

Управление плазмой в тороидальных аксиально симметричных магнитных конфигурациях (токамаках)

Ю. В. Митришкин

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
yvm@mail.ru
Москва, РОССИЯ

Американскими специалистами сделана оценка: в ближайшие десятилетия начнется дефицит энергии у человечества вследствие постоянного роста потребности в энергии и снижения запасов природных ресурсов. Данный дефицит может быть преодолен решением проблемы управляемого термоядерного синтеза, который будет являться практически неограниченным источником энергии от слияния ядер легких элементов. Лидером в решении данной проблемы являются токамаки – тороидальные камеры с магнитными катушками. Первый токамак был создан в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова в 1954 г. После этого во всём мире построен 221 токамак, из которых работает в настоящее время 41. В 2009 году началось сооружение первого международного термоядерного реактора-токамака ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) во Франции (г. Кадараш) международным сообществом в составе: Европа, США, Япония, Россия, Китай, Южная Корея и Индия.

Сейчас общепризнано, что современные токамаки принципиально не могут работать без систем управления плазмой с обратной связью, поэтому токамаки надо проектировать совместно с системами управления плазмой. В этой связи в ИПУ РАН накоплен опыт работы по применению систем управления плазмой для различных термоядерных установок в компьютерном моделировании и в физических экспериментах. Начало работ связано с применением систем управления для подавления желобковой неустойчивости плазмы в экспериментах на открытой магнитной ловушке Огра-3 в ИАЭ им. И.В. Курчатова. Затем работы были перенесены на токамаки, что привело к разработке цикла систем различных классов, внедрённых в практику физического эксперимента токамаков ТО-1, Т-7, Т-10, ТВД (ИАЭ им. И.В. Курчатова), Туман-3 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. С-Петербург). Далее были выполнены работы по разработке и моделированию систем управления плазмой для проектов токамаков Т-14 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), Т-15 (НИЦ «Курчатовский институт»), ITER (Франция), а также для действующего сферического токамака Глобус-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Выпущен обзор по управлению плазмой в токамаках в журнале «Проблемы управления», 2018, №1 и №2, а также пресс-релиз ФАНО (https://fano.gov.ru/ru/press-center/card/?id_4=39740).

В настоящее время имеются две дорожные карты создания коммерческих термоядерных электростанций на токамаках. В первом случае термоядерную

электростанцию можно создать на токамаке с относительно большим аспектным отношением $A \approx 3-4$ (A – отношение большого радиуса токамака к малому радиусу). Но при этом получаются токамаки с большим радиусом масштаба 8-9 м. Во втором случае термоядерную электростанцию можно создать на модулях сферических токамаков с малым $A \approx 1,4 - 1,7$ и большим радиусом масштаба 1,6 м. Это дает преимущество при разработке и создании термоядерной электростанции сначала на одном модуле, а затем набор модулей может обеспечить полную мощность электростанции. При этом стоимость модульной термоядерной электростанции значительно ниже стоимости электростанции на токамаке с большим аспектным отношением.

В докладе показываються действующие токамаки с вытянутым по вертикали поперечным сечением с наиболее продвинутыми системами управления плазмой DIII-D, NSTX (США), JET, MAST (Англия), ASDEX Upgrade (Германия), TCV (Швейцария), JT-60U (Япония), EAST (Китай), KSTAR (Ю. Корея), Глобус-М (Россия), а также приводятся результаты по разработке систем управления плазмой в проектах токамаков ITER, T-15 (НИЦ «Курчатовский институт») и для действующего сферического токамака Глобус-М.

Для ITER разработана следящая система за сценарными токами в PF (Poloidal Field) – обмотках и зазорами между сепаратрисой плазмы и первой стенкой. В системе сделана оригинальная развязка между каналами токов управления во внутреннем каскаде, а во внешнем каскаде применяется связь между зазорами и током плазмы с токами управления через псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза с использованием ПИИ-регуляторов по каждому каналу, каждый из которых представляет собой параллельное соединение пропорционального, интегрирующего и двойного интегрирующего звеньев для обеспечения нулевых ошибок слежения. При этом решена задача квадратичного программирования для обеспечения ограничений на токи управления при их насыщении без потери устойчивости и точности системы управления. Система показала работоспособность при моделировании на плазмо-физическом коде DINA (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) в режиме слежения за сценарными токами управления и зазорами при вводе тока плазмы с переходом к квазистационарной фазе разряда. Проведено сравнение данной системы с системой, в которой во внешнем каскаде применялся H_∞ – регулятор. Система с H_∞ – регулятором показала выше робастную точность управления и больше запас робастной устойчивости. Применение же системы с прогнозирующей моделью уменьшило отклонения зазоров и время переходного процесса при моделировании малого срыва, поскольку в алгоритмах управления были учтены ограничения на входные воздействия. В алгоритмах магнитного управления плазмой в ITER стабилизировалась скорость вертикального положения плазмы относительно нулевого значения, чтобы не было дисбаланса с формой плазмы. При этом была разработана программно-вычислительная платформа для моделирования систем управления плазмой на коде DINA с переключением регуляторов на линеаризованную модель плазмы в токамаке и обратно.

