

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 533.9.07

СИСТЕМА СОЗДАНИЯ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ-0

© 2022 г. С. А. Крат^а, *, А. С. Пришвицын^а, А. И. Алиева^а, Н. Е. Ефимов^а,
Е. А. Вилицкий^а, Д. Г. Булгадарян^а, Г. М. Воробьев^а, В. А. Курнаев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: stepan.krat@gmail.com

Поступила в редакцию 11.09.2021 г.

После доработки 01.10.2021 г.

Принята к публикации 04.10.2021 г.

Описывается система создания тороидального магнитного поля в токамаке МИФИСТ. Система представляет собой единый тороидальный соленоид, состоящий из 12 медных витков, изготовленных из медной полосы варьируемой ширины. Форма полоидального сечения выбрана на основе условия безмоментности. Распределение угла наклона витков в тороидальном направлении по их длине подобрано эмпирически путем численного моделирования исходя из условия минимизации рассеянных полей. Ожидаемая гофрировка магнитного поля на большом радиусе токамака составляет ~0.6%. Индуктивность соленоида и токоподводящих линий составляет ~37 мкГн, омическое сопротивление ~12 мОм. При поднятии тороидального поля наблюдалось создание напряжения на обходе ~3 В.

Ключевые слова: токамак, магнитное поле, электромагнитная система, COMSOL, магнитометрия

DOI: 10.56304/S2079562922010201

1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым элементом любого токамака является система тороидального магнитного поля (СТМП). Современные токамаки в большинстве своем имеют СТМП в виде отдельных одинаковых тороидальных катушек, каждая из которых имеет свое отдельное электрическое питание [1–3]. Недостатком данного решения является возникновение рассеянных полей от множества токоподводящих линий, а также необходимость создания сложных токоуравнивающих систем, соединяющих отдельные катушки.

Альтернативным подходом к реализации СТМП является ее исполнение в виде единого тороидального соленоида [4]. Использование такой системы позволяет свести к минимуму количество токоподводящих линий, избавиться от сложных и дорогих токоуравнивающих систем. Недостатком данного решения является неизбежное возникновение рассеянных полей из-за появления эффективного тороидального тока в соленоиде СТМП, требующие дополнительных расчетов формы витков соленоида для уменьшения рассеянных полей. Системы такого типа использовались на токамаках Гутта [5] и GLAST-III [6].

В данной работе описана СТМП учебно-демонстрационного токамака МИФИСТ-0 [7]. Описан процесс оптимизации СТМП, полученные с ее помощью импульсы магнитного поля и их особенности.

2. ГЕОМЕТРИЯ ВИТКОВ ТОРОИДАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА

При определении геометрии витков тороидального соленоида СТМП отдельно рассматривались два вопроса – форма полоидального сечения и распределение угла наклона витка в тороидальном направлении по длине витка.

Геометрия полоидального сечения определялась исходя из классического решения задачи Шафранова [8] по нахождению формы “безмоментных” тороидальных катушек, то есть катушек, форма полоидального сечения которых под действием сил тока, протекающих по ним, не будет деформироваться. Использовалось решение для так называемых s-катушек, то есть катушек, геометрия которых приближена к полностью заполненной тороидальной поверхности (сечение катушки в каждой заданной точке пропорционально радиусу до центральной оси токамака в данной точке). Дифференциальное уравнение, задающее полоидальное сечение таких катушек может быть записано как

$$\frac{dz}{dr} = \frac{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) - \ln \left(\frac{r}{R_1} \right)}{\sqrt{\frac{1}{4} \ln^2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) - \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) - \ln \left(\frac{r}{R_1} \right) \right]^2}}, \quad (1)$$

