04

Система генерации внешних резонансных магнитных полей на токамаке Т-10

© Е.А. Шестаков,[1] П.В. Саврухин[1,2]

[1] Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет „МЭИ“,
111250 Москва, Россия
e-mail: shestakov_ea@nrcki.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2024 г.
В окончательной редакции 14 октября 2024 г.
Принято к публикации 21 октября 2024 г.

Приведено описание системы генерации резонансных магнитных полей на токамаке Т-10 для управления магнитогидродинамическими возмущениями плазмы и коррекции рассеянных магнитных полей. Система построена на базе 8 мультипольных обмоток, расположенных на внешней стороне тора для создания резонансных магнитных полей с полоидальными и тороидальными гармониками $m = 1-4$, $n = 1$. Электропитание седловых обмоток Т-10 обеспечивалось на основе управляемых тиристорных преобразователей. Система управления построена на базе контроллеров Siemens S7 и объединяет программируемые логические контроллеры, блоки ввода диагностической информации, гальванические изоляторы и датчики параметров системы управления.

Ключевые слова: токамак, резонансные магнитные поля, магнитогидродинамические возмущениями плазмы, мультипольные обмотки, программируемые логические контроллеры.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59459.188-24

Введение

Удержание высокотемпературной плазмы в установках токамак ограничено развитием разнообразных магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей, приводящих к насыщению β_t (отношение давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля), а в ряде случаев и к срыву плазмы [1–3]. Как правило, срывы при высоком β_t связываются с идеальными винтовыми модами, развивающимися вблизи границы плазменного шнура. Стабилизация винтовых мод может быть достигнута за счет внешних магнитных полей, резонансных с возмущениями плазмы [1,4–6]. При этом амплитуда и фаза токов во внешних обмотках определяется системой обратных связей на основе измерений электромагнитных возмущений плазмы [1,3,7].

В плазме с конечной проводимостью возможно также развитие внутренних МГД возмущений (тиринг-мод) [2,8], приводящих к формированию магнитных островов вблизи резонансных поверхностей внутри плазмы. Рост магнитных островов может привести к остановке вращения МГД возмущений и к срыву плазмы при более низком уровне β_t, чем предел, налагаемый внешними модами. При низких значениях β_t устойчивость тиринг-мод зависит от профиля тока плазмы и граничных условий. Изменяя граничные условия с помощью внешних резонансных магнитных полей, можно задержать, а в ряде случаев и предотвратить развитие тиринг-мод [9–14].

Одной из наиболее важных задач системы генерации внешних резонансных полей является коррекция рассеянных магнитных полей токамака, возникающих из-за неточности сборки магнитной системы, неоднородного расположения токовводов и систем диагностик и дополнительного нагрева плазмы [1,15–17]. Рассеянные магнитные поля могут приводить к замедлению вращения и остановке магнитных островов и к последующему нарастанию МГД возмущений и срыву плазмы. Компенсация рассеянных полей оказывается особенно важной при работе в режимах с низкой плотностью на начальной стадии разряда и при дополнительном нагреве с использованием инжекции нейтральных частиц [18,19].

В настоящей работе рассматривается система генерации внешних резонансных магнитных полей, оборудованная на установке токамак Т-10. В разд. 1 приведено описание мультипольных (седловых) и стохастизирующих обмоток на токамаке Т-10. Система управления и регистрации данных, а также система электропитания обмоток, рассматриваются в разд. 2.

1. Мультипольные и стохастизирующие обмотки на токамаке Т-10

Генерация внешних резонансных магнитных полей на токамаке Т-10 обеспечивается системой мультипольных (седловых) обмоток (рис. 1). Обмотки располагаются вне вакуумной камеры на внешней стороне блоков катушек тороидального поля равномерно вдоль тороидального обхода токамака. Основные параметры обмоток приведены в таблице. Размеры и расположение обмоток

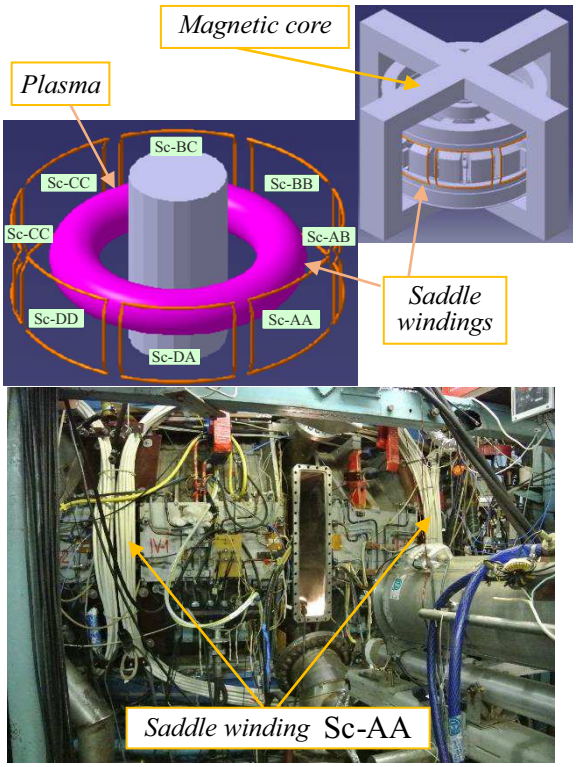


Рис. 1. *a* — схематичное изображение восьми внешних седловых обмоток (SC), оборудованных на токамаке Т-10; *b* — фотография расположения обмотки SC-AA (белые кабели).

Параметры внешних резонансных обмоток на токамаке Т-10

Тип обмоток	Седловые обмотки	Стохастизирующие обмотки
Количество обмоток	8	16
Количество витков в обмотке	11	20
Размер	Ширина $L_{SC}\approx 2$ m Высота $H_{SC}\approx 1.5$ m	Диаметр витков $D\approx 28.5$ cm
Индуктивность	490 μH	22 μH
Сопротивление	11 mΩ	7 mΩ

выбраны с учетом диагностических патрубков токамака Т-10. Параметры седловых обмоток также определялись из условия возможности использования режимов максимальных токов в проводниках при заданных параметрах тиристорных преобразователей VDU-1250 (ток $I_{SC} = 1250$ A, напряжение $V_{SC} = 55$ V).

