

УДК 533.9:621.039.61

СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ВНЕШНИХ РЕЗОНАНСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
НА ТОКАМАКЕ Т-15МДП.В. Саврухин^{1,2}, Е.А. Шестаков¹, В.И. Тепикин^{1,2}¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Рассматриваются требования к системам генерации резонансных магнитных полей на установках токамак для управления магнитогидродинамическими (МГД) возмущениями плазмы, стабилизации граничных локализованных мод (ЭЛМ-колебаний) и подавления пучков ускоренных электронов. Анализируется предварительный проект системы генерации внешних резонансных магнитных полей на токамаке Т-15МД. Проект основан на системе из 48 мультипольных обмоток, расположенных внутри вакуумной камеры на внешней стороне тора (16 центральных обмоток вблизи экваториальной плоскости, 16 обмоток в верхнем конусе, 16 обмоток в нижнем конусе) для создания резонансных магнитных полей с полоидальными и тороидальными гармониками $m = 1—8$, $n = 1—4$.

Ключевые слова: токамак, резонансные магнитные поля, магнитогидродинамические возмущения плазмы, стабилизация ЭЛМ-колебаний, мультипольные обмотки, программируемые логические контроллеры.

GENERATION OF THE RESONANT MAGNETIC FIELDS
IN THE T-15MD TOKAMAKSP.V. Savrukhin^{1,2}, E.A. Shestakov¹, V.I. Tepikin^{1,2}¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²NRU «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

Requirements for generation of the resonant magnetic fields in tokamaks for controlling magnetohydrodynamic (MHD) plasma perturbations, stabilizing edge localized modes (ELM) and suppressing accelerated electron beams are considered. A preliminary design of a system for generating external resonant magnetic fields on the T-15MD tokamak is considered. The design is based on a system of 48 multipole coils located inside a vacuum vessel (16 windings around the equatorial plane; 16 windings in the upper cone; 16 windings in the lower cone) to create resonant magnetic fields with poloidal and toroidal harmonics $m = 1—8$, $n = 1—4$.

Key words: tokamak, resonant magnetic fields, magnetohydrodynamic plasma perturbations, ELM stabilization, multipole windings, programmable logic controllers.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-3-17-24

ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты на токамаках [1] направлены на поддержание стационарных плазменных режимов с улучшенным удержанием энергии $H_{98} \geq 1$, повышенными значениями давления $\beta_n \sim 3—4$, при средних значениях коэффициента запаса устойчивости $q_{95} \sim 3—3.5$. Здесь $\beta_n = \beta_t/(I_p/aB_t)$; $\beta_t = n_e(T_e + T_i)/(B_t^2/8\pi)$; I_p — ток плазмы; a — малый радиус плазменного шнура; B_t — продольное (тороидальное) магнитное поле; n_e — плотность плазмы; T_e , T_i — температуры электронного и ионного компонентов плазмы соответственно; $q = d\Psi_t/d\Psi_p$, Ψ_t , Ψ_p — потоки тороидального и азимутального (полоидального) магнитных полей через контур, связанный с заданной магнитной поверхностью; q_{95} — величина q на магнитной поверхности, охватывающей 95% полного потока Ψ_p ; H_{98} — параметр превышения энергетического времени жизни плазмы над скейлингом ITER89-P [2]. Одним из основных режимов работы токамака с улучшенным удержанием энергии является так называемый режим H-моды [3], характеризующийся формированием повышенных градиентов давления в периферийных областях плазмы (внешний транспортный барьер). К сожалению, режим H-моды сопровождается дестабилизацией граничных локализованных мод (ЭЛМ-колебания), приводящих к квазипериодическому резкому усилению потоков частиц и энергии в приграничной плазме. В частности, расчёты показывают, что развитие ЭЛМ-колебаний (тип I) в токамаке-реакторе ИТЭР могут привести к тепловым потокам $W_{ELM} \sim 10—30$ МДж/м² ($P_{ELM} \sim 1—10$ ГВт/м² в течение нескольких сотен мкс) в режиме с термоядерным горением плазмы ($I_p = 15$ МА, $B_t = 5,3$ Тл) [4, 5]. Такие нагрузки приводят к повышенной скорости эрозии обращённых к плазме компонентов дивертора и первой стенки (PFC-компоненты) и в ряде режимов могут снизить срок их службы до уровня, неприемлемого для экономически эффективной работы токамака-реактора.

Подавление ЭЛМ-колебаний возможно с применением резонансных магнитных возмущений (RMP-возмущений), генерируемых с помощью мультипольных обмоток, располагаемых внутри вакуумной камеры токамака. Впервые такой эффект был обнаружен на токамаке DIII-D [6, 7] и позднее подробно исследовался на многих установках, включая JET [8], MAST [9], ASDEX-Upgrade [10], KSTAR [11] и EAST [12]. Стабилизация ЭЛМ-возмущений связывается с уменьшением градиента давления в области транспортного барьера за счёт стохастизации магнитных полей в периферийных областях плазмы. Формирование стохастического слоя обеспечивалось в различных экспериментах с помощью внешних резонансных полей с тороидальной структурой $n = 2, 3$ (DIII-D [7]), $n = 2$ (ASDEX-Upgrade [10]), $n = 1, 2$ (KSTAR [11] и JET [8]), $n = 1, 2, 3$ (EAST [12]). Анализ экспериментов на токамаке MAST [13] показал, что стабилизация ЭЛМ-колебаний наблюдается при возмущениях внешней границы плазмы ($n = 3$), измеренных в различных точках по тороидальному обходу, порядка 5% от малого радиуса.