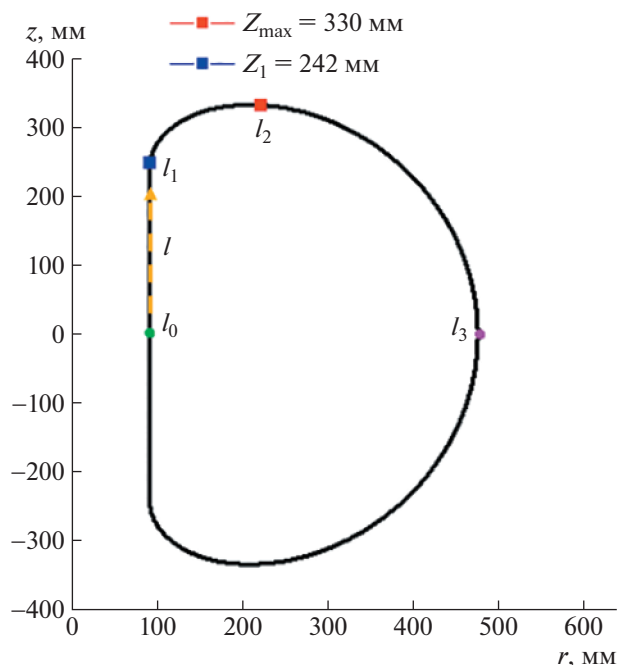


Рис. 1. Полоидальное сечение витка тороидального соленоида СТМП токамака МИФИСТ-0. Зеленая точка l_0 — пересечение полоидального сечения со средней плоскостью токамака на внутренней (ближней к центральной оси) части сечения, синяя точка l_1 — переход от внутренней вертикальной линии к кривой, красная точка l_2 — точка сечения, наиболее удаленная от средней плоскости токамака, фиолетовая точка l_3 — пересечение полоидального сечения со средней плоскостью токамака на внешней части сечения. Оранжевая пунктирная линия отмечает направление криволинейной оси координат l вдоль контура сечения.

где R_1 — наименьший радиус катушки, на котором полоидальное сечение переходит в вертикальную прямую, R_2 — наибольший радиус катушки, находящийся на средней плоскости полоидального сечения катушки. Исходя из геометрии разрядной камеры токамака МИФИСТ-0 [9], R_1 был принят равным 92 мм, $R_2 = 476$ мм. Форма полученного полоидального сечения представлена на рис. 1.

Распределение угла наклона витка тороидального соленоида в тороидальном направлении по длине витка рассчитывалось численными методами, исходя из условия минимизации рассеянного магнитного поля, создаваемого тороидальным соленоидом.

Для оптимизации рассеянных полей была использована следующая процедура. Была введена так называемая поверхностная координата l , идущая вдоль полоидального сечения тороидального соленоида. За точку 0 поверхностной координаты была взята точка пересечения полоидального сечения со средней плоскостью токамака на внутренней (ближней к центральной оси) части сече-

ния (зеленая точка на рис. 1). Зависимость азимутальной координаты центральной линии витка от поверхностной координаты l в области выше средней плоскости токамака ($z > 0$) описывалась согласно представленной ниже формуле (2). Такая форма витка представляет собой упрощенную с точки зрения производства и монтажа форму, полученную теоретически в [4]:

$$\varphi(l) = \begin{cases} \frac{(N-1)\pi}{6} + k_1 l, & l < l_1 \\ \frac{(N-1)\pi}{6} + k_2 + k_3 l + k_4 l^2 + k_5 l^3, & l_1 \leq l < l_2(2) \\ \frac{(N-0.5)\pi}{6}, & l_2 \leq l \leq l_3, \end{cases}$$

где l_1 — точка перехода полоидального сечения от вертикальной внутренней линии к кривой (синяя точка на рисунке 1), l_2 — наивысшая точка полоидального сечения (красная точка на рисунке 1), l_3 — точка пересечения полоидального сечения со средней плоскостью токамака на внешней части сечения (фиолетовая точка на рисунке 1), $k_1, \dots, k_5$ — коэффициенты, $N = 1-12$ — номер витка соленоида. Часть витка, располагавшаяся ниже средней плоскости ($-l_3 \leq l \leq 0$) была антисимметрична описанному участку. Функция $\varphi(l)$ и ее производная считались непрерывными и неотрицательными на всем диапазоне l .

Таким образом, внутренняя часть витка, соответствующая вертикальной части полоидального сечения была наклонена равномерно, внешняя часть витка, то есть часть, располагавшаяся от точки с наибольшей высотой до внешнего радиуса, не была наклонена, а наклон в промежуточной части аппроксимировался кубическим полиномом и плавно переходил от внутренней части к внешней.

Описанное выше распределение наклона витка имело, фактически, одну степень свободы — отношение разницы азимутальных углов верхней и нижней точек внутренней вертикальной части полоидального сечения к полной разнице азимутальных углов на концах витка $\zeta = \frac{(\varphi(l_1) - \varphi(-l_1))}{\varphi(l_3) - \varphi(-l_3)}$.

В системе автоматизированного проектирования и разработки SolidWorks были смоделированы ряд витков с различными величинами ζ (пример моделей витка показан на рис. 2).