Для обеспечения максимальной амплитуды магнитных полей оборудованы многовитковые седловые обмотки прямоугольной формы с закругленными угловыми участками с шириной основания $L_{SC} \approx 2$ m и высотой $H_{SC} \approx 1.5$ m (рис. 1). Каждая обмотка состоит из $N_{turn} = 11$ витков кабеля ПВ-3 1x120 в ПВХ изоляции (площадь поперечного сечения токопроводящего проводника 120 mm^2).

Полярность токов в обмотках задается до начала экспериментов и может быть изменена в промежутках между импульсами. В стандартной схеме экспериментов седловые обмотки в противоположных октантах соединены в противофазе для генерации максимальной амплитуды тороидальных гармоник $n = 1$. Четыре пары обмоток включаются независимо в течение импульса токамака.

Расчет амплитуды магнитных полей, генерируемых седловыми обмотками, проводился по методу конечных разностных элементов уравнений электростатики и магнитостатики с учетом конструктивных особенностей токамака Т-10 [20] на основе уравнения Био–Савара–Лапласа с учетом наложенных граничных условий. Результаты расчета магнитных полей, создаваемых седловыми обмотками на токамаке Т-10, приведены на рис. 2. Седловые обмотки представлялись в виде прямоугольных рамок, расположенных в заданных из эксперимента угловых и радиальных позициях. Амплитуда тороидальных и полоидальных гармоник определялась путем разложения в ряд Фурье расчетных магнитных полей на резонансной магнитной поверхности $q = 2$ (рис. 2, *d*). Следует отметить, что наличие магнитопровода токамака Т-10 искажает магнитное поле, создаваемое обмотками, и немного усиливает его по сравнению с расчетами без магнитопровода.

Представление резонансных обмоток при расчете магнитных полей в виде линейных проводников является упрощенной моделью. В экспериментах на токамаке Т-10 используются витки прямоугольной формы с закруглениями по углам (рис. 1). Изменение магнитного поля при относительно небольших отклонениях прямоугольных обмоток с закругленными углами от прямоугольных рамок в токамаке Т-10 не превышает 2% и существенно не искажает амплитуды низших гармоник $m < 3$.

Амплитуда резонансных магнитных полей измерялась в экспериментах на токамаке Т-10 с помощью системы из 24 магнитных зондов. Магнитные зонды располагались равномерно по полоидальному обходу тора в тонкостенной металлической трубке, расположенной на стенке вакуумной камеры (малый радиус $r_p = 0.4$ m). Амплитуда полоидальной компоненты внешних резонансных магнитных полей при включении внешних полей показана на рис. 3. Магнитные зонды имеют одинаковую ориентацию вдоль оси трубки. Это приводит к тому, что, например, верхний и нижний зонды (см. MM7 и MM19 на рис. 3) имеют противоположную ориентацию в системе координат, связанной с токамаком Т-10. Максимальная амплитуда внешнего полоидального магнитного поля на границе вакуумной камеры ($R = 1.5$ m, $a_p = 0.4$ m, $\vartheta = \pm\pi/2$) при токах в седловых обмотках $I_{SC} = 1250$ A достигает $B_p = 6-7$ mT, что оказывается близким к расчетным значениям.

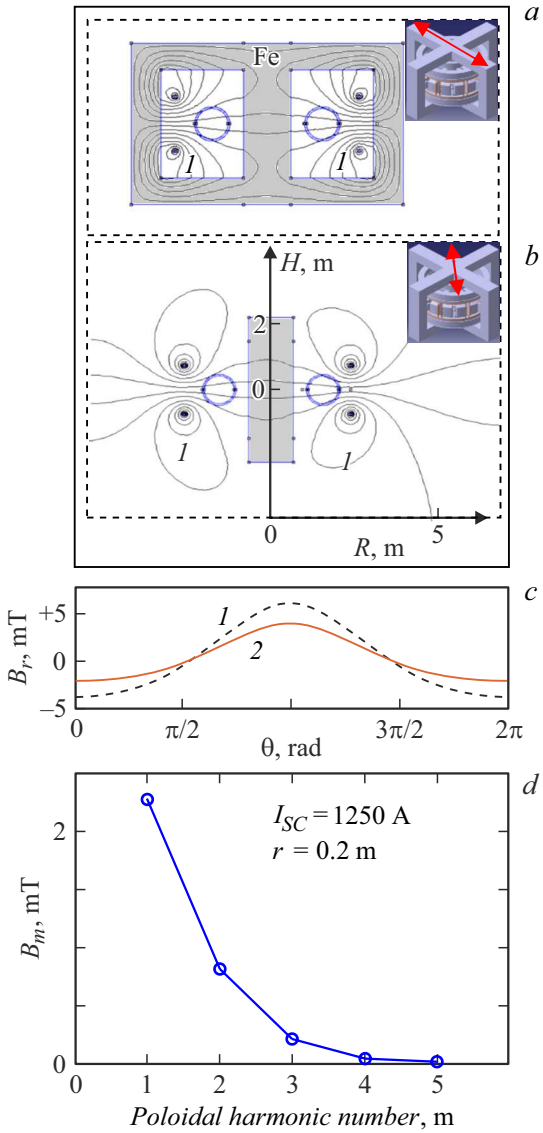


Рис. 2. Результаты расчета стационарных магнитных полей, создаваемых двумя седловыми обмотками (*1*), расположенными в противоположных октантах токамака Т-10 (ток в обмотках $I_{SC} = 1250$ A) в сечениях под сердечником магнитопровода (*a*) и в промежуточных сечениях (*b*). Показано расположение секции магнитопровода Т-10 (серый прямоугольник — Fe) и вакуумной камеры с кожухом (*3*); *c* — амплитуда радиального магнитного поля на магнитной поверхности с малым радиусом $r = 20$ cm ($R_0 = 1.5$ m) с учетом (*1*) и без учета магнитопровода (*2*), θ — полоидальный угол; *d* — амплитуда полоидальных гармоник магнитного поля, создаваемых восьмью обмотками, включенными для создания пространственной структуры с тороидальной гармоникой $n = 1$, рассчитанной на магнитной поверхности с малым радиусом $r = 20$ cm ($R_0 = 1.5$ m).

