

Российский научный центр «Курчатовский институт»

На правах рукописи
УДК 533.9

ОРЛОВСКИЙ Илья Игоревич

**ДИНАМИКА ВРАЩЕНИЯ ВИНТОВЫХ
МАГНИТНЫХ СТРУКТУР
В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА**

01.04.08 — физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена в Институте Ядерного Синтеза Российского Научного Центра «Курчатовский Институт»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук А.М. Какурин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.С. Стрелков

доктор физико-математических наук, профессор А.М. Попов

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

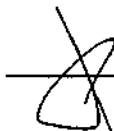
Защита состоится «__» _____ 200_ г. в ____ часов на заседании
Диссертационного Совета (Д520.009.02) РНЦ «Курчатовский Институт» по
адресу: 123182 г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РНЦ «Курчатовский
Институт».

Автореферат разослан «__» _____ 2006 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета



Демура А.В.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы

Важную роль в удержании плазмы в токамаке играют происходящие в ней магнитогидродинамические (МГД) процессы. Многие из них связаны с явлением перезамыкания магнитных силовых линий, имеющем место в плазме с конечной проводимостью. В частности, это явление ответственно за развитие в плазме токамака т.н. тиринг-неустойчивости. Ее развитие сопровождается изменением топологии магнитного поля с образованием в окрестности рациональных магнитных поверхностей т.н. магнитных островов. Возникающие при этом возмущения магнитного поля имеют вид винтовых магнитных структур. Наличие магнитных островов приводит к ухудшению удержания энергии и частиц в плазме вследствие повышенного переноса через область острова. Понимание законов их развития и влияния на параметры плазмы, а также изучение возможности воздействия на их поведение необходимо для обеспечения требуемого режима разряда.

Наиболее простым и прозрачным способом изучения МГД процессов в плазме токамака является регистрация МГД возмущений полоидального магнитного поля снаружи плазменного шнура с помощью магнитных датчиков. Многочисленные исследования, выполненные на различных токамаках, указывают на связь экспериментально наблюдаемых квазистационарных осцилляций полоидального магнитного поля в диапазоне частот менее 10 кГц с винтовыми магнитными структурами, сопровождающими развитие магнитных островов. Эти винтовые структуры имеют вид бегущих волн, распространяющихся вдоль поверхности плазмы, что указывает на вращение связанных с ними магнитных островов.

На характер вращения магнитных островов сильное влияние оказывают винтовые магнитные поля, источники которых находятся снаружи плазмы. Такие квазистационарные паразитные магнитные поля, связанные с

неидеальностью сборки магнитной системы, всегда присутствуют в токамаках. Воздействие этих полей вызывает неравномерность вращения магнитных островов, а при достаточно большой амплитуде приводит к снижению частоты, вплоть до полной остановки вращения. При этом исчезает стабилизирующее действие проводящей стенки вакуумной камеры токамака, в результате в процессе роста магнитные острова достигают большего размера, что может приводить к развитию неустойчивости срыва. Замедление вращения магнитных островов также должны вызывать переменные магнитные поля, связанные с наводимыми МГД возмущениями токами в стенке вакуумной камеры и гало-токами, текущими в пристеночной области плазмы (SOL).

Экспериментальное изучение взаимодействия вращающихся магнитных островов с внешними магнитными полями дает возможность, во-первых, получить информацию о физических механизмах влияния магнитного поля на вращение магнитных островов, а во-вторых, использовать неравномерность вращения для идентификации паразитного поля в токамаке. Кроме этого, полученные результаты могут быть востребованы при разработке систем стабилизации классической и неоклассической тиринг-неустойчивости в токамаке-реакторе.

Цель работы

1. Разработка методов анализа пространственно-временных характеристик МГД возмущений в токамаке.
2. Изучение влияния на вращение магнитного острова переменных гало-токов в пристеночной области плазмы, наводимых МГД возмущением, связанным с этим островом.
3. Исследование динамики вращения винтовых магнитных структур, связанных с магнитными островами, в присутствии квазистационарных внешних магнитных полей и токов в пристеночной области плазмы токамака.