Поля, создаваемые полученными тороидальными соленоидами, были смоделированы при помощи программного комплекса COMSOL Multiphysics. Решаемые уравнения:

$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$, $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{H}$, где $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля, $\mathbf{J}$ — плотность протекающего через соленоид тока, $\mathbf{A}$ — векторный потенциал. Плотность тока определялась из сече-

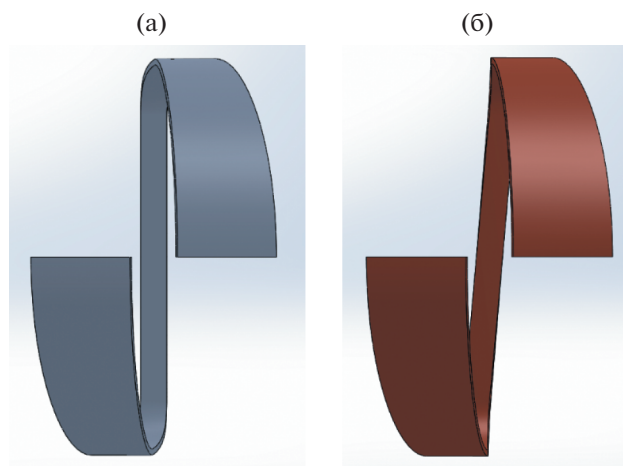


Рис. 2. Модель витка тороидального соленоида токамака МИФИСТ-0: (а) с минимальным наклоном внутренней части полоидального сечения, (б) с максимальным наклоном.

ния соленоида и задаваемой силы тока. Расчетная сетка сгущалась в интересующей области $R = 25$ см для получения более точного решения. Были определены величины рассеянных полей для различных вариантов витков. Значения рассчитывались для кольца с радиусом 25 см, соответствующего большому радиусу токамака. Результаты представлены на рис. 3.

Можно видеть, что с падением средней величины рассеянного магнитного поля $\langle B_{\perp} \rangle$ (величина поля, усредненная по всему диапазону азиму-

тальных углов) растет величина амплитуды колебаний рассеянного магнитного поля от азимутального угла $B_{\max} - \langle B_{\perp} \rangle$. При этом с уменьшением $\langle B_{\perp} \rangle$ уменьшается и максимальное значение рассеянного магнитного поля $B_{\max}$. Зависимость средней величины рассеянного магнитного поля от коэффициента ζ можно описать как

$$\langle B_{\perp} \rangle \sim 0.38 - 1.77\zeta + 5.19\zeta^2 - 2.71\zeta^3 - 0.12\zeta^4. \quad (3)$$

Зависимость амплитуды колебаний магнитного поля от коэффициента ζ в тех же условных единицах, что и $\langle B_{\perp} \rangle$ можно описать как

$$B_{\max} - \langle B_{\perp} \rangle \sim (0.63 - 0.62\zeta + 57.6\zeta^2 - 347\zeta^3 + 799\zeta^4 - 820\zeta^5 + 315\zeta^6) \times 10^{-1}. \quad (4)$$

Таким образом принципиально существует две возможные стратегии по выбору оптимальной формы витков — оптимизация на минимум среднего рассеянного поля и оптимизация на минимум амплитуды колебаний рассеянного магнитного поля. Так как во втором случае для компенсации большого среднего поля потребовалось бы вводить дополнительные катушки, компенсирующие его, было принято решение придерживаться стратегии минимизации $\langle B_{\perp} \rangle$ и $B_{\max}$. Исходя из полученных результатов в качестве оптимального был принят вариант исполнения витков, соответствующий $\zeta = 0.2$. 3D модель тороидального соленоида представлена на рис. 4.

Для данного витка были построены зависимости компонент рассеянного магнитного поля B_r и

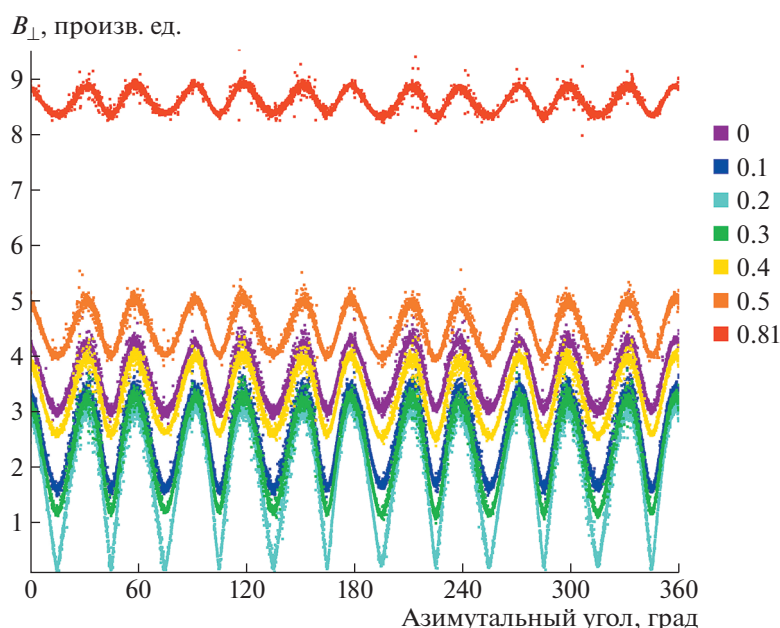


Рис. 3. Зависимости величины рассеянного магнитного поля в условных единицах в области средней плоскости токамака на радиусе 25 см от центральной оси в зависимости от азимутального угла для тороидальных соленоидов с различным значением ζ .