Для понимания физики управления ЭЛМ-колебаниями с помощью RMP-возмущений проведена обширная работа по теории и моделированию [13—18]. В частности, численные расчёты [15] на основе тороидального идеального МГД-кода и нелинейного двухжидкостного МГД-кода показали возможную связь стабилизации ЭЛМ-колебаний с формированием стохастизирующих магнитных островов при включении RMP-возмущений с тороидальным номером моды $n = 1—5$. Ограничение давления в области транспортного барьера у границы плазмы основано на предположении о связи ЭЛМ-колебаний с идеальными МГД-неустойчивостями (пилинг-баллонные моды $3 < n < 20$), вызываемыми большими градиентами давления и соответствующим бутстреп-током [1, 17]. Устойчивость пилинг-баллонных мод, зависящая от формы плазмы, может контролироваться с помощью нормального смещения поверхности плазмы, вызванного RMP-возмущениями [14].

Дополнительным ограничением стационарных плазменных режимов является развитие МГД-неустойчивостей, приводящих к насыщению β_i (отношение давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля), а в ряде случаев и к срыву плазмы [1]. Срывы при высоком β_i происходят за времена $dt \sim 10—100$ мкс и представляют серьёзную проблему для токамака-реактора. Как правило, срывы при высоком β_i связываются с идеальными винтовыми модами, развивающимися вблизи границы плазменного шнура. Стабилизация внешних винтовых мод может быть достигнута при расположении идеально проводящей стенки рядом с границей плазменного шнура. Такая идеальная стенка изменяет граничные условия МГД-возмущений и уменьшает инкременты развития неустойчивости. В реальных экспериментах внутрикамерные проводящие конструкции имеют конечную проводимость и не охватывают всю поверхность плазмы. В этих условиях вращение и нарастание винтовых мод рассматриваются с учётом конечной проводимости стенки (моды с резистивной стенкой RWM-моды) и устойчивость плазмы поддерживается за счёт медленно вращающихся внешних резонансных полей [1, 19, 20]. В отличие от подавления ЭЛМ-колебаний стабилизация RWM-мод требует задания переменных токов во внешних мультипольных RMP-обмотках (характерные частоты $f \sim 1—200$ Гц). При этом амплитуда и фаза токов определяются системой обратных связей на основе измерений электромагнитных возмущений плазмы.

Резистивные МГД-возмущения (тиринг-моды) формируют магнитные острова вблизи резонансных поверхностей внутри плазмы. Рост магнитных островов может привести к остановке вращения МГД-возмущений и к срыву плазмы при более низком уровне β , чем предел, налагаемый внешними модами. При низких значениях β стабильность 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. Стабилизация тиринг-мод подробно изучена теоретически [21] и продемонстрирована в экспериментах с использованием внешних резонансных полей в режиме обратных связей на нескольких токамаках [22, 23].

Ещё одним применением RMP-обмоток является коррекция рассеянных магнитных полей токамака, неизбежно возникающих из-за неточности сборки магнитной системы, неоднородного расположения тоководов и систем дополнительного нагрева плазмы [1], а также нелинейного взаимодействия (зацепления) внутренних винтовых возмущений [24]. Компенсация рассеянных полей оказывается особенно важной при работе в режимах с низкой плотностью на начальной стадии дополнительного нагрева с использованием инжекции нейтральных частиц [25]. Численное моделирование также показывает, что наличие резонансных магнитных возмущений усиливает радиальный перенос пролётных частиц (ионов с

энергией 3 и 18 кэВ) в области магнитных островов и присепаратрисной эргодичности магнитных силовых линий [26].

Одним из дополнительных препятствий для надёжной работы токамака является развитие пучков ускоренных электронов, как правило формирующихся на начальной стадии срыва плазмы [1]. Предыдущие эксперименты на токамаках JT-60 [27] и TEXTOR [28] показали возможность использования резонансных магнитных полей для предотвращения развития пучков ускоренных электронов.

В настоящей работе рассматривается предварительный проект системы генерации внешних резонансных магнитных полей на установке Т-15МД. Проект основан на системе мультиполюсных обмоток, располагаемых внутри вакуумной камеры Т-15МД. На примере системы генерации внешних резонансных магнитных полей, оборудованной ранее на установке Т-10 [29, 30], рассматриваются требования к системам управления и электропитания обмоток генерации внешних магнитных полей.

СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

На токамаке Т-15МД планируется оборудовать систему внутренних мультиполюсных обмоток для генерации резонансных магнитных полей [31, 32]. Система предназначена для проведения широкого спектра экспериментов, включая:

- управление МГД-возмущениями плазмы;
- стабилизацию ЭЛМ-колебаний;
- подавление пучков ускоренных электронов;
- коррекцию рассеянных магнитных полей;
- воздействие на динамические транспортные процессы в периферийной плазме, включая формирование внешнего транспортного барьера, управление вращением плазмы и оптимизацию взаимодействия плазма—стенка.

На основе анализа существующих и разрабатываемых аналогов [10, 19, 33, 34] в качестве предварительного варианта рассматривается конфигурация магнитной системы, состоящая из 48 обмоток: 16 центральных обмоток вблизи экваториальной плоскости, 16 обмоток в верхнем конусе, 16 обмоток в нижнем конусе. Схематическое расположение обмоток внутри вакуумной камеры Т-15МД показано на рис. 1.