Научная новизна

Автором впервые было применено преобразование Гильберта-Хуанга для анализа пространственно-временной структуры МГД возмущений в токамаке.

Впервые экспериментально продемонстрировано замедление вращения магнитного острова под воздействием гало-токов, наведенных МГД возмущением, связанным с этим островом.

Впервые экспериментально осуществлено воздействие на частоту вращения и степень неравномерности вращения магнитных островов квазистационарным гало-током, возбуждаемым внешним источником в пристеночной области плазмы.

Впервые экспериментально исследована зависимость степени неравномерности вращения магнитных островов от амплитуды связанных с ними полей МГД возмущения.

Впервые показано наличие связи между двумя пространственно ортогональными МГД возмущениями, определяющей совместную динамику их неравномерного вращения.

Научная и практическая ценность

Экспериментальные результаты данной диссертации могут быть использованы для уточнения теоретических моделей, описывающих динамику тиринг-моды в токамаке, а также при разработке систем стабилизации классической и неоклассической тиринг-неустойчивости в токамаке-реакторе.

Новая методика обработки экспериментальных данных МГД диагностики может быть применена в любом измерительном комплексе, предназначенном для исследования не стационарных нелинейных колебательных процессов.

Разработанное программное обеспечение также может быть применено в составе различных измерительных комплексов.

Автор выносит на защиту:

1. Разработанный аппаратно-программный комплекс регистрации, сбора и архивации данных МГД-диагностики токамака Т-10.

2. Методики обработки экспериментальных данных, использующие понятие аналитического сигнала и метод эмпирической модовой декомпозиции для анализа пространственно-временных характеристик МГД возмущений.
3. Программный комплекс обработки данных МГД диагностики токамака Т-10.
4. Результаты экспериментальных исследований воздействия на вращение магнитных островов переменного гало-тока, возбуждаемого МГД возмущением в токамаке Т-10.
5. Результаты экспериментов по воздействию квазистационарного гало-тока, возбуждаемого внешним источником ЭДС в пристеночной области плазмы, на вращение МГД возмущений в токамаке Т-10.
6. Результаты исследования зависимости степени неравномерности вращения МГД возмущения от его амплитуды в токамаке Т-10.
7. Результаты экспериментального исследования совместной динамики вращения пространственно ортогональных мод МГД возмущения в токамаке Т-10.

Апробация работы

Результаты, изложенные в работе, докладывались на 18-ой Международной конференции по энергии синтеза (2000), 30-ой, 32-ой и 33-ей Европейских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2003-2006). Результаты исследований неоднократно докладывались на научных семинарах ИЯС РНЦ «Курчатовский Институт».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 в реферируемых журналах. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы (125 стр., 61 рис., 54 наим. цит. лит.).

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении показана актуальность темы диссертации, излагается цель работы, перечисляются основные результаты, выносимые автором на защиту, и отмечается их новизна. Изложена структура диссертации и краткая характеристика каждой главы.

В первой главе дан обзор современных представлений о тиринг-неустойчивости в токамаке.

В §1.1 изложены теоретические представления о механизме развития тиринг-неустойчивости, заключающемся в перезамыкании силовых линий магнитного поля и образовании магнитных островов. В процессе развития неустойчивости рост магнитного острова проходит линейную и нелинейную стадии. В нелинейной стадии по мере роста острова система приближается к минимуму магнитной энергии. Этот минимум, задающий ширину насыщенного острова, определяется радиальным распределением тока разряда в плазме токамака.