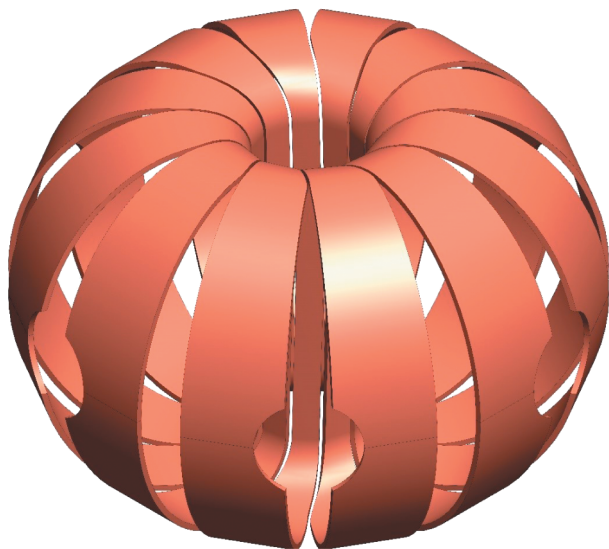


Рис. 4. 3D модель тороидального соленоида токамака МИФИСТ с геометрией витков, соответствующей параметру $\zeta = 0.2$.

B_z (рис. 5). Интересным оказалось то, что подавляющую роль в магнитное поле вносит радиальная его составляющая, что связано, вероятно, с влиянием технологических вырезов в витках, сделанных для совмещения их с диагностическими патрубками разрядной камеры.

Для выбранной оптимальной геометрии витков были построены зависимости величины торо-

идального магнитного поля на большом радиусе токамака от азимутального угла (рис. 6) и отношения рассеянного магнитного поля к тороидальному магнитному полю от азимутального угла (рис. 7). По данным о распределении тороидального магнитного поля была рассчитана его гофрировка, оцененная по формуле $\delta = 100 \frac{(B_{\max} - B_{\min})}{(B_{\max} + B_{\min})/2} \%$ и равная $\delta \approx 0.6\%$, что сравнимо с соответствующим параметром токамака Т-10 [10].

Отношение рассеянного магнитного поля к тороидальному колебалось от $\sim 9.3 \times 10^{-5}$ до $\sim 3.7 \times 10^{-3}$, средняя величина составила $\sim 2.1 \times 10^{-3}$. Таким образом, при значении тороидального магнитного поля ~ 0.8 Тл, что соответствует ожидаемым рабочим режимам работы токамака МИФИСТ-0, можно ожидать величины рассеянного поля $\sim 1.6 \times 10^{-3}$ Тл (16 Гс), при этом основной вклад в него будет вкладывать радиальная компонента поля.

Для данных параметров было оценено напряжение на обходе, необходимое для инициации разряда. Оценка была произведена по формуле [11]

$$U_{\text{loop}} \approx 2\pi R \frac{10^4 p}{\ln \left(400 p a \frac{B_t}{B_{\perp}} \right)}, \quad (5)$$

где p — рабочее давление, принимавшееся равным 10^{-4} мБар, $a = 0.13$ — малый радиус токама-

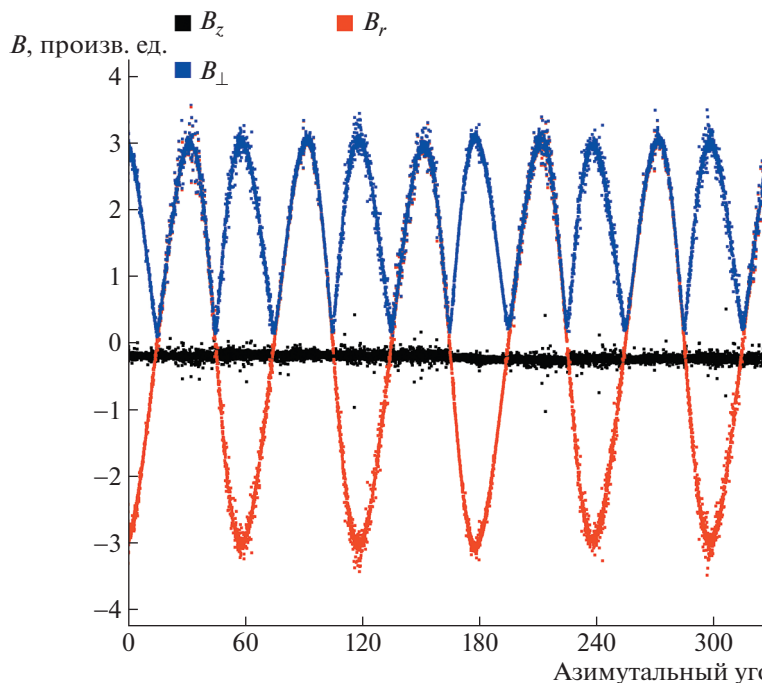


Рис. 5. Величины компонент рассеянного магнитного поля в зависимости от азимутального угла для витков с параметром $\zeta = 0.2$.