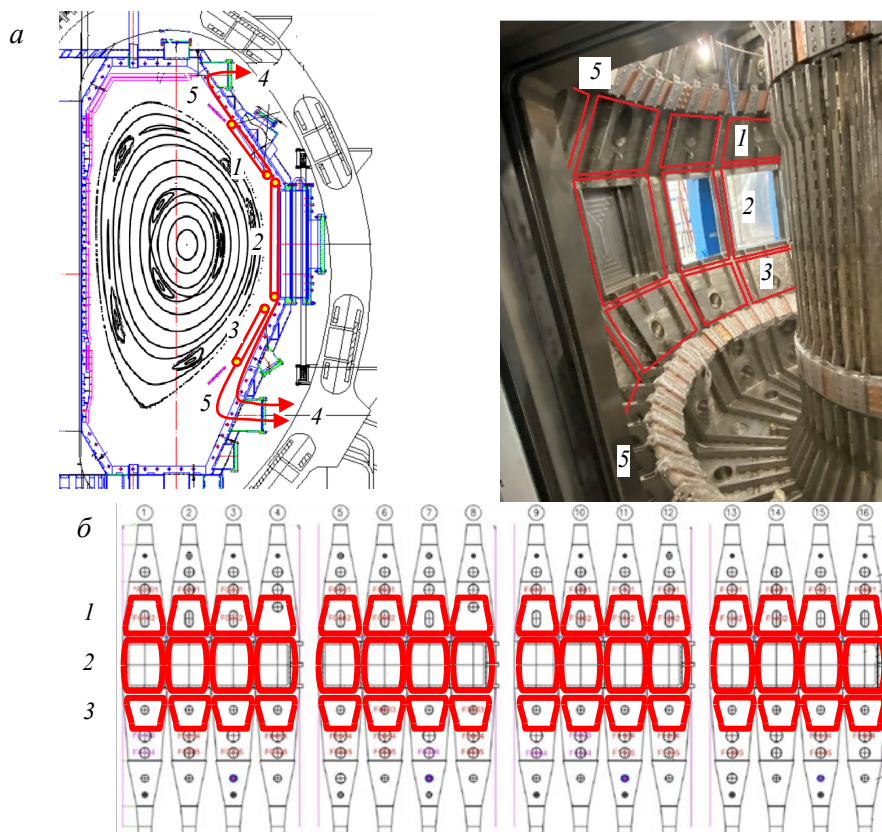


Рис. 1. Схематическое размещение мультиполюсных обмоток на токамаке Т-15МД. Система состоит из 48 обмоток: 16 обмоток в верхнем конусе 1, 16 центральных обмоток вблизи экваториальной плоскости 2, 16 обмоток в нижнем конусе 3. Схематическое расположение тоководов обмоток 4 (а), также показаны обмотки пассивной стабилизации вертикальной устойчивости плазмы Т-15МД 5 (б)

Мультипольные обмотки изготавливаются из медного кабеля с минеральной изоляцией в металлической оболочке (типа КМЖ) и закрепляются на внутренних элементах вакуумной камеры, непосредственно под облицовкой из графитовых плиток (сечение токопроводящей медной шины не менее 120 мм²). Максимальный ток в обмотках до 7 кА при длительности импульса до 5 с. Для стабилизации вращающихся винтовых возмущений плазмы (тиринг-моды и RWM-моды) предполагается обеспечить подключение источников питания с частотой до 0,4 кГц и током до 5,5 кА.

В зависимости от программы экспериментов разрабатываемая конфигурация обмоток позволяет создавать магнитные поля с полоидальными и тороидальными гармониками $m = 1—8$, $n = 1—4$ (15). На рис. 2 показаны результаты расчётов полоидальных полей от трёх мультипольных обмоток, расположенных в одном тороидальном сечении токамака. Максимальная амплитуда гармоники $m = 1$ достигается при одинаковом направлении токов ($I = 7$ кА) во всех трёх обмотках (рис. 2, а, б). Максимальная амплитуда гармоники $m = 2$ достигается при противоположном направлении тока в центральной обмотке по отношению к верхним и нижним обмоткам (см. рис. 2, е). Изменяя полярность и амплитуду токов в обмотках, возможно исключить гармоники $m = 2$ или $m = 1$ (см. рис. 2, в и рис. 2, д соответственно), а также получить широкий спектр гармоник $m = 1—8$ (см. рис. 2, з).