В горячей плазме с большим газокINETическим давлением может развиваться разновидность тиринг-неустойчивости – т.н. неоклассическая тиринг-мода (НТМ), обусловленная наличием в плазме значительной доли бутстреп-тока. Механизм этой неустойчивости заключается в том, что повышенный перенос тепла через область магнитного острова может привести к уплощению профиля температуры. Это уплощение вызывает уменьшение плотности бутстреп-тока внутри острова, приводящее к дальнейшему росту острова. Особенностью НТМ является то, что она развивается только при наличии затравочных островов достаточного размера, при котором уплощение профиля температуры становится заметным.

В §1.2 рассмотрена теоретическая модель, описывающая воздействие стороннего винтового тока на вращение магнитного острова. При этом скорость вращения острова представляется в виде суперпозиции скорости вращения

возбуждаемой вынужденной нелинейной тиринг-моды относительно плазмы и собственной скорости вращения плазмы. Скорости вращения плазменного слоя в области острова определяются из предположения, что сила инерции плазмы в этом слое уравновешена суммой электромагнитной силы и силы вязкостного трения с окружающей этот слой плазмой. Электромагнитная сила может быть вычислена как сила реакции взаимодействия проводника со сторонним током и радиальной компоненты магнитного поля, связанного с магнитным островом.

В §1.3 дан обзор экспериментальным исследованиям особенностей вращения магнитных островов в токамаках T-10, TEXT-U и HBT-EP. Эти исследования, как правило, основаны на анализе сигналов магнитных зондов. Неравномерность вращения островов, связанная с наличием в установке паразитных винтовых магнитных полей, приводит к негармоничности и нестационарности этих сигналов. Для их обработки на экспериментальных установках применялись алгоритмы, позволяющие сконструировать на базе экспериментальных данных комплексные сигналы и определить поведение мгновенных значений амплитуды и фазы сигналов во времени.

Во второй главе описана организация экспериментов на установке T-10.

В §2.1 приведено описание МГД-диагностики установки T-10, включающей два набора магнитных датчиков, аналоговый Фурье-анализатор, две рабочие станции с АЦП. Там же описано специализированное программное обеспечение для управления сбором экспериментальных данных, позволяющее настраивать (в т.ч. по сети Ethernet) параметры АЦП, запускать и останавливать сбор данных, осуществлять их передачу на локальный терминал. Приведено описание специально разработанного формата файлов данных TDF.

В §2.2 описана система возбуждения гало-тока в пристеночной области, используемая при проведении экспериментов по воздействию стороннего тока на динамику тиринг-моды. Система представляет собой электрическую цепь стенка камеры – измерительный шунт – контактор – источник сигнала (ЭДС) – подвижная рельсовая диафрагма – плазма – стенка камеры. При

замыкании контактора по этой цепи протекал гало-ток, магнитное поле которого влияло на вращение магнитных островов. Амплитуда магнитного поля гало-тока в месте расположения магнитных зондов составляла 10^{-4} Т при токе 100 А.

Третья глава посвящена обзору современных методов обработки сигналов магнитных зондов. В §3.1 рассмотрены основные свойства преобразования Фурье, изучен вопрос применения сглаживающих окон при цифровой фильтрации. В §3.2 описано применение функции когерентности для анализа сигналов системы магнитных датчиков. Анализ модуля и фазы функции когерентности позволяет эффективно выявлять паразитные наводки в сигналах для последующего их устранения с помощью цифровой фильтрации. В §3.3 описаны два метода теории частотно-временных распределений – спектрограмма и вейвлет-преобразование. Эти методы широко используются для анализа нестационарных сигналов, в частности, сигналов МГД-диагностики. Являясь весьма мощным и универсальным инструментом, они, тем не менее, обладают существенным недостатком. Их частотно-временное разрешение ограничено, поэтому не всегда позволяет выявить все нюансы динамики исследуемого процесса.

В §3.4 описан метод разложения по сингулярным значениям. В этом методе из массива экспериментальных данных системы магнитных зондов специальным образом формируют две матрицы, собственные векторы которых образуют пространственный и временной базисы разложения. Анализ результатов разложения позволяет делать предположение о пространственной структуре и особенностях временной эволюции МГД возмущения. К сожалению, этот метод формален и не всегда позволяет исследовать тонкую структуру динамики МГД возмущения.