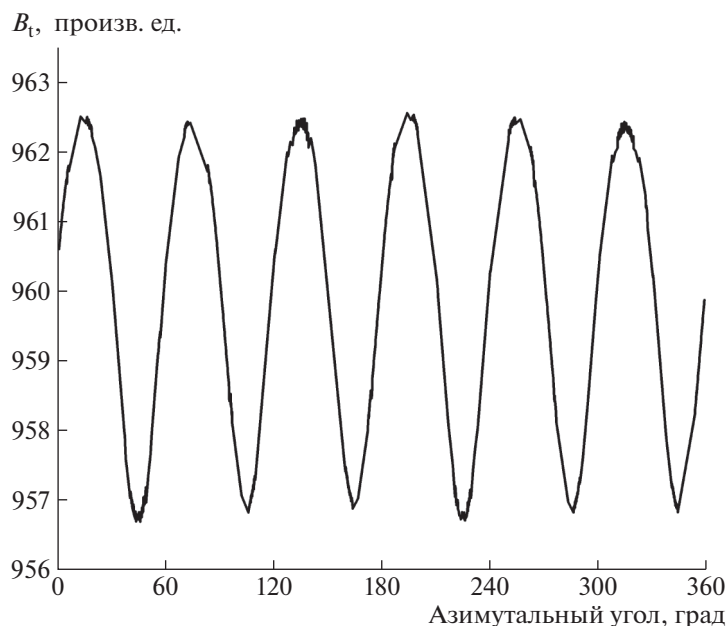


Рис. 6. Зависимость величины тороидального магнитного поля в условных единицах от азимутального угла.

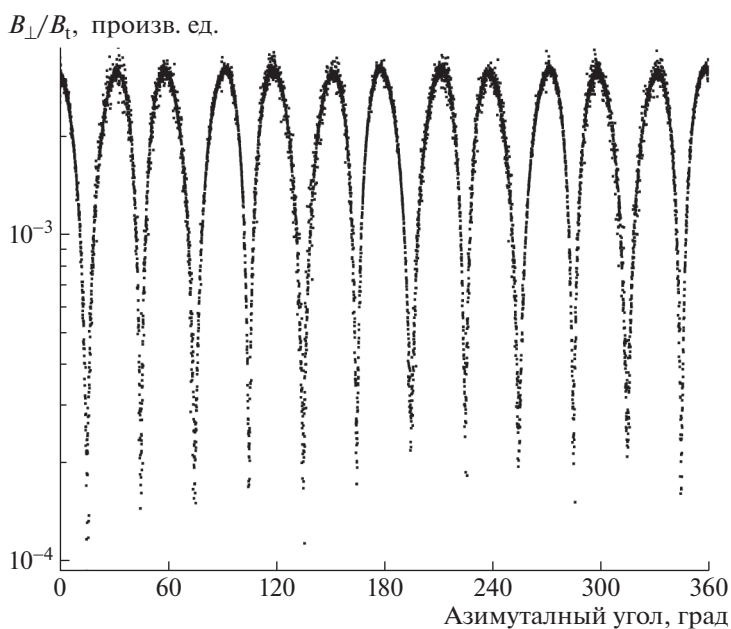


Рис. 7. Зависимость отношения рассеянного магнитного поля к тороидальному магнитному полю в центральной плоскости на большом радиусе токамака МИФИСТ-0 от азимутального угла.

ка, B_t — тороидальное поле. Были получены значения $U_{\text{loop}} \approx 1.5$ В для среднего значения отношений рассеянных и тороидальных полей и $U_{\text{loop}} \approx 4.6$ В для максимального значения отношений рассеянных и тороидальных полей.

Исходя из геометрии тороидального соленоида при численном моделировании была произведена оценка индуктивности соленоида, составившая 26 мкГн и тока, необходимого для достижения величины тороидального поля на большом радиусе токамака 0.8 Тл, составившая 85 кА.