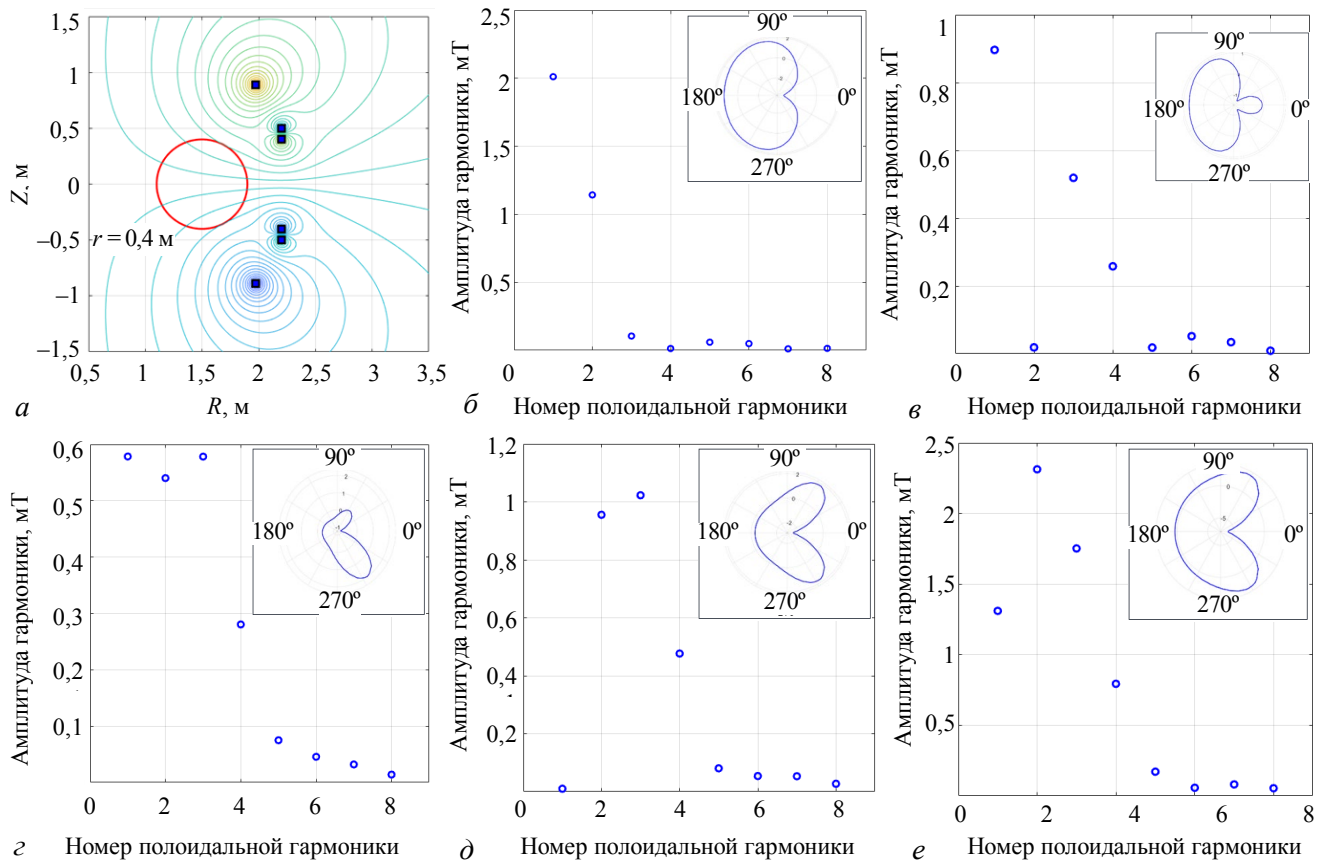


Рис. 2. Результаты расчёта магнитных полей, создаваемых мультипольными обмотками на токамаке Т-15МД (а). В расчётах рассматривались три одновитковые обмотки, расположенные в одном тороидальном сечении токамака (б)—(е); амплитуда полоидальных гармоник магнитных полей, создаваемых при различной полярности и амплитуде токов в верхних (I_{up}), экваториальных (I_{eq}) и нижних (I_{down}) обмотках на поверхности с малым и большим радиусом $r = 0,4$ м и $R = 1,5$ м соответственно (см. красную окружность): $I_{up} = 7$, $I_{eq} = 7$, $I_{down} = 7$ кА (а, б); $I_{up} = 7$, $I_{eq} = 2,4$, $I_{down} = 7$ кА (в); $I_{up} = -2,8$, $I_{eq} = 0$, $I_{down} = -7$ кА (г); $I_{up} = -7$, $I_{eq} = 1,5$, $I_{down} = -7$ кА (е); $I_{up} = -7$, $I_{eq} = 7$, $I_{down} = -7$ кА (д). Положительные значения токов соответствуют направлению магнитного поля к центру плазменного шнура

Следует отметить, что на рис. 2 показаны результаты расчётов магнитных полей на поверхности с малым и большим радиусом $r = 0,4$ м и $R = 1,5$ м соответственно. Выбор этой поверхности соответствует расположению магнитной поверхности $q = 2$ в типичных условиях экспериментов на токамаке Т-15МД. Расчёты магнитных полей вблизи мультипольных обмоток показывают значительное увеличение амплитуды гармоник с относительно высокими $m > 3—4$.

Размеры мультипольных обмоток, показанных на рис. 1, ограничены сверху и снизу расположением обмоток пассивной стабилизации вертикальной устойчивости. Размер в тороидальном направлении определяется экваториальными патрубками токамака и узкими вертикальными рёбрами жёсткости. Ограниченное пространство между патрубками позволяет закрепить в центральных обмотках не более одного витка кабеля с током 5,5—7 кА. В верхних и нижних обмотках возможно оборудование до четырёх витков кабеля с таким током. Результаты расчёта гармоник резонансных магнитных полей в конфигурации с многовитковыми обмотками показаны на рис. 3 ($I_{up} = -28$ кА·виток, $I_{eq} = 7$ кА·виток, $I_{down} = -28$ кА·виток). На рис. 3 также показаны результаты расчёта гармоник при использовании только двух многовитковых обмоток: верхней ($I_{up} = -28$ кА·виток) и нижней ($I_{down} = -28$ кА·виток).