В главе 4 описана новая методика обработки сигналов магнитных зондов, основанная на преобразовании Гильберта и методе эмпирического модового разложения. В ее основе лежит идея представления исходного сигнала в виде

т.н. аналитического сигнала – комплексной функции, для которой мнимая часть является преобразованием Гильберта от действительной части, равной исходному сигналу. Достоинство такого подхода состоит в возможности для любого вещественного сигнала физически прозрачно и однозначно построить комплексную функцию, для которой, в свою очередь, однозначно определены амплитуда и фаза. Помимо этого, вводится такая величина, как мгновенная частота сигнала, равная производной его фазы по времени. Для гармонического сигнала $\cos(\omega t + \varphi)$ мгновенная частота постоянна и тождественно равна ω ; в случае же, когда сигнал описывает нестационарный колебательный процесс, его мгновенная частота, также как амплитуда и фаза, может меняться в даже в течение одного периода колебания. Амплитуда, фаза и частота являются основными понятиями в описании колебательных процессов, и предложенная методика позволяет находить их точные значения в любой момент времени, что чрезвычайно важно при анализе особенностей динамики МГД неустойчивостей. Однако данная методика определения амплитуды, фазы и мгновенной частоты в полной мере применима лишь к монокомпонентным сигналам, т.е. сигналам, верхние и нижние огибающие которых симметричны относительно нуля, а число экстремумов равно или не более чем на единицу отличается от числа пересечений нуля. Очевидно, что экспериментальные сигналы в общем случае не удовлетворяют этому требованию. В §4.2 описан алгоритм эмпирического модового разложения (*empirical mode decomposition* – EMD) позволяющий преодолеть эти ограничения. Разложение представляет собой итеративную процедуру удаления из сигнала локального тренда, позволяющую разложить исходное колебание на сумму монокомпонентных составляющих, для которых строятся аналитические сигналы, и монотонного остатка. Такая комбинация метода EMD с построением аналитического сигнала носит название преобразования Гильберта-Хуанга. Поскольку базис EMD разложения определяется локальными свойствами самого сигнала, оно является адаптивным и может быть применено для разделения сигналов с

перекрывающимися Фурье-спектрами. Применение алгоритма EMD к временным реализациям сигналов магнитных зондов позволяет разделить колебания, соответствующие разным модам МГД-возмущения, эффективно удалять шумы и наводки, а также выделять нелинейный глобальный тренд.

В §4.3 описано использование преобразования Гильберта-Хуанга для анализа пространственной структуры МГД возмущения. По сигналам магнитных датчиков для каждого момента времени можно построить распределение возмущения полоидального магнитного поля на краю плазменного шнура. Вследствие тороидальности магнитной конфигурации разложение даже одномодового возмущения по цилиндрическим гармоникам с помощью преобразования Фурье дает широкий спектр. Фурье-анализ многомодового возмущения может быть сильно затруднен из-за взаимного наложения пространственных спектров каждой моды. Применение алгоритма EMD в ряде случаев позволяет корректно разложить пространственное распределение многомодового возмущения на набор одномодовых пространственных распределений. После этого, построение для каждого распределения соответствующего аналитического сигнала, позволяет определить зависимость амплитуды и фазы возмущения от полоидального угла, что в свою очередь, дает возможность идентифицировать полоидальное волновое число моды и ее пространственную фазу.

Глава 5 посвящена описанию программного комплекса обработки экспериментальных данных МГД диагностики установки T-10. Комплекс является оригинальным программным продуктом, существенно облегчающим процесс анализа сигналов, не предъявляя в то же время высоких аппаратных требований.

