер Л.Н. Многоканальный автоматический оптимизатор // А.с. №769490. – Б.И., 1980. – №37. – С. 228.

7. **Gribov Y. V., Chuyanov V.A., Mitrishkin Y.V., et al.** Numerical Simulation of the Plasma Column Behavior at the Equilibrium Control System Operation in a Tokamak with a High Field and Adiabatic Compression // 10th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. – Contributed Papers, Moscow, 1981. – Vol. 1. – B-16.
8. **Грибов Ю.В., Митришкин Ю.В., Чуянов В.А.** Исследование системы управления равновесием плазмы в токамаке // Препринт. – М.: Институт проблем управления. – 1982. – 32 с.
9. **Митришкин Ю.В.** Экстремальное управление объектом с пороговым критерием качества // Автоматика и телемеханика. – 1983. – №1. – С. 33–51.
10. **Митришкин Ю.В., Савкина И.С.** О модели равновесия плазмы в токамаке // Автоматика и телемеханика. – 1984. – №3. – С. 64–76.
11. **Грибов Ю.В., Чуянов В.А., Митришкин Ю.В. и др.** Управление положением плазменного шнура в токамаке с помощью аналоговых моделей // Доклады III Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. – Ленинград, 20-22 июня 1984. – Т.3. – С. 525–532.
12. **Митришкин Ю.В., Савкина И.С.** Система оценки помехи при релейной стабилизации динамического объекта // Управление в сложных нелинейных системах. – М.: Наука, 1984. – С. 64–68.
13. **Митришкин Ю.В.** Управление динамическими объектами с применением автоматической настройки. – М.: Наука, 1985. – 158 с. (*Монография*).
14. **Гачинский Э.Е., Дроздов А.И., Митришкин Ю.В. и др.** Адаптация в системах управления техническими объектами // Системы управления и их применение. – М., Институт проблем управления. – 1985. – С. 10–22.
15. **Грибов Ю.В., Чуянов В.А., Митришкин Ю.В.** Способ стабилизации положения плазменного шнура в токамаке // А.с. №1119490. – Б.И., 1985. – №19. – С. 243.
16. **Грибов Ю.В., Косцов Ю.А., Митришкин Ю.В.** Устройство для стабилизации равновесного положения плазменного шнура в токамаке // А.с. №1153698. – Б.И., 1985. – №37. – С. 258.
17. **Гвоздков Ю.В., Митришкин Ю.В., Черкашин М.Ю. и др.** Управление плазмой в экспериментальных термоядерных установках // Препринт. – М.: Институт проблем управления. – 1985. – 50 с.
18. **Грибов Ю.В., Кузнецов Е.А., Митришкин Ю.В. и др.** Релейная система стабилизации положения плазмы токамака // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. – 1986. – Вып.4. – С. 51-57.

19. Грибов Ю.В., Чуянов В.А., Митришкин Ю.В. Автоматическая оценка коэффициентов уравнения смещения плазмы токамака при работе системы стабилизации // Журнал технической физики. – 1987. – Т. 57. – Вып. 9. – С. 1751-1757.
20. Кузнецов Е.А., Митришкин Ю.В., Савкина И.С. Адаптивная система минимизации амплитуды автоколебаний плазменного шнура относительно заданного положения в токамаке // Управление сложными техническими системами. – М., Институт проблем управления, 1987. – С. 30–33.
21. Грибов Ю.В., Кузнецов Е.А., Митришкин Ю.В. и др. Адаптивная оптимальная система управления горизонтальными смещениями плазменного шнура в токамаке // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 1988. – Вып. 4. – С. 28–32.
22. Грибов Ю.В., Митришкин Ю.В., Чуянов В.А. и др. Способ стабилизации положения плазменного шнура в токамаке // А.с. №1399824. – Б.И., 1988. – №20. – С. 231.
23. Грибов Ю.В., Косцов Ю.А., Митришкин Ю.В. и др. Устройство для стабилизации положения плазменного шнура в токамаке // А.с. №1418817. – Б.И., 1988. – №31. – С. 244.
24. Митришкин Ю.В. Автоколебательные системы двухуровневого адаптивного управления // Измерения, контроль, автоматизация. – 1989. – №3. – С. 63–73.
25. Митришкин Ю.В. Минимизация амплитуды автоколебаний в релейной системе управления с устойчивой линейной динамической частью // Автоматика и телемеханика. – 1989. – №9. – С. 91–102.
26. Митришкин Ю.В., Назин А.В., Позняк А.С. и др. Оценивание параметров нестационарного управляемого объекта: Препринт. – М.: Институт проблем управления, 1989. – 50 с.
27. Mitrishkin, Y. V. Self-Excited Systems of Two-Level Adaptive Control // Proceedings of the IFAC Workshop on Evaluation of Adaptive Control Strategies in Industrial Applications. – Tbilisi, USSR, 1989. – Pergamon Press, 1990. – No. 7. – P. 151–155.
28. Abramov A. V., Bortnikov A. V., Mitrishkin Y. V. et al. Shaping, Vertical Stability and Control Elongated Plasmas on the TVD // Preprint IAE-5301/7. – Moscow, 1991. – 40 p.
29. Mitrishkin Y.V., Tsarenko A.I., Antonov I.M. et al. Comparative Analysis of Executive Devices with Energy Converters for Plasma Vertical Position Control System of ITER // Preprint. – Institute of Control Sciences, Moscow, 1991. – 40 p.