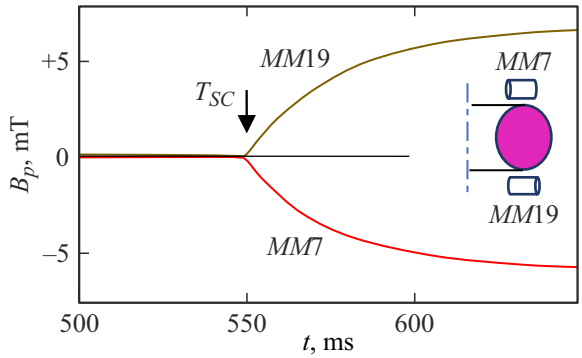


Рис. 3. Временна́я эволюция амплитуды внешнего магнитного поля при включении токов в седловых обмотках ($T_{SC} = 550$ ms, ток в обмотках $I_{SC} = 1250$ A), измеренная с помощью полоидальных магнитных зондов, расположенных на границе вакуумной камеры сверху и снизу относительно экваториальной плоскости тора (ММ7 — $\vartheta \approx 90°$, ММ19 — $\vartheta \approx 270°$).

Быстродействие внешних резонансных полей зависит от скорости нарастания токов в седловых обмотках и от времени проникновения магнитных полей внутрь вакуумной камеры токамака. Ввиду того что обмотки расположены вне вакуумной камеры токамака и экранированы проводящими конструкциями, включая, в первую очередь, проводящий медный кожух (с толщиной стенки 5 cm), осциллирующие внешние магнитные поля внутри вакуумной камеры будут значительно ослаблены. Экранирующие конструкции приводят также к задержке проникновения внешних полей внутрь вакуумной камеры при включении токов в седловых обмотках. Это ограничивает возможности использования внешних обмоток для генерации быстропеременных магнитных возмущений. Расчеты показывают, что постоянная времени камеры токамака Т-10 ($\tau_w = 3$ ms) намного больше характерных времен нарастания тока в обмотках, определяемых индуктивностью ($L_{SC} = 490\,\mu$H) и сопротивлением ($R_{SC} = 11$ MΩ): $\tau_{SC} = L_{SC}/R_{SC} \approx 44\,\mu$s).

В экспериментах на токамаке Т-10 время нарастания магнитных полей внутри вакуумной камеры определяется быстродействием тиристорных преобразователей. Типичная временная эволюция сигнала магнитного зонда, расположенного внутри вакуумной камеры на внешней стороне тора вблизи экваториальной плоскости, при включении токов в обмотках показана на рис. 3. Включению токов в обмотках ($t = 560$ ms) соответствует увеличение полоидального магнитного поля с характерным временем нарастания $dt \sim 35-40$ ms.

Относительно длительное время нарастания амплитуды магнитных полей, генерируемых обмотками, определяется конструкцией блоков тиристорных преобразователей VDU-1250, работающих по схеме инверторных преобразователей, рассчитанных на поддержание стабильного выходного тока с жесткой внешней характеристикой.

На первой стадии экспериментов на токамаке Т-10 для генерации внешних магнитных полей были оборудованы „стохастизирующие“ обмотки. „Стохастизирующие“ обмотки располагались попарно в восьми сечениях по обходу тора, симметрично относительно экваториальной плоскости тора (рис. 4). Каждая обмот-

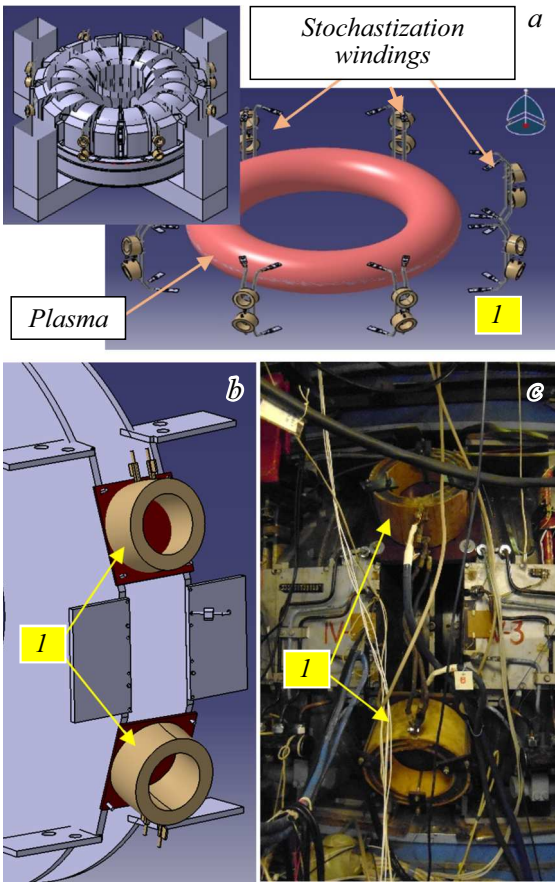


Рис. 4. Схематичное изображение внешних „стохастизирующих“ обмоток (*1*) (*a, b*) и *c* — фотография двух „стохастизирующих“ обмоток на установке токамак Т-10.

ка состоит из $N_{\text{turn}} = 20$ витков медного проводника (сечение 12×12 mm с внутренним каналом водяного охлаждения $d \sim 5$ mm), намотанного в виде катушки диаметром $D \sim 28.5$ cm.