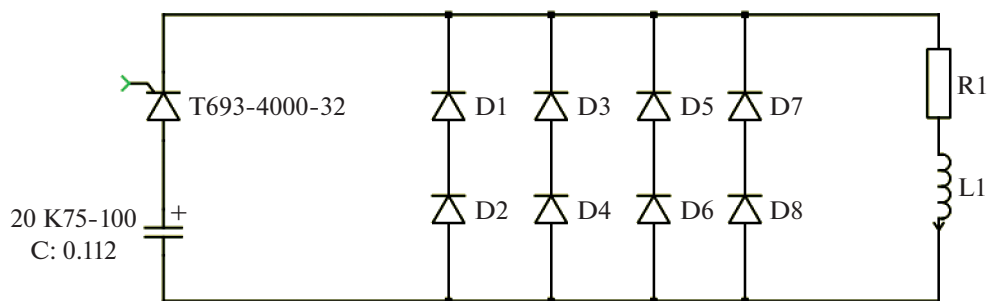


Рис. 8. Схема испытательной цепи питания СТМП токамака МИФИСТ-0. D1-D8 — диоды Д353-1600-36, L1 — индуктивность тороидального соленоида, R1 — омическое сопротивление тороидального соленоида.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОРОИДАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА

Так как точное определение электрофизических свойств СТМП токамака методами численного моделирования с учетом неидеальности используемых элементов, соединений и влияния токоподводящих линий, влияния взаимоиндукции тороидального соленоида и разрядной камеры токамака и т.п. представлялось чересчур трудоемким, было принято решение установить их экспериментально.

Разработанный и описанный выше тороидальный соленоид (толщина катушки 1 мм) был подключен к простейшей системе питания, состоящей из 20 конденсаторов К75-100 емкостью 5.6 мФ каждый с предельным рабочим напряжением 3 кВ. Управление запуском электрического импульса осуществлялось при помощи тиристора Т693-4000-32, в качестве обратных диодов использовались 4 параллельно подключенных цепи по 2 последовательно подключенных диода Д353-1600-36. Схема описанной цепи представлена на рис. 8.

Параметры L1 и R1 подбирались путем численного моделирования импульсов и сравнения полученных результатов в программном пакете для моделирования импульсных силовых электрических цепей PLECS с экспериментальными значениями токов в цепи соленоида для напряжений питания конденсаторов 550 и 1100 В. Параметры, обеспечивавшие наилучшее совпадение экспериментального и расчетного импульсов тока L1= 37 мкГн, R1= 13 мОм. Экспериментальные и модельные импульсы представлены на рис. 9.

СТМП было испытано с напряжениями батарей питания вплоть до ~2 кВ, что соответствовало максимальному току, протекающему через тороидальный соленоид, равному ~ 67 кА и тороидальному магнитному полю на большом радиусе токамака ~0.6 Тл.

4. НАПРЯЖЕНИЕ НА ОБХОДЕ ОТ СТМП ТОКАМАКА

Стоит отметить важную особенность созданного тороидального соленоида, которая должна быть характерна для всех СТМП с единым тороидальным соленоидом. При пропускании электрического тока по тороидальному соленоиду, в силу существования выделенного тороидального направления в соленоиде, СТМП помимо тороидального магнитного поля неизбежно будет создавать и переменный магнитный поток вертикального поля. Из-за этого СТМП с единым тороидальным соленоидом будут создавать напряжение на обходе, независимо от центрального индуктора и сами могут рассматриваться как тип индуктора токамака, аналогично концепции, рассмотренной в [12]. Возникновение напряжения на обходе при импульсе тока на тороидальном соленоиде было зарегистрировано для СТМП токамака МИФИСТ-0. Результаты наблюдений для импульса с напряжением на СТМП, равным 1650 В, представлены на рис. 10. Величина напряжения на обходе, создаваемого СТМП была ~3 В на внутреннем обходе. При затягивании импульса и формировании плато магнитного поля, производная тока по времени в цепи тороидального соленоида будет существенно меньше наблюдавшейся величины. Таким образом можно говорить, что напряжение на обходе, создаваемое СТМП не критично для функционирования токамака. При этом, данный эффект можно учитывать для облегчения пробы за счет согласования направления напряжения на обходе, создаваемого центральным индуктором.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО СТМП

Пространственно-временное распределение вертикального и тороидального магнитного полей, создаваемых СТМП было измерено экспери-

