

Ю. В. Митришкин

УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМОЙ

В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ТЕРМОЯДЕРНЫХ
УСТАНОВКАХ

*Адаптивные
автоколебательные
и робастные
системы управления*



URSS

Ю. В. Митришкин

УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМОЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

**Адаптивные
автоколебательные
и робастные
системы управления**



**URSS
МОСКВА**

Митришкин Юрий Владимирович

**Управление плазмой в экспериментальных термоядерных установках:
Адаптивные автоколебательные и робастные системы управления.**
М.: КРАСАНД, 2017. — 400 с.

В монографии систематично представлен вклад, сделанный автором в области автоматического управления плазмой в магнитных ловушках (открытой магнитной ловушке и токамаках). Поставлен и решен оригинальный цикл научно-технических задач управления равновесием и устойчивостью высокотемпературной плазмы в магнитном поле: 1) построены адекватные модели объектов и исполнительных устройств; 2) предложены, разработаны и исследованы методы адаптации с автоколебаниями для управления плазмой в токамаках и открытых магнитных ловушках; 3) применение современной H_∞ теории управления, нелинейных методов синтеза и современного математического обеспечения MATLAB привело к разработке и исследованию многосвязных робастных систем управления положением, формой и током плазмы в ITER в условиях разброса магнитных конфигураций плазмы.

Монография предназначена для специалистов, разрабатывающих и применяющих в физическом эксперименте системы автоматического управления в термоядерных установках, специалистов, занимающихся управлением сложными многомерными (многосвязными) динамическими объектами, а также для студентов и аспирантов, принимающих участие в научной работе по применению систем управления динамическими объектами.

Издательство «КРАСАНД». 117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56.
Формат 60×90/16. Печ. л. 25. Доп. тираж.

Отпечатано в АО «Областная типография «Печатный двор».
432049, Ульяновск, ул. Пушкирева, д. 27.

ISBN 978-5-396-00694-2

© КРАСАНД, 2016

21174 ID 221456



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
Глава 1. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ	26
1.1. Задачи идентификации и управления плазмой в токамаках и открытой магнитной ловушке	26
1.2. Методология комплексной разработки систем управления плазмой	33
1.2.1. Общая концепция разработки систем управления плазмой	33
1.2.2. Этапы комплексной разработки систем управления	35
1.3. Методы адаптации в автоколебательных системах управления	36
1.3.1. Адаптивные автоколебательные системы	36
1.3.2. Методы адаптации с автоколебаниями	42
1.4. Методы робастного управления	44
1.4.1. Сигналы и системы	44
1.4.2. Постановка задачи робастного управления	53
1.4.3. Методы решения проблемы H_∞ -оптимизации	63
1.5. Выводы по главе 1	64
Глава 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ	66
2.1. Идентификация модели желобковых колебаний плазмы с релаксационными колебаниями плотности	66
2.1.1. Желобковая неустойчивость плазмы в установке Огра-3	66
2.1.2. Линейная модель одной моды желобковых колебаний плазмы	68
2.1.3. Модель одной моды с релаксационными колебаниями плотности плазмы	72

2.2.	Идентификация моделей горизонтальных и вертикальных смещений плазмы в токамаках.....	75
2.2.1.	Концепция токамака.....	75
2.2.2.	Модели плазмы в токамаке с распределением токов на камере.....	79
2.2.3.	Идентификация модели горизонтального движения плазмы.....	82
2.2.4.	Идентификация модели вертикального движения плазмы.....	92
2.2.5.	Лемма и теорема о точности аппроксимации моделей.....	93
2.3.	Линеаризация многосвязной модели формы и тока плазмы в ИТЭР.....	97
2.3.1.	Задача управления плазмой в ИТЭР.....	97
2.3.2.	Линеаризованная модель формы и тока плазмы в ИТЭР.....	99
2.4.	Идентификация моделей исполнительных устройств.....	101
2.4.1.	Идентификация моделей инверторов напряжения.....	101
2.4.2.	Идентификация модели многофазного тиристорного выпрямителя напряжения.....	105
2.5.	Выводы по главе 2.....	109
Глава 3.	АДАПТИВНАЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ.....	111
3.1.	Алгоритмы автоматической оптимизации систем с пороговым критерием качества.....	111
3.1.1.	Способ автоматической оптимизации.....	111
3.1.2.	Алгоритмы однопараметрической оптимизации.....	112
3.1.3.	Алгоритмы многопараметрической оптимизации.....	114
3.2.	Аналитическое исследование автоколебательных систем автоматической оптимизации с пороговым критерием качества.....	116
3.2.1.	Оценка точности и быстродействия поиска.....	116
3.2.2.	Доказательство сходимости поиска к локальному экстремуму пороговой функции качества.....	117