Расчеты показывают, что при максимальных токах в таких катушках (плотность тока до 100 A/mm^2 в импульсе до 100 ms) радиальное магнитное поле от одной катушки в экваториальной плоскости на поверхности с радиусом $R = 1.75$ m составляет 1.2 mT. Включение обмоток попарно в противофазе (полярность соединения можно менять для создания магнитных полей различной конфигурации) должно создавать знакопеременные „стохастизирующие“ магнитные поля в периферийных областях плазмы на внешнем обводе тора (тороидальное и полоидальные гармоники до $n = 7$, $m = 7$). К сожалению, тиристорные преобразователи VDU-1250, используемые в экспериментах на Т-10, обеспечивают токи в стохастизирующих обмотках до 1250 A (10 A/mm^2), что на порядок ниже расчетных значений. В этих условиях включение „стохастизирующих“ обмоток не приводило к заметному воздействию на параметры плазмы в токамаке Т-10.

2. Система электропитания и управления обмоток резонансных магнитных полей на токамаке Т-10

Система электропитания обмоток для генерации резонансных магнитных полей на токамаке Т-10 основана на тиристорных преобразователях VDU-1250 (рис. 5, 6) с управлением на базе контроллеров Siemens S7 [21], объединяющих программируемые логические контроллеры, блоки гальванических изоляторов и датчики параметров системы управления. Источники электропитания обеспечивают формирование импульсов тока в седловых обмотках на основе программ, задаваемых оператором перед началом экспериментов.

Управляемые тиристорные преобразователи VDU-1250 расположены в отсеке под установкой Т-10. Источники питания построены на основе управляемых трехфазных тиристорных выпрямителей и обеспечивает номинальный выходной ток $I = 1250$ A при напряжении $V = 55$ V. Возможно также кратковременное увеличение тока до 1900 A. При этом максимальное выходное напря-

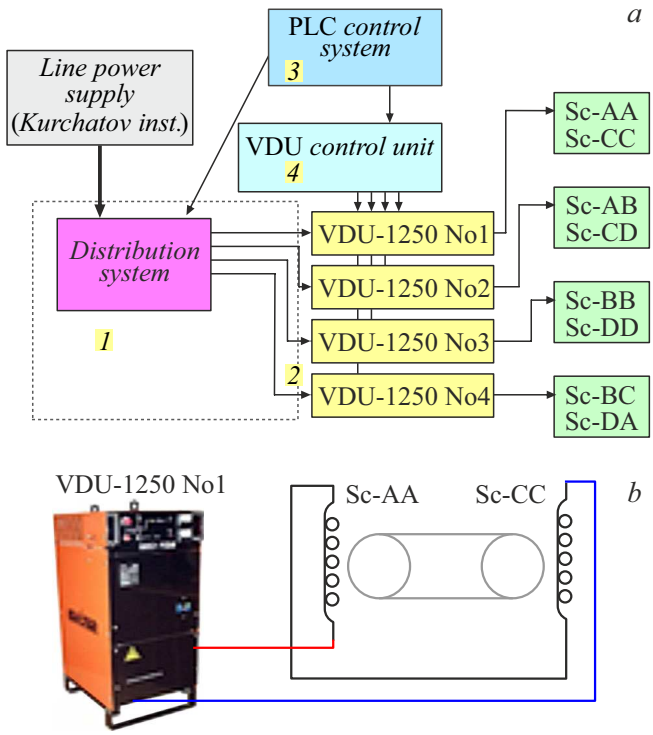


Рис. 5. *a* — схематическое изображение системы электропитания седловых обмоток на установке Т-10. Пунктиром обозначен модуль подключения к электросети (*1*) с системой блокировок и аварийного отключения. Режим работы тиристорных преобразователей VDU-1250 (*2*) задается системой управления на базе контроллера S7-417 (*3*) дистанционно с из пультовой токамака Т-10 и локально с пульта управления VDU-1250 (*4*); *b* — схема стандартного подключения седловых обмоток к тиристорным преобразователям VDU-1250. Обмотки в противоположных октантах включены в противофазе (см. Sc-AA и Sc-CC на рис. 1).

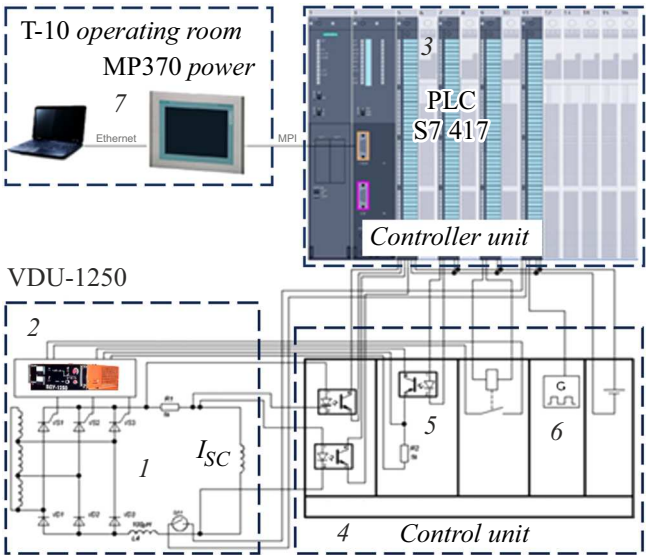


Рис. 6. Принципиальная схема управления источниками питания системы генерации резонансных магнитных полей. Токи в обмотках (I_{SC}) задаются управляющими сигналами платы управления VDU-1250 (*1*) на основе локальных управляющих сигналов с пульта управления VDU-1250 (*2*) или дистанционно, на основе команд контроллера S7-417 (*3*). Блок управления (*4*) обеспечивает согласование входных и выходных сигналов блока контроллера и VDU-1250 на основе модулей оптических изолирующих усилителей (*5*) и внешнего тактового генератора (*6*). Управление контроллером S7-417 осуществляется дистанционно с помощью мобильной панели оператора MP370 (*7*), расположенной в стойке управления в пультовой токамака Т-10.