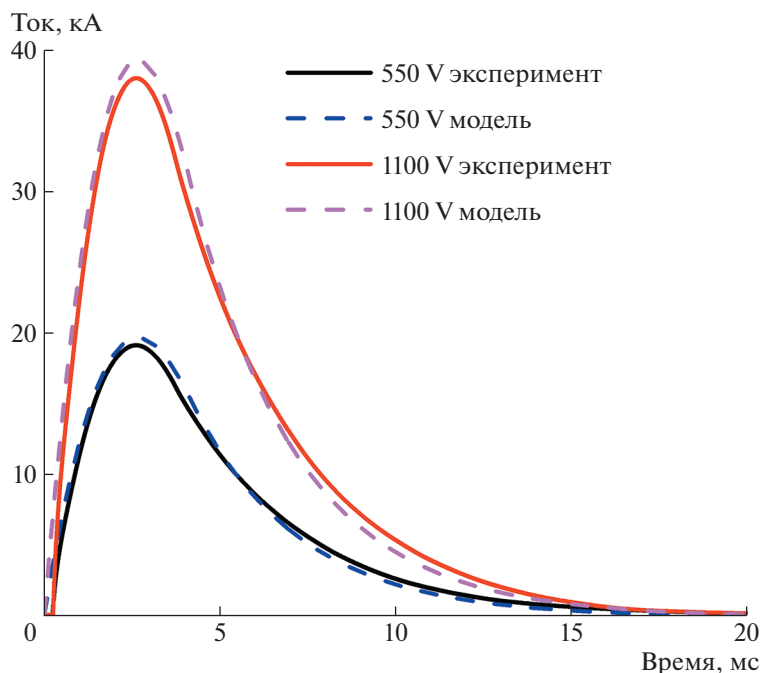


Рис. 9. Расчетные и экспериментальные графики импульсов тока в тороидальном соленоиде токамака МИФИСТ-0. Сплошные линии – экспериментальные данные, пунктирные линии – данные численного расчета.

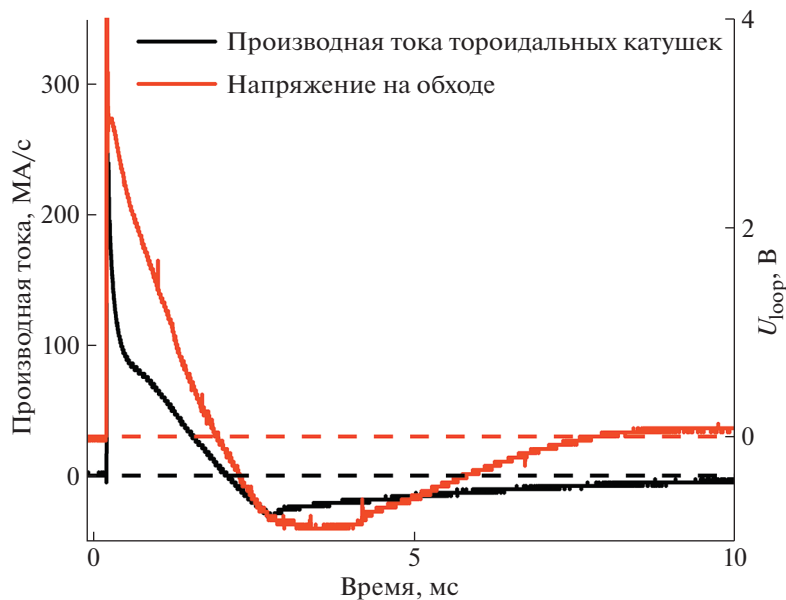


Рис. 10. Напряжение на внутреннем обходе ($R = 12$ см) токамака МИФИСТ-0, создаваемое тороидальным соленоидом токамака (красная линия, права ось ординат) [13] и производная тока в цепи соленоида (черная линия, левая ось ординат). Пунктирные линии показывают нулевые значения на осях ординат соответствующего цвета.

ментально, при помощи 7 магнитных датчиков Холла АН49Е [13] с диапазоном измерения от -0.1 Тл до 0.1 Тл, распределенных вдоль радиуса токамака вблизи (на расстоянии менее 5 мм от) центральной плоскости токамака. Геометрия из-

мерений представлена на рис. 11. Измерения проводились на одной радиальной линии, вдали от вырезов в витках и патрубках.

Пространственно-временное распределение отношения вертикального магнитного поля к то-

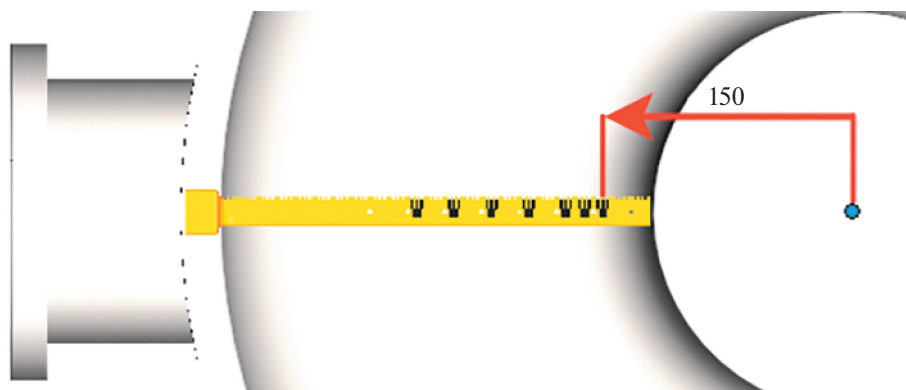


Рис. 11. Геометрия измерений магнитного поля в токамаке МИФИСТ-0. Желтая деталь — держатель датчиков холла, черные фигуры — датчики Холла. Синей точкой отмечена центральная ось токамака.