Решены две задачи кинетического управления плазмой для ITER. В первом случае разработана и моделировалась на коде ASTRA (НИИ «Курчатовский институт») адаптивная система управления с развязкой каналов мощностью термоядерного горения, а во втором случае разработана нелинейная система управления профилем тока плазмы с учетом ограничений на входные воздействия источников дополнительного нагрева. Система промоделирована на кинетической модели плазмы, содержащей уравнение Грэда-Шафранова и уравнение диффузии плазмы (ГНЦ РФ ТРИНИТИ).

Для проекта токамака T-15 решена задача переноса обмотки горизонтального магнитного поля для управления неустойчивым вертикальным положением плазмы из расположения вне обмотки тороидального поля в расположение между вакуумной камерой и обмоткой тороидального поля. Такой перенос обеспечил системе управления вертикальным положением плазмы необходимое свойство внутренней устойчивости, поскольку в этом расположении обмотка горизонтального поля не экранировалась другими RF-обмотками. Для модели вертикального движения плазмы в T-15 синтезированы и промоделированы модальная система, система с LMI-регулятором, а также система с прогнозирующей моделью с целью выяснения возможностей данных систем при управлении с исполнительными устройствами в виде многофазного тиристорного выпрямителя и инвертора напряжения на транзисторах типа IGBT. При этом было установлено, что для подавления малых срывов требуется мощность 5 – 6 МВт.

Разработан стенд реального времени на компьютерах с операционной системой xPC Target от компании MathWorks. В стенде с Host PC загружаются Simulink-схемы, конвертированные в C-код, в модели объекта и регулятора, соединенные по схеме обратной связи и реализованные на компьютерах реального времени. Такой стенд позволил промоделировать системы магнитного управления плазмой в ITER и токамаке T-15 в реальном времени, показав правомерность данного направления реализации систем управления плазмой посредством стендов реального времени.

Для действующего сферического токамака Глобус-М разработаны и применены быстродействующие системы управления положением плазмы на аналоговых ПИД-регуляторах и тиристорных инверторах тока в качестве исполнительных устройств в автоколебательном режиме работы с частотой до 3 кГц. На токамаке имеется набор RF-обмоток, включенных в контуры управления токами в этих обмотках с тиристорными управляемыми многофазными выпрямителями и ПД-регуляторами. Эти контуры позволяют управлять магнитными поверхностями плазмы программным способом в каждом разряде. Это дало возможность собрать базу данных плазменных разрядов, которая позволила разработать и промоделировать иерархические системы управления положением, током и формой плазмы с кодами восстановления равновесия плазмы в обратной связи. При этом были разработаны и созданы два кода восстановления равновесия плазмы по магнитным измерениям вне плазмы: методом итераций Пикара при решении уравнения Грэда-Шафранова посредством функций Грина и методом

подвижных филаментов в среде MATLAB. Относительно восстановленных массивов равновесий плазмы в течение разрядов по экспериментальным данным были построены массивы линейных моделей плазмы, которые при линейной интерполяции привели к линейным моделям с переменными параметрами. Для таких нестационарных моделей плазмы разработаны системы с нестационарными робастными H_∞ – регуляторами с переключением и согласованием вектора состояния при управлении потоком на сепаратрисе и полями в X-точке, а также с линейной интерполяцией H_∞ – регуляторов при управлении зазорами между первой стенкой и сепаратрисой, которые были исследованы математическим моделированием по новой методике с одновременным применением линейных моделей, сценарных экспериментальных сигналов и кодов восстановления в обратной связи. Сочетание кода восстановления с подвижными филаментами с управлением потока на сепаратрисе показало наибольшее быстродействие системы с возможностью реализации ее в реальном времени на токамаке Глобус-М2 на промышленных компьютерах компании Speedgoat с операционной системой SimulinkRT от компании MathWorks. Построена новая нестационарная эволюционная модель плазмы с распределенными параметрами, для которой применены каскадные системы с робастными ПИД-регуляторами для управления положением плазмы и токами в RF-обмотках токамака Глобус-М, настроенными посредством количественной теории обратной связи (QFT), а также H_∞ – регулятор для управления формой плазмы. На линейной модели плазмы Глобус-М разработан внешний контур управления положением плазмы и токами в RF-обмотках методом линейных матричных неравенств по оценке вектора состояния для повышения качества управления и запаса устойчивости.

Предложен принцип адаптации вертикального положения плазмы к ее форме, когда неустойчивое вертикальное положение плазмы стабилизируется специальным быстродействующим контуром для достижения консенсуса с формой плазмы. Этот принцип был применен к ITER и токамаку Глобус-М.

Дальнейшая перспектива работы связана с внедрением в практику физического эксперимента сферического токамака Глобус-М2 цифровых систем управления плазмой с перенесением полученного экспериментального опыта работы на проектирование электромагнитной системы и цифровой системы управления плазмой на сферический модуль-токамак термоядерной электростанции.

В настоящее время продолжаются работы по разработке, моделированию и применению систем управления плазмой для токамака Глобус-М2, поддерживаемые грантом РФФИ № 17-08-00293 и грантом РНФ № 17-19-01022.