жение с подключенной нагрузкой составляет $V = 44$ V. Преобразователи VDU-1250 имеют возможность дистанционного управления, обеспечивающего включение и выключение источника питания в заданные моменты времени, а также позволяющего производить регулировку выходного напряжения. Блоки управления VDU-1250 также обеспечивают возможность измерения основных параметров электрической цепи (выходное напряжение, ток, логический датчик тока).

В экспериментах на токамаке Т-10 используются четыре источника питания суммарной мощностью до 300 kW. Подключение внешних обмоток к источникам осуществляется попарно, две противоположные относительно главной оси токамака обмотки соединяются последовательно так, чтобы генерируемое ими магнитное поле было направлено в одну сторону. Суммарное сопротивление цепи с учетом подводящих кабелей при таком типе подключения оказывается равным $R_{SC_Tot} = 30\,\mathrm{m\Omega}$, и максимально возможный ток в цепи может достигать $I_{SC_max} = 1260$ A, что соответствует номинальному току преобразователя.

Поскольку работа обмоток предполагается в импульсном режиме, допускается работа выпрямителя в режиме перегрузки. Для увеличения амплитуды магнитных полей возможно параллельное присоединение двух обмоток к каждому источнику питания. При этом максимальный ток через источник питания может достигать 2500 A при длительности импульса тока не более 2 s.

Система управления источниками питания на токамаке Т-10 построена на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) Siemens S7-417. Принципиальная схема системы управления источниками питания представлена на рис. 6. Система управления обеспечивает включение резонансных магнитных полей в стационарном и переменном режимах (частота до 10 Hz) в заданные оператором моменты времени независимо для четырех пар седловых обмоток. Управление осуществляется как в удаленном режиме из пультовой Т-10, так и непосредственно с помощью модулей панели управления преобразователей VDU-1250. Контроль работы системы осуществляется с помощью регистрации резонансных магнитных полей стандартными магнитными зондами установки Т-10 и петлевыми зондами, оборудованными для измерения квазистационарных радиальных магнитных полей. Система управления на базе контроллера S7-417 на токамаке Т-10 задает программу включения напряжения источниками питания в соответствии с заложенной программой и измерение основных параметров управления, включая выходное напряжение и ток в обмотках.

Контроллер S7-417, оборудованный на токамаке Т-10, представляет собой модульную систему управления, которая включает в себя крейт (UR1 монтажная стойка), блок контроллера и набор модулей ввода-вывода, объединенных между собой общей шиной питания и передачи данных. Питание системы управление обеспечивается блоком стабилизированного питания PS 407 ((5 V)/(20 A)).

Оптическая развязка в модулях S7 осуществлена на этапе цифровой передачи данных между модулями и внутренней шиной данных контроллера. Для исключения гальванической связи источников питания и системы управления предусмотрены специальные изолирующие цепи. Сигналы выходного напряжения и напряжения на токовом измерительном шунте, по которому определяется выходной ток, подаются на модуль оптического изолирующего усилителя KFKI с частотой преобразования сигнала 100 kHz. Модуль имеет коэффициент усиления $K_{gain} \sim 5$ и работает как в области положительных, так и отрицательных значений входного сигнала. С выхода этого модуля преобразованные сигналы подаются на модуль аналогового цифрового преобразователя (АЦП) контроллера Siemens SM 431. Датчик тока представляет собой герметичный контакт (геркон), замыкающийся при приложении магнитного поля и находящийся вблизи одной из выходных токовых шин. Параметры датчика и его расположение рассчитаны на замыкание при превышении значения тока в шине 100 A. Для данного датчика не требуется дополнительной гальванической развязки, его сигнал подается на модуль ввода дискретных сигналов SM 421.

Режим работы тиристорных преобразователей VDU-1250 задается с помощью встроенной платы управления, обеспечивающей подачу импульсов на затворы тиристоров в соответствии с управляющими сигналами и сигналами обратной связи токов и напряжения. Включение и выключение источника питания осуществляется путем замыкания управляющих контактов с помощью реле (сигнал с одной группы контактов осуществляет управление источником питания, сигнал со второй группы контактов передается в ПЛК). Изменение выходного напряжения производится путем изменения напряжения на входе платы управления в диапазоне $V_{\text{out}} \sim 0-15$ V. Для реализации гальванической развязки и согласования с модулем ЦАП SM 432 было применено схемное решение на основе оптопары 4N25.

Сбор и запись данных периферийных модулей в ПЛК осуществляется по сигналу синхронного импульса, источником которого может быть как внутренний таймер, так и внешний генератор, задаваемый синхроимпульсами токамака Т-10. Контроллеры S7-417 оснащены встроенными таймерами с периодом срабатывания не менее 10 ms, однако периферийные модули позволяют осуществлять сбор данных с более высокой частотой, поэтому для синхронизации используется дополнительный внешний высокостабильный генератор с регулируемой частотой, изменяемой в диапазоне 100 Hz–2 kHz. Запись данных осуществляется во внутреннюю память ПЛК. Там же хранятся служебные переменные.

Управление системой регулирования осуществляется с помощью мобильной панели оператора MP370, расположенной в стойке управления в пультовой токамака Т-10.

Данные панели MP370 и ПЛК синхронизированы с помощью интерфейса PROFIBUS. PROFIBUS является промышленным стандартом передачи данных и работает по принципу ведущий-ведомый (master-slave). Скорость передачи данных по сети 12 Mbit/s, длина линии передачи без повторителей на установке Т-10 $L \sim 100$ m. Перед очередным плазменным разрядом токамака Т-10 оператор с помощью панели определяет режим работы каждого из четырех источников питания, определяя в том числе количество циклов включения, время включения запуска, длительность импульсов и пауз работы. После подтверждения заданных режимов работы и предварительного просмотра соответствующих осциллограмм данные управления записываются в массивы параметров управления. После прихода запускового импульса ПЛК выдает управляющие сигналы в соответствии с данными в этих массивах. Запуск системы возможен как от запускающего сигнала токамака Т-10, так и в ручном режиме по команде оператора.