В §5.1 описан программный пакет визуализации и обработки данных TDF Browser. Пакет позволяет выделять отдельные участки сигналов, осуществлять простые преобразования, строить спектрограммы, вейвлет-преобразования, пространственное распределение МГД возмущения для выбранного момента, а

также наблюдать его эволюцию во времени. Кроме того, в программу встроены ряд модулей для пакетной обработки данных, а именно: разложение на пространственные Фурье гармоники, алгоритмы EMD и SVD, вычисление мгновенной частоты и амплитуды сигнала с помощью преобразования Гильберта. Программа имеет дружественный интерфейс с подробной контекстной справочной системой.

В §5.2 описана программа спектрального анализа данных Spectrum Manager. Программа имеет многооконный интерфейс, позволяет исследовать спектральные характеристики и фазовые соотношения сигналов магнитных зондов, осуществлять цифровую фильтрацию, вычислять функцию когерентности и выполнять ряд преобразований.

В главе 6 описаны результаты экспериментальных исследований особенностей динамики вращения МГД возмущений в присутствии внешних магнитных полей и гало-токов на токамаке T-10. Эксперименты проводились в режимах с низким β , при котором в течение 300-400 мс наблюдалась развитая МГД активность, интерпретируемая как тиринг-неустойчивость.

В §6.1 описан эксперимент по воздействию переменного гало-тока на вращение МГД возмущений с $m/n = 2/1$. В системе возбуждения гало-тока, описанной в §2.2, из электрической цепи исключался источник сигнала. При замыкании контактора поле МГД возмущения наводило в цепи переменный ток, протекающий в пристеночной области плазмы (гало-ток). Средняя частота осцилляций магнитного поля снижалась, при этом период колебания гало-тока совпадал с периодом колебания поля МГД возмущения, отставая от него по фазе. Также была обнаружена линейная зависимость относительного изменения частоты МГД возмущения от амплитуды гало-тока.

В §6.2 описан эксперимент по воздействию на динамику МГД возмущения квазистационарного гало-тока, генерируемого внешним источником ЭДС. При включении тока одного направления вращение МГД возмущения становилось сильно неравномерным и замедлялось, а при большой

величине тока происходила полная остановка вращения. Для противоположного направления тока скорость вращения увеличивалась, причем неравномерность вращения уменьшалась. Полученные результаты можно объяснить наличием в установке квазистационарного винтового паразитного магнитного поля. При одном направлении гало-тока его поле складывалось с паразитным полем, усиливая тормозящий эффект, а при обратном направлении – частично компенсировало его. Данная методика позволяет оценивать величину паразитного поля на установке. В частности, величина гармоники $2/1$ паразитного поля составила $\sim 1.5 \times 10^{-4}$ Тл.

В §6.3 описано исследование связи неравномерности вращения МГД возмущения в присутствии паразитного магнитного поля с величиной амплитуды этого возмущения. Для МГД возмущения, амплитуда которого в течение определенного промежутка времени увеличивалась более чем на порядок, вычислялась мгновенная скорость вращения моды $m/n = 2/1$ в различные моменты времени и оценивалась неравномерность вращения как отношение изменения мгновенной скорости вращения за период колебания к средней скорости за период. В результате оказалось, что неравномерность вращения велика для больших и малых амплитуд поля МГД возмущения и сравнительно невелика для средних значений амплитуд. Данные результаты находят объяснение в рамках теоретической модели, описанной в §1.2.

В §6.4 описано исследование совместной динамики вращения пространственно ортогональных мод МГД возмущения. В ходе исследования было обнаружено, что изменение скорости вращения двух мод МГД возмущения с $m/n = 2/1$ и $m/n = 3/2$, связанное с внешним паразитным магнитным полем, происходит согласованно. Колебания мгновенной скорости вращения обеих мод возмущения происходят с одинаковым периодом, при этом имеет место некоторое запаздывание по фазе изменения скорости вращения моды с $m/n = 3/2$ относительно более развитой моды с $m/n = 2/1$. Поскольку данные моды пространственно ортогональны (имеют разные n),

связь между ними имеет не электромагнитную природу. Интерпретируя МГД возмущение как тиринг-неустойчивость, можно сделать заключение о наличии механизма передачи вращательного момента от плазменного слоя в окрестности резонансной магнитной поверхности с $m/n = 2/1$ слою в окрестности соседней резонансной магнитной поверхности с $m/n = 3/2$, например, посредством сил вязкостного трения.