Оборудование 16 обмоток в тороидальном направлении обеспечивает принципиальную возможность генерировать винтовые гармоники с тороидальными числами до $n = 15$. В предыдущих экспериментах показано, что наибольшую опасность представляют возмущения плазмы с относительно небольшими тороидальными числами $n = 1—4$. Выбор таких тороидальных гармоник планируется использовать в экспериментах на токамаке Т-15МД (рис. 4).

Одним из основных препятствий для устойчивой работы токамака в режимах с высокими значениями β является развитие RWM-мод [1]. Стабилизация RWM-моды может быть обеспечена при использовании «интегрированной» схемы включения мультипольных обмоток [19, 35]. В этом режиме развитие RWM-моды подавляется системой обратной связи, компенсирующей вихревые токи, наведённые в резонансных обмотках. Последовательное включение токов в квадрупольных обмотках в соответствии с вращением RWM-моды задаёт режим «интегрированной обложки» для стабилизации режима резистивной стенки. Изображение «интегрированной» схемы включения мультипольных обмоток для стабилизации RWM-мод в токамаке Т-15МД схематически показано на рис. 5. На рисунке показаны активные мультипольные обмотки, используемые для компенсации вихревых токов при вращении магнитных возмущений в заданный момент времени.

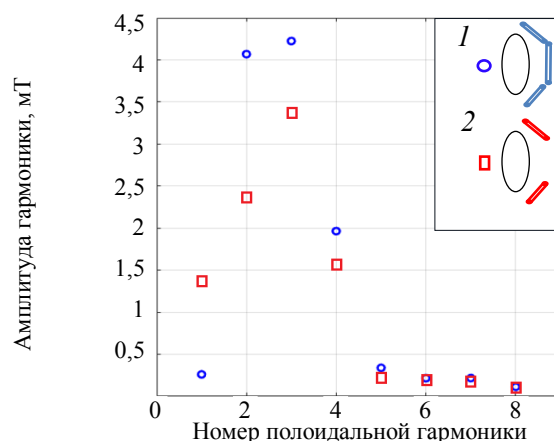


Рис. 3. Амплитуда полоидальных гармоник магнитных полей, создаваемых мультипольными обмотками на поверхности с малым и большим радиусом $r = 0,4$ м и $R = 1,5$ м соответственно. В расчётах рассматривались три 1 и две 2 обмотки, расположенные в одном тороидальном сечении токамака с токами $I_{up} = -28$ кА·виток, $I_{eq} = 7$ кА·виток, $I_{down} = -28$ кА·виток (окружности) 1 и $I_{up} = -28$ кА·виток, $I_{down} = -28$ кА·виток (квадраты) 2 соответственно

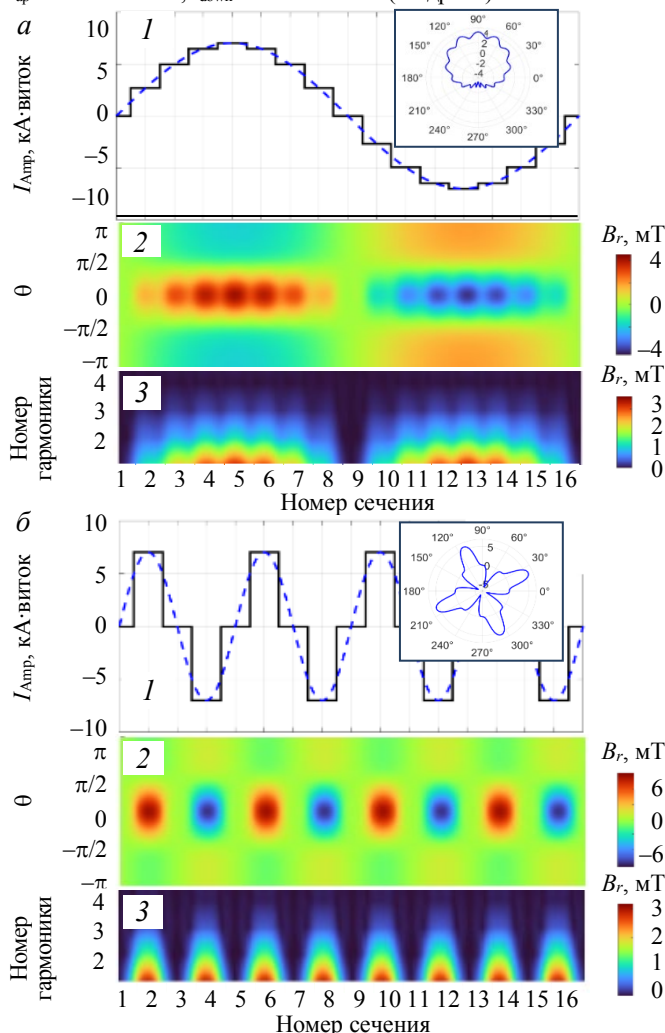


Рис. 4. Результаты расчёта магнитных полей, создаваемых мультипольными обмотками на токамаке Т-15МД в режиме с тороидальной гармоникой $n = 1$ (а) и $n = 4$ (б). В каждом тороидальном сечении рассматривались три одновитковые обмотки с одинаковой полярностью и амплитудой токов (максимальные токи $I_{up} = 7$ кА, $I_{eq} = 7$ кА, $I_{down} = 7$ кА). Показано изменение токов в обмотках, расположенных в различных тороидальных сечениях 1, а также двумерное распределение радиальных магнитных полей 2 и амплитуды полоидальных гармоник 3 по полоидальному и тороидальному обходу тора на поверхности с малым и большим радиусом $r = 0,4$ м и $R = 1,5$ м соответственно