После окончания разряда и записи сигналов из периферийных модулей в блоки данных ПЛК передает все массивы данных на панель оператора для дальнейшего анализа. Запись в общую базу данных токамака Т-10 в ПК осуществляется по сети Ethernet с помощью скриптовых команд с возможностью последующей обработки и архивизации.

Для быстрого отключения электропитания рамочных обмоток при наступлении аварийной ситуации оборудован блок аварийного отключения. Блок инициирует размыкание контактора модуля подключения к электросети по команде оператора из пультовой Т-10 на основании показания датчиков тока и в случае несанкционированного доступа в отсек VDU-1250.

3. Результаты экспериментов с использованием седловых обмоток на токамаке Т-10

Эффект воздействия магнитных полей, генерируемых седловыми обмотками, на МГД устойчивость плазмы проявляется наиболее отчетливо в экспериментах на токамаке Т-10 в режимах с коэффициентом запаса устойчивости на границе плазменного шнура $q_a \approx 3$ (ток плазмы $I_p = 290$ kA, продольное магнитное поле $B_t = 2.4$ T). В этих условиях на стационарной стадии разряда наблюдается развитие МГД возмущений с полоидальными и тороидальными числами $m = 2$, $n = 1$, вращающиеся с частотой $f \sim 4-6$ kHz ($t = 300-600$ ms на рис. 7). При включении внешних резонансных магнитных полей в этом режиме разряда Т-10 происходит замедление частоты вращения МГД возмущений ($t > 670$ ms на рис. 7). Характерное время замедления МГД возмущений $\Delta f/\Delta t \sim 50$ kHz/s соответствует предсказаниям модельных расчетов [19,20]. Следует отметить немонотонный характер замедления МГД возмущений ($t \sim 680-800$ ms на рис. 7): при общей тенденции к уменьшению скорости вращения наблюдаются периодические резкие увеличения и уменьшения частоты вращения, что в целом согласуется с моделями дестабилизации тиринг-мод [5,8,12]. После полной остановки вращения („запирания“ моды) наблюдается резкий рост амплитуды МГД возмущений с последующим срывом плазменного разряда ($t > 815$ ms на рис. 7).

Эксперименты на токамаке Т-10 показали, что воздействие внешних полей на МГД устойчивость плазмы существенно зависит от пространственной ориентации внешнего резонансного магнитного поля. Этот эффект проявляется наиболее отчетливо при анализе скоростей вращения МГД возмущений. Временная эволюция частоты вращения МГД возмущений $m = 2$ в токамаке Т-10 при различных направлениях внешнего магнитного поля показана на рис. 8. Замедление вращения и эффект полной остановки („запирания“) МГД возмущений (при заданных пониженных токах в седловых обмотках, $I_{\text{SC}} = 640$ A) наблюдается только при одном выделенном направлении внешних магнитных полей (*1* на рис. 8).

Направление магнитного поля, при котором происходит заметное влияние на частоту вращения магнитных возмущений, имеет узкое пространственное распределение и соответствует направлению результирующего

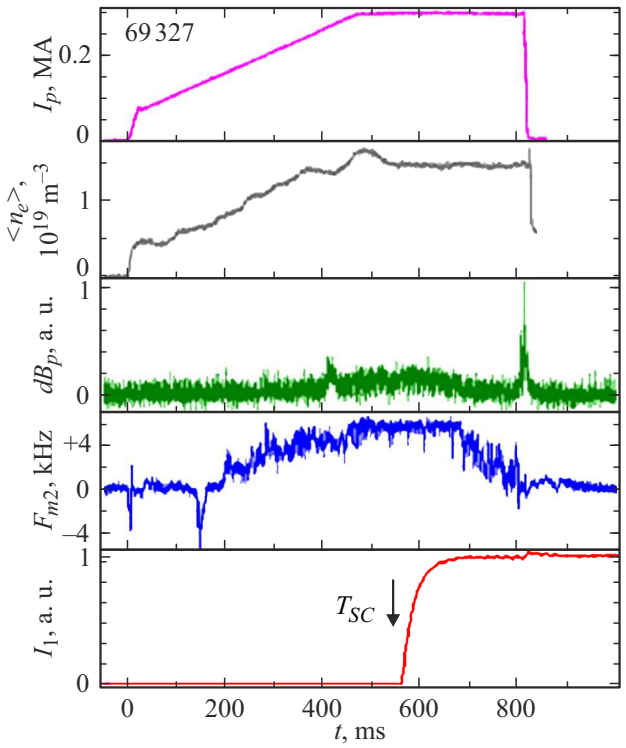


Рис. 7. Временна́я эволюция параметров плазмы в токамаке Т-10 при включении резонансных магнитных полей: Ip — ток плазмы; $\langle n_e \rangle$ — электронная плотность; dBp — амплитуда возмущений полоидальных магнитных полей $m = 2$, $n = 1$; F_{m2} — частота вращения моды $m = 2$, $n = 1$; I_1 — ток в седловых обмотках.