Основные результаты работы:

Подводя итог исследованию, проведенному в данной работе, можно сделать следующие выводы.

1. Разработанный аппаратно-программный комплекс системы сбора данных МГД диагностики позволяет эффективно проводить исследования характеристик крупномасштабных МГД возмущений на токамаке Т-10.
2. Методика обработки данных МГД диагностики, основанная на преобразовании Гильберта-Хуанга, позволяет исследовать особенности динамики и пространственной структуры МГД возмущений, недоступные для спектральных методов анализа.
3. Разработанный пакет программ, интегрированных в общий интерфейс, предоставляет широкий выбор алгоритмов эффективной обработки экспериментальных данных.
4. Экспериментально продемонстрировано замедление вращения МГД возмущения под воздействием переменного гало-тока, наводимого полями МГД-возмущения в пристеночной области плазмы.
5. Экспериментально показано, что возбуждение квазистационарного гало-тока внешним источником ЭДС влияет на среднюю скорость вращения МГД возмущений и на степень неравномерности вращения.
6. Показано, что неравномерность вращения магнитных островов, связанная с паразитным магнитным полем, велика как для большой, так и для малой

величины МГД возмущения, при этом для средних значений амплитуды возмущения неравномерность значительно меньше.

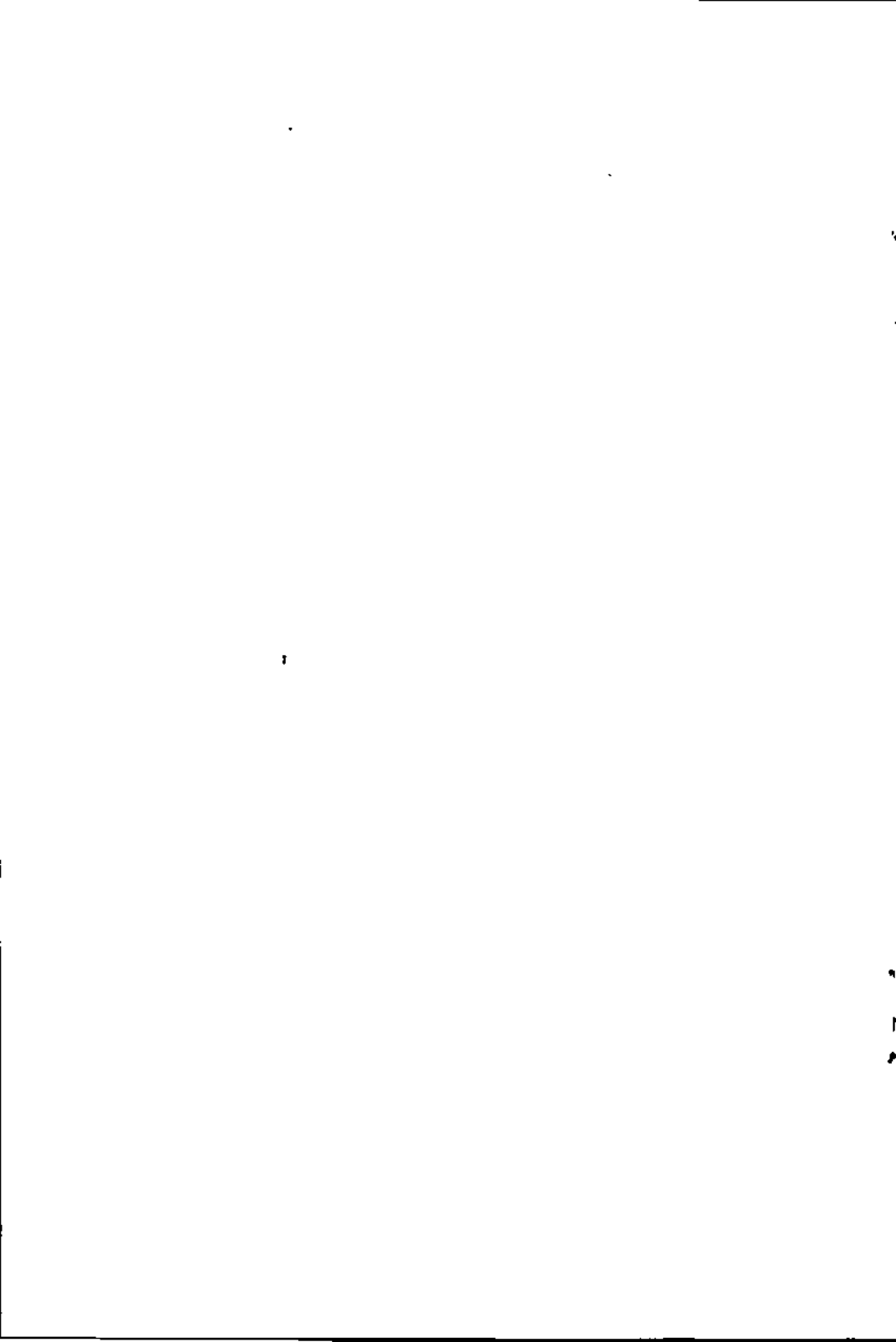
7. Экспериментально обнаружено взаимодействие между пространственно ортогональными модами МГД-возмущения в токамаке T-10, заключающееся в передаче характера неравномерности вращения от моды с $m/n = 2/1$ моде с $m/n = 3/2$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ivanov N.V., Kakurin A.M., Volkov V.V., Kovrov P.E., Pavlov Yu.D., Orlovskiy I.I. Interdependence of magnetic islands, halo current and runaway electrons in T-10 tokamak.// Fusion Energy 2000 (Proc. 18th Int. Conf., Sorrento, 2000), IAEA, Vienna (2001).