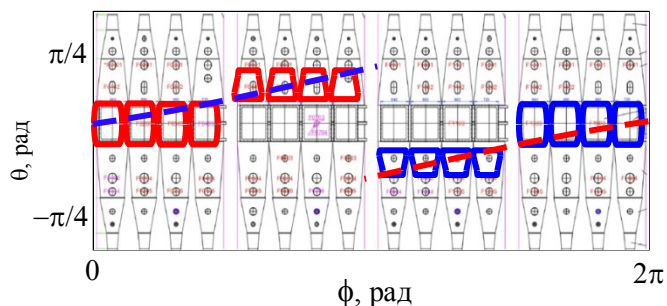


Рис. 5. Схематическое изображение «интегрированной» схемы включения мультипольных обмоток для стабилизации RWM-мод. Показаны линии X и O магнитного острова $m = 2$, $n = 1$ (пунктирные линии), а также активные мультипольные обмотки, используемые для компенсации вихревых токов в заданный момент времени при вращении магнитных возмущений. Система электропитания подаёт напряжение на заданные обмотки в соответствии с вращением RWM-моды

мультипольных обмоток. На первом этапе для стабилизации RWM-мод предполагается использовать 16 независимых источников питания, подающих напряжение на заданные мультипольные обмотки в соответствии с вращением магнитных возмущений. Учитывая индуктивность и сопротивление четырёх витковых мультипольных обмоток ($L_{mc} \sim 22$ мкГн, $R_{mc} \sim 2$ мОм соответственно) и коммутирующих шинопроводов, источники питания должны обеспечивать напряжение до $U_{mc} \sim 35$ В с суммарной мощностью до $P_{mc} \sim 4$ МВА.

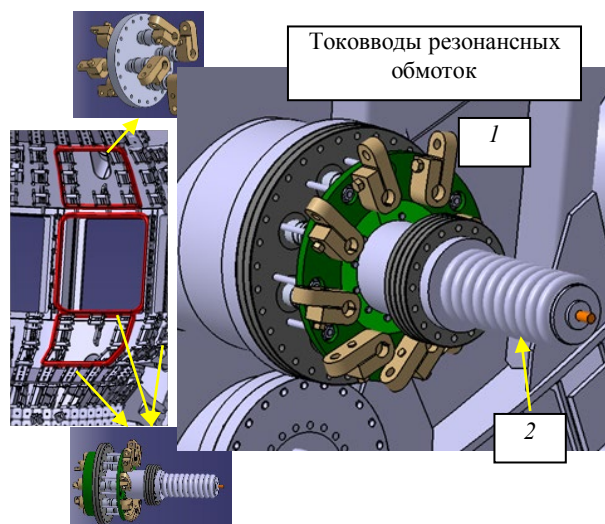


Рис. 6. Схематическое расположение тоководов 1 мультипольных обмоток резонансных магнитных полей Т-15МД. Также показан высоковольтный ввод 2 в нижних нечётных патрубках ДУ-250

Для этого наряду с резонансными магнитными полями предполагается использовать подачу потенциала на внутрикамерные электроды [36, 37]. Предполагается оборудование дополнительных высоковольтных вводов (см. 2 на рис. 6) в восьми патрубках ДУ-250 в восьми сечениях токамака Т-15МД. Рассматривается возможность использования стандартных вводов с напряжением до 30 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резонансные магнитные поля активно используются в экспериментах на токамаках для проведения широкого спектра исследований по управлению МГД-возмущениями плазмы, включая тиринг- и RWM-моды, для подавления пучков ускоренных электронов и для стабилизации ЭЛМ-колебаний. Резонансные магнитные поля генерируются в токамаках с помощью мультипольных обмоток, располагаемых внутри и вне вакуумной камеры токамака [6]. Анализ предыдущих экспериментов показал, что для эффективно-

В экспериментах с высокими β на установке ВВХ-М [19] вихревые токи непосредственно перед тепловым срывом достигают 1—3 кА в плазменных разрядах с токами $I_p \sim 200$ —500 кА. Основываясь на этих результатах и масштабировании вихревых токов для режимов с более высоким током плазмы в Т-15МД ($I_p \sim 1$ —1,2 МА), можно задавать уровень компенсирующих токов в резонансных обмотках на уровне 6—7 кА, что оказывается близким к планируемым значениям токов в мультипольных обмотках.

Для эффективной работы системы генерации резонансных магнитных полей в различных плазменных режимах требуется использование независимых источников питания для каждой из 48

Для независимого электропитания каждой из обмоток предусматриваются токовводы в вакуумную камеру Т-15МД. В настоящее время рассматривается возможность расположения токовводов в восьми нижних патрубках ДУ-250 (восемь силовых вводов на патрубок) и в восьми верхних патрубках ДУ-160 (четыре силовых ввода на патрубок). Схематическое расположение токовводов показано на рис. 6. Рассматривается использование стандартных медных токовводов диаметром $d \sim 19,0$ мм (стационарный ток 0,8 кА, напряжение до 8 кВ DC).