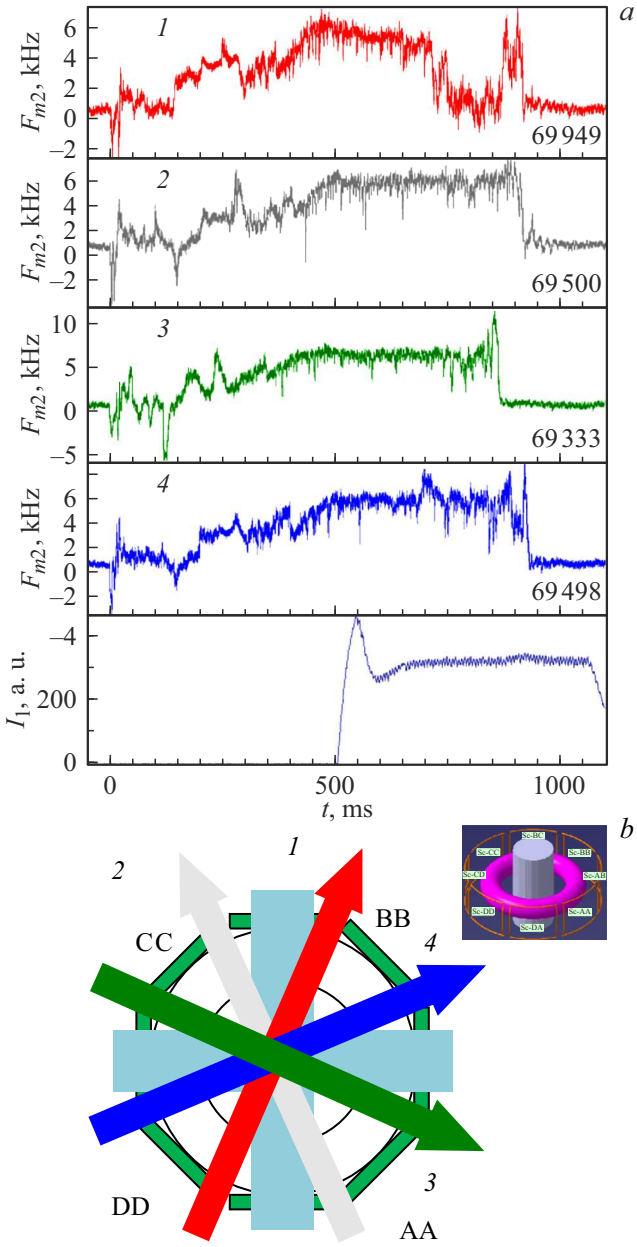


Рис. 8. *a* — временна́я эволюция частоты вращения МГД возмущений $m = 2$ (F_{m2}) в токамаке Т-10 при различных направлениях внешнего магнитного поля. Показан также ток в седловых обмотках (I_1); *b* — схематичное изображение плазменного шнура и системы седловых обмоток в токамаке Т-10. Стрелками показано направление результирующих внешних магнитных полей, генерируемых седловыми обмотками в серии последовательных импульсов токамака Т-10. Цифры около осциллограмм соответствуют цифрам около стрелок направления внешнего магнитного поля.

магнитного поля между седловыми обмотками Sc-BB и Sc-BC. Это направление, по всей видимости, совпадает с направлением рассеянного магнитного поля токамака Т-10. Пороги остановки вращения МГД мод в токамаке Т-10 соответствуют амплитуде рассеянных полей $B_{\mathrm{err}} \approx 0.25$ mT. Следует отметить, что вблизи обмоток Sc-BB располагаются подводящие шинопроводы для питания системы катушек полоидальных и тороидальных магнитных полей токамака Т-10, а непосредственно вблизи обмоток Sc-BB и Sc-BC располагается шунт для регулировки полоидальных управляющих магнитных полей.

Заключение

Для управления МГД возмущениями плазмы на токамаке Т-10 разработана и оборудована система генерации резонансных магнитных полей, состоящая из восьми седловых обмоток, расположенных на внешней стороне тора симметрично относительно экваториальной плоскости. Система позволяет генерировать магнитные поля с резонансными гармониками $n = 1$, $m = 1{-}4$. Оборудованная система автоматизированного управления обеспечивает создание квазистационарных (длительностью до 2 s) и импульсных (частота до 10 Hz) внешних резонансных магнитных полей.

Анализ проведенных экспериментов показал следующие результаты:

— эффект замедления вращения МГД мод проявляется наиболее отчетливо в плазменных режимах при рас-

положении резонансной магнитной поверхности $q \approx 3$ вблизи границы плазмы;

— скорость торможения МГД возмущений нелинейно увеличивается при превышении порогового значения амплитуды внешних магнитных полей;

— эффект торможения МГД возмущений зависит от пространственной ориентации резонансных магнитных полей. Эффект торможения МГД возмущений проявляется наиболее отчетливо при совпадении направления внешних резонансных магнитных полей с рассеянными полями токамака Т-10.

Система управления резонансными обмотками Т-10 позволяет задавать токи в обмотках по заранее определенной программе. Учитывая нелинейный характер развития магнитных возмущений в плазме токамака, в дальнейшем необходимо разработать и использовать алгоритмы системы обратных связей с учетом динамических параметров системы управления [9,12].

В качестве датчиков МГД возмущений на установке Т-10 используются стандартные магнитные зонды [14,22]. Магнитные зонды обеспечивают измерение амплитуды и фазы магнитных возмущений, но оказываются также чувствительны к изменениям внешних магнитных полей. Это затрудняет их использование в системе управления с обратными связями. Для уменьшения паразитных сигналов в системе управления с обратными связями возможно использование диагностик, нечувствительных к переменным магнитным полям, таких, как диагностики рентгеновского и СВЧ излучения, а также излучения в видимой области.

Резонансные магнитные поля в токамаке Т-10 генерируются с помощью мультипольных обмоток, располагаемых вне вакуумной камеры токамака. Анализ предыдущих экспериментов показал, что для эффективного управления параметрами плазмы необходимо обеспечить расположение обмоток внутри вакуумной камеры в непосредственной близости от границы плазменного шнура. Такое расположение снизит эффект экранировки резонансных полей внутрикамерными элементами, включая защитные пластины первой стенки и лимитеры. Расположения обмоток внутри вакуумной камеры оказываются особенно важными при рассмотрении генерации переменных резонансных полей, используемых для стабилизации вращающихся МГД мод.