3.3. Автоматический оптимизатор для настройки угла фазирования	117
3.3.1. Постановка задачи	117
3.3.2. Блок-схема автоматического оптимизатора.....	118
3.3.3. Принцип действия автоматического оптимизатора	119
3.4. Результаты верификационных исследований системы автоматической оптимизации плотности плазмы в открытой магнитной ловушке, эксперименты на установке Огра-3	121
3.4.1. Временные диаграммы поиска	121
3.4.2. Результаты экспериментов на плоскости «плотность — угол фазирования».....	121
3.5. Выводы по главе 3	124
Глава 4. АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ	125
4.1. Идентификатор состояния для непрерывного оценивания координатного возмущения.....	125
4.1.1. Постановка задачи	125
4.1.2. Идентификатор состояния и ошибки оценивания	126
4.2. Адаптивные системы оценивания координатного возмущения и параметров модели плазмы	129
4.2.1. Непрерывное оценивание коэффициента усиления	129
4.2.2. Непрерывное оценивание постоянной времени	133
4.2.3. Совместное непрерывное оценивание параметров	137
4.2.4. Дискретное оценивание параметров	150
4.3. Физический смысл моделей смещения плазмы с сосредоточенными параметрами	157
4.3.1. Модель горизонтальных смещений плазмы.....	157
4.3.2. Модель вертикальных смещений плазмы.....	161
4.4. Модельная и экспериментальная верификация систем оценивания параметров плазмы.....	164

4.4.1. Моделирование системы оценивания параметров плазмы в токамаке Т-14	164
4.4.2. Эксперименты на токамаке Туман-3	169
4.5. Выводы по главе 4	172
Глава 5. РЕЛЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ	175
5.1. Релейные автоколебательные системы управления горизонтальным положением плазмы в токамаках с линейными регуляторами	175
5.1.1. Постановка задачи, устойчивость и критерии качества управления	175
5.1.2. Система с ПД-регулятором токамака Т-14	178
5.1.3. Система с П-регулятором токамака Туман-3	190
5.2. Релейная автоколебательная система компенсации неконтролируемого возмущения	199
5.2.1. Синтез закона компенсации	199
5.2.2. Моделирование системы компенсации на моделях токамака Т-14	201
5.2.3. Эксперименты на токамаке Туман-3	204
5.3. Минимизация модуля ошибки стабилизации горизонтального положения плазмы токамака в релейной автоколебательной системе со стационарным регулятором	211
5.3.1. Постановка задачи	211
5.3.2. Блок-схема системы управления ТВД	211
5.3.3. Эксперименты на установке ТВД	214
5.4. Релейная система управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в токамаке	218
5.4.1. Постановка задачи	218
5.4.2. Область управляемости	219
5.4.3. Оптимизация фазовых ограничений	222
5.4.4. Применение результатов оптимизации в ИТЭР	226
5.5. Выводы по главе 5	228

Глава 6. АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ МИНИМИЗАЦИИ АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ СМЕЩЕНИЙ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ	230
6.1. Оптимальные автоколебания в релейных системах с аperiodическими объектами второго порядка	230
6.1.1. Постановка задачи	230
6.1.2. Структурные схемы объектов	231
6.1.3. Уравнения фазовых траекторий.....	233
6.1.4. Фазовое пространство разомкнутых систем	236
6.1.5. Оптимальные кривые автоколебаний и законы управления.....	238
6.2. Система адаптивной минимизации амплитуды автоколебаний входной величины устойчивого объекта.....	254
6.2.1. Постановка задачи	254
6.2.2. Синтез и исследования алгоритма адаптации без возмущения	255
6.2.3. Предельный цикл в системе второго порядка	260
6.2.4. Синтез алгоритма адаптации с аддитивным возмущением	265
6.3. Существование и единственность оптимальных замкнутых кривых автоколебаний.....	270
6.4. Эксперименты на токамаке Туман-3	275
6.5. Выводы по главе 6	278
Глава 7. РОБАСТНАЯ МНОГОСВЯЗНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ И ТОКОМ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ-РЕАКТОРЕ ИТЭР	280
7.1. Постановка задачи управления формой и током плазмы в ИТЭР	280
7.1.1. Системы управления в ИТЭР.....	280
7.1.2. Технические требования к системе управления	282
7.1.3. Методология разработки регуляторов обратной связи в ИТЭР.....	285

7.2. Синтез и сравнительный анализ робастного H_∞ -регулятора	285
7.2.1. H_∞ -регулятор нормализованной взаимно-простой факторизации	285
7.2.2. Нелинейный блок коррекции полной мощности	289
7.2.3. H_∞ -регулятор μ -синтеза	290
7.2.4. Линейно-квадратичный регулятор	292
7.3. Моделирование систем управления	294
7.3.1. Моделирование на линейных моделях.....	294
7.3.2. Влияние эффекта насыщения обмоток полоидального поля	296
7.3.3. Сравнение систем управления	300
7.3.4. Моделирование на нелинейной модели объекта.....	306
7.3.5. Качество управления при возмущениях типа ELMs	310
7.4. Разработка системы управления током, положением и формой плазмы в ITER-FEAT	311
7.4.1. Токамак ITER-FEAT.....	311
7.4.2. Структурная схема блок-диагональной системы управления	312
7.4.3. Скалярный H_∞ -регулятор скорости вертикальных смещений плазмы.....	316
7.4.4. Робастность скалярной системы управления	322
7.4.5. Многомерный H_∞ -робастный регулятор формы и тока плазмы.....	329
7.4.6. Робастность многомерной системы управления.....	342
7.4.7. Сравнение регуляторов.....	345
7.5. Выводы по главе 7	346
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	350
ПРИЛОЖЕНИЕ. ЗАДАЧИ И СТЕНДЫ	352
А. Актуальные задачи управления плазмой в токамаках	352
Б. Экспериментальные стенды реального времени	359
ЛИТЕРАТУРА.....	371
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	391