Наряду с задачей управления ЭЛМ-колебаниями в экспериментах на токамаке Т-15МД рассматривается возможность воздействия на динамические транспортные процессы в периферийной плазме, включая формирование внешнего транспортного барьера и управление вращением плазмы.

го управления параметрами плазмы необходимо обеспечить расположение обмоток внутри вакуумной камеры, в непосредственной близости от границы плазменного шнура.

В качестве предварительного варианта системы обмоток в токамаке T-15МД рассмотрена конфигурация из 48 обмоток: 16 центральных обмоток вблизи экваториальной плоскости, 16 обмоток в верхнем конусе, 16 обмоток в нижнем конусе. Рассматриваемая конфигурация обмоток позволяет создавать магнитные поля с полоидальными и тороидальными гармониками $m = 1\text{—}8$, $n = 1\text{—}4$ (15) и обеспечивает возможность проведения широкого спектра экспериментов.

Следует отметить, что несмотря на то, что резонансные обмотки находятся внутри вакуумной камеры, необходимо проведение расчётов эффекта экранировки резонансных полей внутрикамерными элементами, включая защитные пластины первой стенки и обмотки пассивной стабилизации вертикальной устойчивости. Такие расчёты оказываются особенно важными при рассмотрении генерации переменных резонансных полей, используемых для стабилизации вращающихся МГД-мод.

Система управления резонансными обмотками T-15МД базируется на разработках токамака T-10 с использованием промышленных контроллеров высокого уровня [30]. В дополнение к системе непосредственного управления, используемой ранее, предусматривается разработка алгоритмов системы обратных связей с учётом нелинейного развития магнитных возмущений и динамических параметров системы управления [22, 38]. В качестве датчиков МГД-возмущений и ускоренных электронов в системе обратных связей на первой стадии экспериментов возможно использование стандартных магнитных зондов T-15МД [39]. В дальнейшем в системе управления с обратными связями необходимо использовать дополнительные магнитные зонды, расположенные вблизи каждой обмотки. Для уменьшения паразитных сигналов в системе управления с обратными связями планируется использовать диагностики, нечувствительные к переменным магнитным полям, такие как диагностики рентгеновского и СВЧ-излучения, а также излучения в видимой области, оборудованные на токамаке T-15МД.

Наряду с рассматриваемой системой генерации резонансных магнитных полей на основе внутрикамерных обмоток в токамаке T-15МД на первом этапе экспериментов возможно использовать обмотки ОГУП, расположенные вне вакуумной камеры на внешнем обводе тора симметрично относительно экваториальной плоскости [32]. Такие обмотки могут быть эффективно использованы для компенсации рассеянных магнитных полей T-15МД и для исследования порогов развития квазистационарных МГД-мод.

Разработка проекта системы генерации резонансных магнитных полей в токамаке T-15МД потребует проведения подробных теоретических и инженерно-технических расчётов с учётом различных плазменных режимов и конструкционных особенностей установки, включая расположение внутрикамерных элементов и защитных пластин первой стенки и дивертора, а также с учётом возможности расположения тоководов в патрубках T-15МД. Учитывая широкий комплекс диагностик плазмы и систем дополнительного нагрева T-15МД, наличие свободных патрубков для тоководов может оказаться ограничением для оборудования резонансных обмоток.

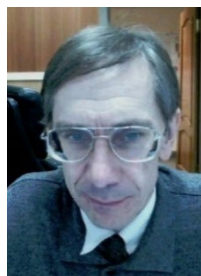
Авторы выражают благодарность В.П. Будаеву, А.В. Мельникову, Н.А. Кирневой за стимулирующие обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания в части приказа по НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hender T.C., Wesley J.C., Bialek J. et al. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. S128; doi: 10.1088/0029-5515/47/6/S03.
2. Yushmanov P.N., Takizuka T., Riedel K.S. et al. — Nucl. Fusion, 1990, vol. 30, p. 1999; doi:10.1088/0029-5515/30/10/001.
3. Wagner F., Becker G., Behringer K. et al. — Phys. Rev. Lett., 1982, vol. 49, p. 1408; https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1408.
4. Eich T., Sieglin B., Thornton A.J. et al. — Nuclear Materials and Energy, 2017, vol. 12, p. 84; https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.04.014.
5. Federici G., Loarte A., Strohmayer G. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2003, vol. 45(9), p. 1523; doi:10.1088/0741-3335/45/9/301.
6. Evans T.E., Moyer R.A., Thomas P.R. et al. — Phys. Rev. Lett., 2004, vol. 92, p. 235003; https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.235003.
7. Evans T.E. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2015, vol. 57, p. 123001; doi: 10.1088/0741-3335/57/12/123001.
8. Liang Y., Koslowski H.R., Thomas P.R. et al. — Phys. Rev. Lett., 2007, vol. 98, p. 265004; doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.265004.

