

Ю. В. Митришкин, Н. М. Карцев,
Е. А. Кузнецов, А. Я. Коростелев

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ
МАГНИТНОГО
УПРАВЛЕНИЯ
ПЛАЗМОЙ
В ТОКАМАКАХ**



URSS

**Ю. В. Митришкин, Н. М. Карцев,
Е. А. Кузнецов, А. Я. Коростелев**

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ
МАГНИТНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ
В ТОКАМАКАХ**



URSS

МОСКВА



Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20–18–00011), не подлежит продаже

**Митришкин Юрий Владимирович, Карцев Николай Михайлович,
Кузнецов Евгений Александрович, Коростелев Александр Яковлевич**

Методы и системы магнитного управления плазмой в токамаках.
М.: КРАСАНД, 2020. — 528 с.; цв. вкл.

В монографии рассматриваются системы магнитного управления плазмой в токамаках, связанные с управлением вертикальной скоростью, положением, током и формой плазмы. Системы применяются к действующим в России токамакам Туман-3, Глобус-М (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург) и Т-11М (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк), а также к сооружаемым токамакам Т-15МД (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва) и ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, г. Кадараш, Франция). Для решения поставленных задач управления в качестве моделей плазмы применяется код DINA (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»), его линеаризованные и идентифицированные модели, а также модели, полученные по экспериментальным данным токамаков ТВД (НИЦ «Курчатовский институт»), Туман-3, Глобус-М и Т-11М. Для магнитного управления плазмой разрабатываются и применяются различные методы управления: Н_∞ теория оптимизации, приводящая к синтезу робастных систем управления, метод управления с прогнозирующей моделью, адаптация, развязка каналов управления и ПИД-регуляторы, каскадное и иерархическое управление. В начале монографии делается обзор систем магнитного управления плазмой, применяемых на ряде отечественных и зарубежных токамаках: Т-14, ТВД, Туман-3, Глобус-М (Россия), JET (Англия), ASDEX Upgrade (Германия), TCV (Швейцария), DIII-D (США), EAST (Китай).

Научный труд рассчитан на специалистов, которые занимаются проектированием и применением систем управления высокотемпературной плазмой в токамаках, а также специалистов, занимающихся разработкой и применением систем управления любыми динамическими объектами, включая студентов и аспирантов, использующих в своей научной работе системы автоматического управления

Methods and systems of plasma speed, position, current, and shape control in tokamaks

In the monograph, plasma magnetic control systems in tokamaks are considered which are connected with plasma speed, position, current, and shape control. The systems are applied to operating tokamaks in Russia namely Tuman-3, Globus-M (Ioffe Institute, St. Petersburg) and T-11M (State Research Center of Russian Federation "Troitsk institute for innovation & fusion research", Troitsk) as well as to constructed tokamaks: T-15MD (National Research Center "Kurchatov Institute") and ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, Cadarache, France). The plasma models are applied such as the code DINA (State Research Center of RF "Troitsk institute for innovation & fusion research", Troitsk), its linearized and identified models as well as the models obtained on the base of experimental data of TVD (Kurchatov Institute), Tuman-3, Globus-M, and T-11M tokamaks for the solution of the stated problems of control. For plasma magnetic control, various methods of control are developed and applied: H_∞ optimization theory that leads to the synthesis of robust control systems, model predictive control method, adaptation, decoupling of control channels and PID-controllers, cascade and hierarchical control. In the beginning of the monograph the survey of plasma magnetic control systems are given which are applied in national and foreign tokamaks: T-14, TVD, Tuman-3, Globus-M (Russia), JET (UK), ASDEX Upgrade (Germany), TCV (Switzerland), DIII-D (US), EAST (China).

Издательство «КРАСАНД». 117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56.

Формат 60×90/16. Тираж 300 экз. Печ. л. 33. Подписано в печать 12.10.2020. Заказ № 1013.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета

в АО «Областная типография «Печатный двор»
432049, г. Ульяновск, ул. Пушкарёва, 27.

ISBN 978–5–396–01016–1

© КРАСАНД, 2020

26945 ID 263123



НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете: http://URSS.ru
	Тел./факс (многоканальный): + 7 (499) 724 25 45
	URSS

Оглавление

Введение	11
1. Проблема управляемого термоядерного синтеза.....	11
2. Плазма в токамаках	13
Литература.....	20
Глава 1. Токамаки.....	23
1.1. Эволюция токамаков	23
1.2. Принцип действия токамаков	26
1.3. Классификация современных токамаков по полоидальным системам.....	28
1.4. Токамаки в Российской Федерации.....	30
1.4.1. Сферический токамак Глобус-М (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН).....	30
1.4.2. Токамак Т-11М (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»).....	35
1.4.3. Токамак Т-15МД (НИЦ «Курчатовский институт»).....	39
1.5. ITER (г. Кадараш, Франция)	44
1.5.1. Магнитная система управления плазмой в ITER.....	44
1.5.2. Варианты проекта и сценарий работы ITER.....	46
1.6. DEMO (DEMOstration Power Plant) — Демонстрационная термоядерная электростанция.....	50
1.6.1. Дорожные карты разработки и создания DEMO	50
1.6.2. Конструкции и полоидальные системы DEMO.....	52
Выводы	56
Литература	57