Благодарности

Авторы хотели бы выразить благодарность Н.А. Кирневой за стимулирующие обсуждения.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Государственного задания в части Приказа по НИЦ „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

[1] T.C. Hender, J.C. Wesley, J. Bialek, A. Bondeson, A.H. Boozer, R.J. Buttery, A. Garofalo, T.P. Goodman, R.S. Granetz, Y. Gribov, O. Gruber, M. Gryaznevich, G. Giruzzi, S. Günter, N. Hayashi, P. Helander, C.C. Hegna, D.F. Howel, D.A. Humphreys, G.T.A. Huysmans, A.W. Hyatt, A. Isayama, S.C. Jardin, Y. Kawano, A. Kellman, C. Kessel, H.R. Koslowski, R.J. La Haye, E. Lazzaro Y.Q. Liu, V. Lukash, J. Manickam, S. Medvedev, V. Mertens, S.V. Mirnov, Y. Nakamura, G. Navratil, M. Okabayashi, T. Ozeki, R. Paccagnella, G. Pautasso, F. Porcelli, V.D. Pustovitov, V. Riccardo1, M. Sato, O. Sauter, M.J. Schaffer, M. Shimada, P. Sonato, E.J. Strait, M. Sugihara, M. Takechi, A.D. Turnbull, E. Westerhof, D.G. Whyte, R. Yoshino, H. Zohm, and the ITPA MHD, Disruption and Magnetic Control Topical Group. Nucl. Fusion, **47**, S128 (2007). DOI: 10.1088/0029-5515/47/6/S03

[2] B.B. Kadomtsev. *Tokamak Plasma: A Complex Physical System, Plasma Physics Series* (IOP Publishing Ltd, 1992), p. 1–208.

[3] H. Zohm. *Magnetohydrodynamic stability of Tokamaks* (Weinheim: Wiley-VCH, 2015)

[4] M. Okabayashi, J. Bialek, M.S. Chance, M.S. Chu, E.D. Fredrickson, A.M. Garofalo, M. Gryaznevich, R.E. Hatcher, T.H. Jensen, L.C. Johnson, R.J. La Haye, E.A. Lazarus, M.A. Makowski, J. Manickam, G.A. Navratil, J.T. Scoville, E.J. Strait, A.D. Turnbull, M.L. Walker. DIII-D Team. Phys. Plasmas, **8**, 2071 (2001). DOI: 10.1063/1.1351823

[5] R. Fitzpatrick, A.Y. Aydemir. Nucl. Fusion, **36**, 11 (1996). DOI: 10.1088/0029-5515/36/1/I02

[6] T.E. Evans. Plasma Phys. Control. Fusion, **57**, 123001 (2015). DOI: 10.1088/0741-3335/57/12/123001

[7] T.H. Jensen, R. Fitzpatrick. Phys. Plasmas, **4**, 2997 (1997). DOI: 10.1063/1.872433

[8] P.H. Rutherford. Phys. Fluids, **16**, 1903 (1973). DOI: 10.1063/1.169423

[9] V.V. Arsenin, L.I. Artemenkov, N.V. Ivanov, A.M. Kakurin, L.I. Molotkov, A.N. Chudnovskii, N.N. Shvindt, Iu. Gvozdkov, M.Iu. Cherkashin. *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Innsbruck, 1978 (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1979)), v. 1, p. 233.

[10] A.W. Morris, T.C. Hender, J. Hugill, P.S. Haynes, P.C. Johnson, B. Lloyd, D.C. Robinson, C. Silvester, S. Arshad, G.M. Fishpool. Phys. Rev. Lett., **64**, 1254 (1990). DOI: 10.1103/PhysRevLett.64.1254

[11] S.V. Konovalov, A.B. Mikhailovskii, E.A. Kovalishen, F.F. Kamenets, T. Ozeki, M.S. Shirokov, T. Takizuka, V.S. Tsypin. Dokl. Phys., **49**, 405 (2004). DOI: 10.1134/1.1784852

[12] P.V. Savrukhin. J. Computer and System Sciences Intern., **39** (3), 354 (2000).

[13] R. Fitzpatrick. Nucl. Fusion, **33**, 1049 (1993). DOI: 10.1088/0029-5515/33/7/I08

[14] A.N. Chudnovskiy, Yu.V. Gvozdkov, N.V. Ivanov, A.M. Kakurin, A.A. Medvedev, I.I. Orlovskiy, Yu.D. Pavlov, V.V. Piterskiy, V.D. Pustovitov, M.B. Safonova. Nucl. Fusion, **43**, 681 (2003). DOI: 10.1088/0029-5515/43/8/307
[15] R.J. La Haye, R. Fitzpatrick, T.C. Hender, A.W. Morris, J.T. Scoville, T.N. Todd. Phys. Fluids B, **4**, 2098 (1992). DOI: 10.1063/1.860017
[16] N.V. Ivanov, A.M. Kakurin. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, **1**, 64 (2012). http://vant.iterru.ru/vant_2012_1/6.pdf
[17] P.V. Savrukhin. Plasma Physics Reports, **27** (9), 727 (2001). DOI: 10.1134/1.1401935
[18] Ю.В. Петров, М.И. Патров, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Е.А. Ламзин, Н.В. Сахаров, С.Е. Сычевский. Физика плазмы, **36** (6), 492 (2010).
[19] P.V. Savrukhin. Plasma Physics Reports, **26**, 633 (2000). DOI: 10.1134/1.1306992
[20] Е.А. Шестаков. *Управление пучками ускоренных электронов и МГД возмущениями с помощью СВЧ нагрева и резонансных магнитных полей в плазме токамака Т-10.* (Дисс. М., 2019)
[21] E.A. Shestakov, P.V. Savrukhin, M.I. Ershova. J. Phys.: Conf. Ser., **1094**, 012005 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1094/1/012005
[22] P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov. Phys. Plasmas, **26**, 092505 (2019). DOI: 10.1063/1.5102112