9. Kirk A., Nardon E., Akers R. et al. — Nucl. Fusion, 2010, vol. 50, p. 034008; doi: 10.1088/0029-5515/50/3/034008.
10. Suttrop W., Gruber O., Günter S. et al. — Fusion Eng. and Des., 2009, vol. 84(2), p. 290; doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.044.
11. Jeon Y., Park M.J.-K., Yoon S.W. et al. — Phys. Rev. Lett., 2012, vol. 109, p. 03500; https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.035004.
12. Sun Y., Liang Y., Liu Y. Q. et al. — Phys. Rev. Lett., 2016, vol. 117, p. 115001; https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.115001.
13. Chapman I.T., Cooper W.A., Kirk A. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2012, vol. 54, p. 105013; doi: 10.1088/0741-3335/54/10/105013.
14. Li L., Liu Y.Q., Loarte A. et al. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, p. 096038; doi: 10.1088/1741-4326/ab2bca.
15. Hu Q.M., Park J.-K., Logan N.C. et al. — Nucl. Fusion, 2021, vol. 61, p. 106006; doi: 10.1088/1741-4326/ac1d85.
16. Bécoulet M., Huysmans G., Thomas P. et al. — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45, p. 1284; doi: 10.1088/0029-5515/45/11/009.
17. Медведев С.Ю., Мартынов А.А., Коновалов С.В. и др. — Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 998—1006; doi: 10.31857/S0367292121110226.
18. Loarte A., Huijsmans G., Futatani S. et al. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 033007; doi: 10.1088/0029-5515/54/3/033007.
19. Ancher C., Anderson H., Bernabei S. et al. Feedback Stabilization Initiative. Princeton Univ., Princeton Plasma Physics Lab., NJ United States, 1997, PPPL—3250 (Preprint).
20. Fitzpatrick R. — Phys. Plasmas, 2002, vol. 9, p. 3459; https://doi.org/10.1063/1.1491254.
21. Rutherford P.H. — Phys. Fluids, 1973, vol. 16, p. 1903; https://doi.org/10.1063/1.169423.
22. Arsenin V.V., Artemenkov L.I., Ivanov N.V. et al. — Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Innsbruck, 1978 (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1979), vol. 1, p. 233.
23. Morris A.W., Hender T.C., Hugill J. et al. — Phys. Rev. Letters, 1990, vol. 64, p. 1254; doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1254.
24. Kakurin A.M., Orlovskiy I.I. — Plasma Physics Reports, 2009, vol. 35, p. 93.
25. Savrukhin P.V. — Plasma Physics Reports, 2000, vol. 26, p. 633; https://doi.org/10.1134/1.1306992.
26. Подгупова О.И. — Физика плазмы, 2019, т. 45, № 7, с. 579; doi: 10.1134/S0367292119070102.
27. Yoshino R., Tokuda S. — Nucl. Fusion, 2000, vol. 40, p. 1293; doi: 10.1088/0029-5515/40/7/302.
28. Lehnen M., Bozhnikov S.A., Abdullaev S.S., Jakubowski M.W. (TEXTOR Team). — Phys. Rev. Lett., 2008, vol. 100, p. 255003; doi: 10.1103/PhysRevLett.100.255003.
29. Шестаков Е.А. Управление пучками ускоренных электронов и МГД-возмущениями с помощью СВЧ-нагрева и резонансных магнитных полей в плазме токамака Т-10. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2019.
30. Shestakov E.A., Savrukhin P.V., Ershova M.I. — J. Phys.: Conf. Ser., 2018, vol. 1094, p. 012005; https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012005.
31. Melnikov A.V., Sushkov A.V., Belov A.M. et al. — Fusion Eng. and Des., 2015, vol. 96, p. 306; http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.06.080.
32. Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N. et al. Current status of tokamak T-15MD. — Fusion Engineering and Design, 2021, vol. 164, 112211. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112211.
33. Anderson P.M., Baxi C.B., Kellman A.G., Reis E.E. — In: 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering. San Diego, CA, USA, 2003, p. 573; doi:10.1109/FUSION.2003.1426712.
34. Zatz Irving J., Baker R., Brooks A. et al. — Fusion Eng. and Des., 2011, vol. 86 (9—11), p. 1980; doi: 10.1016/j.fusengdes.2011.03.088.
35. Hatcher R., Okabayashi M. Integrated Shell Approach to Vertical Position Control on PBX-M. Princeton Univ., Princeton Plasma Physics Lab., NJ United States, 1995, PPPL—3089 (Preprint).
36. Kirnev G.S. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2003, vol. 45, p. 337; doi: 10.1088/0741-3335/45/4/302.
37. Savrukhin P.V., Shestakov E.A. — Phys. Plasmas, 2019, vol. 26, p. 092505; https://doi.org/10.1063/1.5102112.
38. Savrukhin P.V. — J. of Computer and System Sciences International, 2000, vol. 39, № 3, p. 354.
39. Sushkov A.V., Belov A.M., Igonkina G.B. et al. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T15MD tokamak. — Fusion Eng. and Des., 2019, № 12, p. 383; doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.073.

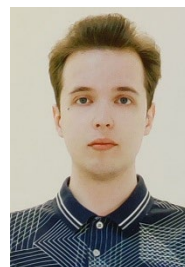


Savrukhin_PV-
@nrcki.ru

Петр Всеволодович Саврухин, в.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; профессор; НИУ МЭИ, 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, стр. 1, Россия



Евгений Андреевич Шестаков, старший научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Tepikin_VI-
@nrcki.ru

Виктор Игоревич Тепикин, лаборант-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; студент; НИУ МЭИ, 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, стр. 1, Россия

Статья поступила в редакцию 15 января 2024 г.

После доработки 16 марта 2024 г.

Принята к публикации 5 июля 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 3, с. 17—24.