2. Orlovskiy I.I., Kakurin A.M. Tearing-Mode Identification of Tokamak Plasmas from Mirnov Signals.// Proc. 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 2003, P-3.120.
3. Какурин А.М., Орловский И.И. Идентификация структуры крупномасштабных МГД-возмущений в торе на основе анализа сигналов магнитных зондов.// Физика плазмы, т.29, №10, 2003, с. 891-894.
4. Какурин А.М., Орловский И.И. Влияние рассеянных полей на динамику тиринг-моды в токамаке. // Физика плазмы, т.30, №4, 2004, с. 307-313.
5. Какурин А.М., Орловский И.И. Метод эмпирического модового разложения в исследовании структуры крупномасштабных МГД-неустойчивостей в токамаке. // Физика плазмы, т.30, №5, 2004, с. 370-375.
6. Orlovskiy I.I., Kakurin A.M. Hilbert Spectrum Analysis of Mirnov Signals. // Proc. 32nd EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., Tarragona, Spain, 2005, P-1.089.
7. Ivanov N.V., A.N. Chudnovskiy, Kakurin A.M., Orlovskiy I.I. "NTM Seed Island Formation by Error Field in Rotating Plasma" // Proc. 33rd EPS Conf. on Plas. Phys., Rome, 2006, P1.176.

8. Orlovskiy I.I., Kakurin A.M. "Coupling of 2/1 and 3/2 Tearing Modes in T-10 Tokamak". // Proc. 33rd EPS Conf. on Plas. Phys., Rome, 2006, P4.083.
9. И.И. Орловский. Методы обработки сигналов в МГД диагностике. Препринт ИАЭ-6420/7, М., 2006.

4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000



Подписано в печать 26.12.2006. Формат 60×90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0
Тираж 55 экз. Заказ 100.

Отпечатано в РНЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

1007A
38

07 - 38