30. **Mitrishkin Y.V., Kuznetsov E. A.** Estimation of Parameters of Stabilized Plasma // Plasma Devices and Operations. – 1993. – Vol. 2. – No. 3. – P. 277–286.
31. **Mitrishkin Y.V., Bolotnikov A.A., Treskov V.V., et al.** On-line Discrete Joint Estimation of Parameters and External Disturbance of Linear Time-Varying Unstable Continuous Controlled Object // Proceeding of the Third International conference on Automation, Robotics and Computer Vision, ICARCV'94. – Singapore, 1994. – Vol. 3. – P. 1802–1806.
32. **Mitrishkin Y.V.** Relay Control of Unstable Vertical Plasma Position in Tokamak // Plasma Devices and Operations. – 1995. – Vol. 4. – P. 111–140.
33. **Portone, A., Gribov Y., Mitrishkin Y., et al.** Control of the Magnetic Configuration in ITER // Proceedings of Symposium on Fusion Technology. – Lisbon, September, 1996. – P. 731–734.
34. **Ambrosino G., Ariola M., Mitrishkin Y., et al.** Plasma Current and Shape Control in Tokamaks Using  $H_\infty$  and  $\mu$ -Synthesis // Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. – San Diego, California. – December 1997. – P. 3697–3702.
35. **Design Description Document, WBS 4.7.** Poloidal Field Control // FDR Issue R1, Plasma & Field Control Division, Plasma Equilibrium & Control Group. – ITER Naka JWS, Japan. – June 1998.
36. **Mondino P. L., Gribov Y.V., Mitrishkin Y.V. et al.** Plasma Current and Shape Control for ITER // Proceedings of the 20<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology. – Marseilles, September 1998. – Vol. 1. – P. 595–598.
37. **Belyakov V., Kavin A., Mitrishkin Y., et al.** Linear Quadratic Gaussian Controller Design for Plasma Current, Position and Shape Control System in ITER // Fusion Engineering and Design. – 1999. – Vol. 45. – P. 55–64.
38. **Mitrishkin Y.V.** Application of  $H_\infty$  Design to Plasma Current, Position and Shape Control System in International Thermonuclear Experimental Reactor // International Conference on Control Sciences devoted to the 60<sup>th</sup> Anniversary of the Institute of Control Sciences. – Moscow, Russia. – July, 1999. – Vol. 1. – P. 62–65.
39. **Mitrishkin Y.V., Kimura H.** Plasma Vertical Speed Robust Control In Fusion Energy Advanced Tokamak // Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. – Florida, USA. – December 2001. – P.1292–1297.
40. **Mitrishkin Y.V., Kurachi K., Kimura H.** Plasma multivariable robust control system design and simulation for a thermonuclear tokamak-reactor // The regular paper accepted for publication in the International Journal of Control.

Подписано в печать 28.05.03. Формат 60х90/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,0

Тираж 70. Заказ 22.

Отпечатано в РНЦ "Курчатовский институт"  
123182, Москва, пл. Академика Курчатова

2003-A  
11528

№ 11528