Глава 2. Компоненты систем управления плазмой	61
2.1. Диагностика плазмы в токамаках.....	61
2.2. Модели плазмы	64
2.2.1. Уравнения эволюционных моделей плазмы	64
2.2.2. Плазмфизические коды нелинейных эволюционных моделей плазмы	66
2.2.3. Линеаризация нелинейных моделей плазмы	67
2.2.4. Восстановление равновесия плазмы по внешним магнитным измерениям.....	69
2.3. Дополнительный нагрев плазмы в токамаках.....	73
2.4. Неустойчивости и срывы	74
2.5. Исполнительные устройства систем магнитного управления плазмой и их модели	79
2.6. Инвертор тока как исполнительное устройство систем управления положением плазмы	81
2.6.1. Режим работы инвертора тока.....	83
2.6.2. Алгоритм управления инвертором тока	86
2.6.3. Организация начальной стадии работы исполнительного устройства.....	95
2.6.4. Элементы защиты инвертора тока	98
2.6.5. Экспериментальное исследование исполнительного устройства.....	102
2.7. Инвертор напряжения.....	106
2.8. Управляемый многофазный выпрямитель	111
2.8.1. Полная модель выпрямителя.....	111
2.8.2. Аппроксимирующая модель выпрямителя	112
Выводы	113
Литература	114
Глава 3. Магнитное управление плазмой	119
3.1. Современные системы управления положением плазмы.....	119
3.1.1. Токамаки Т-14, Туман-3, ТВД (Россия).....	119

3.1.2. Токамак Глобус-М (Россия).....	120
3.1.3. Токамак JET (Англия).....	121
3.1.4. Токамак EAST (Китай).....	124
3.2. Современные системы управления положением, током и формой плазмы	128
3.2.1. Токамак DIII-D (США).....	129
3.2.2. Токамак ASDEX Upgrade (Германия)	132
3.2.3. Токамак JET (Англия).....	134
3.2.4. Токамак TCV (Швейцария).....	139
3.2.5. Токамак EAST (Китай).....	141
3.2.6. Токамак Глобус-М (Россия).....	145
3.2.7. Токамак T-15МД (Россия)	151
3.3. Системы магнитного управления пристеночными резистивными модами.....	152
3.4. Реализация систем управления плазмой	158
3.4.1. Стенды реального времени для токамаков.....	158
3.4.2. Программная реализация системы управления формой плазмы в JET	159
3.4.3. Система управления плазмой токамака ASDEX Upgrade	160
3.4.4. Система управления токамака TCV.....	162
3.5. Современное состояние проблемы	164
Выводы	165
Литература	167

Глава 4. Системы магнитного управления скоростью и положением плазмы..... 174

4.1. Адаптивная система управления горизонтальным положением плазмы в токамаке Туман-3	174
4.1.1. Структурная схема системы	174
4.1.2. Модель тиристорного преобразователя.....	178
4.1.3. Алгоритм управления.....	181
4.1.4. Адаптивный идентификатор состояния	187

4.1.5. Компенсация средней составляющей смещения плазмы	196
4.1.6. Экспериментальное исследование системы	198
4.2. Система стабилизации горизонтального положения плазмы токамака Т-11М	200
4.2.1. Структурная схема системы стабилизации	200
4.2.2. Периодические решения в системе	202
4.2.3. Устойчивость системы стабилизации	213
4.2.4. Выбор параметров ПД-регулятора	228
4.2.5. Формирование сигнала рассогласования системы	229
4.2.6. Экспериментальное исследование системы стабилизации	233
4.3. Система стабилизации вертикального положения плазмы токамака Глобус-М	234
4.3.1. Структурная схема системы стабилизации	234
4.3.2. Периодические решения в системе	237
4.3.3. Устойчивость системы стабилизации	241
4.3.4. Предельное значение инкремента неустойчивости плазмы	247
4.3.5. Выбор параметров ПД-регулятора	251
4.3.6. Формирование сигнала рассогласования системы	256
4.3.7. Экспериментальное исследование системы стабилизации	259
4.4. Система стабилизации вертикального положения плазмы Т-11М	261
4.5. Скалярный контур управления вертикальной скоростью плазмы в ITER-2	266
4.5.1. Идентификация нестационарной модели скорости вертикального движения плазмы в токамаке	266
4.5.2. Стабилизация вертикальной скорости плазмы пропорциональным регулятором	271
4.6. Исследование области управляемости по вертикали в ITER-2	275

4.7. Системы стабилизации вертикального положения плазмы в токамаке Т-15МД для различных вариантов расположения обмотки управления	284
4.7.1. Объект управления	284
4.7.2. Постановка задачи управления	288
4.7.3. Максимальная управляемая величина вертикального смещения плазмы.....	289
4.7.4. Линейные системы стабилизации вертикального положения плазмы	293
4.7.5. Система стабилизации вертикального положения плазмы в токамаке с импульсными исполнительными устройствами	305
4.8. Система стабилизации скорости вертикального положения плазмы в токамаке ITER с неопределенностью в переменных параметрах объекта.....	317
4.8.1. Динамическая модель нестационарного объекта управления.....	317
4.8.2. Синтез нестационарного регулятора скорости плазмы.....	320
4.8.3. Численное моделирование замкнутой системы управления скоростью плазмы	323
4.8.4. Разрешение параметрической неопределенности в модели скорости плазмы	326
4.8.5. Точность интерполяции и управления	330
Выводы	331
Литература	335
Глава 5. Многомерные каскадные системы магнитного управления положением, током и формой плазмы в токамаках ITER, Глобус-М и Т15-МД.....	341
5.1. Управление формой плазмы в ITER-1	341
5.2. Синтез H_∞ -системы управления на основе структурной схемы отражения внешнего возмущения в ITER-2.....	345

5.3. Система с прогнозирующей моделью для управления формой и током плазмы в ITER-2.....	349
5.3.1. Постановка задачи.....	349
5.3.2. Управление с прогнозирующей моделью в обратной связи.....	352
5.3.3. Прогнозирование выхода объекта управления.....	356
5.3.4. Оптимальное управление в отсутствии ограничений.....	358
5.3.5. Учет ограничений на управляющие воздействия.....	360
5.3.6. Моделирование системы управления формой и током плазмы на коде DINA при действии возмущений типа малого срыва.....	361
5.4. Каскадная система слежения за током и формой плазмы в ITER-2 с развязкой каналов управления на стадии ввода плазменного тока.....	368
5.4.1. Постановка задачи.....	368
5.4.2. Синтез внутреннего многомерного контура управления токами в обмотках полоидального магнитного поля.....	371
5.4.3. Синтез внешнего каскада управления током и формой плазмы с многомерным ПИ-регулятором с двойным интегрированием.....	379
5.4.4. Моделирование каскадной системы управления с развязкой каналов на коде DINA на стадии ввода тока плазмы.....	382
5.4.5. Управление током и формой плазмы при наличии ограничений на токи в управляющих обмотках.....	395
5.5. Иерархические робастные системы магнитного управления положением, формой и током плазмы с адаптацией вертикального положения магнитной оси в токамаках ITER-2 и Глобус-М.....	408
5.5.1. Постановки задач управления плазмой в токамаках.....	408

5.5.2. Динамические модели плазмы в токамаках	413
5.5.3. Иерархические робастные системы управления с адаптацией	416
5.5.4. Система магнитного управления плазмой для ITER-2	420
5.5.5. Система магнитного управления плазмой для Глобус-М.....	428
5.6. Многомерная система каскадного управления формой и током плазмы в ITER-2 с развязкой каналов и H_{∞}-регулятором	438
5.6.1. Модель объекта управления — плазмы в ITER-2	438
5.6.2. Линейная модель объекта и ее редукция.....	441
5.6.3. Постановка задачи магнитного управления плазмой в ITER-2	442
5.6.4. Каскадная структура системы управления с развязкой каналов.....	443
5.6.5. Внешний каскад управления со встроенным многомерным H_{∞} -регулятором	446
5.6.6. Моделирование системы управления плазмой на нелинейной модели DINA	450
5.7. Системы управления положением, формой и током плазмы в токамаке T-15МД	459
5.7.1. Объект управления	459
5.7.2. Линейная модель плазмы в токамаке T15-МД	460
5.7.3. Постановка задачи	463
5.7.4. Двухкаскадная система	463
5.7.5. Система управления по оценке вектора состояния	468
Выводы	474
Литература	476
 Глава 6. Экспериментальная поддержка, моделирование и реализация систем управления плазмой в ITER-2	 483
6.1. Экспериментальная отработка сценариев для ITER-2.....	483

6.2. Подходы в моделировании и реализации систем управления плазмой в ITER-2.....	486
6.2.1. Алгоритм разработки систем управления плазмой	486
6.2.2. Программно-вычислительная платформа	487
6.2.3. Стенд реального времени	489
6.2.4. Информационно-управляющая система ITER-2	491
6.3. Подготовка системы управления плазмой в ITER-2 к пуску и эксплуатации	496
Выводы	503
Литература	504
Заключение	508