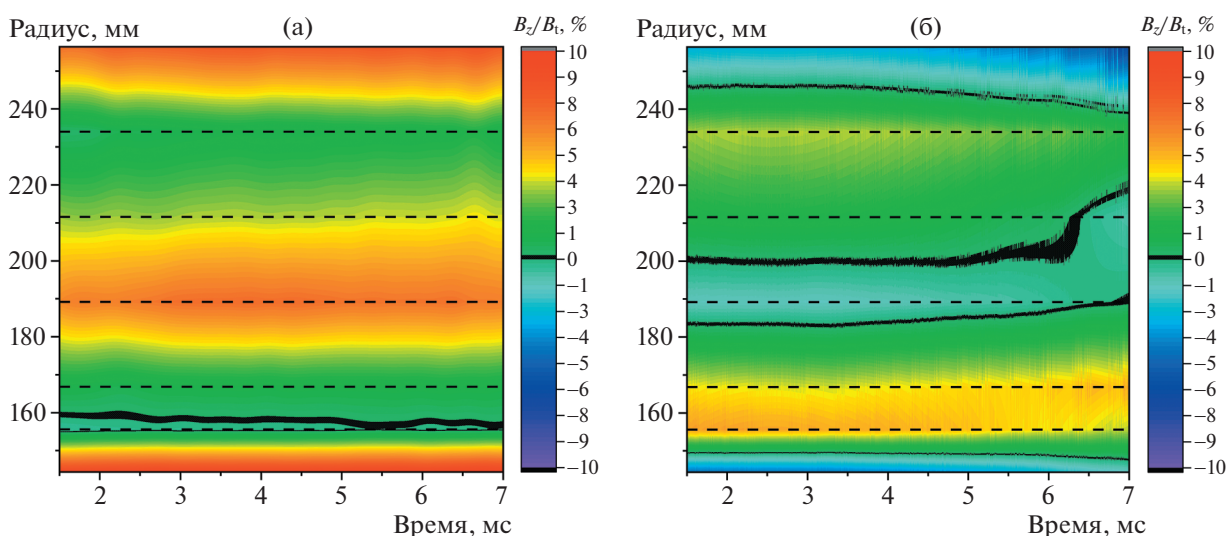


Рис. 12. Пространственно-временное распределение отношений вертикального магнитного поля к тороидальному магнитному полю, создаваемым СТМП токамака МИФИСТ-0 при напряжении зарядки батарей питания СТМП 100 В. Горизонтальные пунктирные линии отмечают расположение датчиков магнитного поля АН49Е. Верхняя и нижняя границы вертикальной шкалы соответствуют расположению крайних датчиков магнитного поля. Черные области соответствуют области нуля вертикального поля. Рисунок а — пустая разрядная камера, рисунок б — разрядная камера с установленной в ней антенной ИЦР нагрева плазмы.

роидальному магнитному полю представлено на рис. 12. За ноль временной координаты принято время подачи открывающего импульса на тиристор, за ноль радиальной координаты — центральная ось токамака. Распределение представлено, начиная с времени 1.500 мс, так как сигнал до данного времени был зашумлен. Напряжение батарей питания для данного измерения составляло 100 В, таким образом, чтобы максимальное тороидальное магнитное поле не выходило за рабочий диапазон датчиков магнитного поля. Были прове-

дено два эксперимента — с пустой разрядной камерой (рис. 12а) и с разрядной камерой, в которой была установлена антенна ион-циклотронного резонансного (ИЦР) нагрева плазмы (рис. 12б).

Максимальное отношение вертикального магнитного поля к тороидальному магнитному полю составляет почти 10%. Можно видеть, что распределение отношений вертикального магнитного поля к тороидальному магнитному полю имеет сложную структуру, в которой можно условно выделить

пять пространственных областей с различными величинами соотношений вертикального магнитного поля к тороидальному. В случае с установленной антенной ИЦР нагрева, распределение поля имеет 4 области перехода через ноль, тогда как при использовании пустой разрядной камеры, такой переход всего один. При этом распределение наблюдаемых областей в пространстве в целом схоже. С течением сравнительно длительного времени координаты, в которых вертикальное магнитное поле близко к нулю меняются слабо. Вероятнее всего наблюдаемая картина вызвана наложением магнитного поля, создаваемого током индукции, наведенным СТМП на токопроводящую разрядную камеру токамака и внутрикамерные элементы (ИЦР антенну) в случае их наличия. Наличие нулей магнитного поля позволяет ожидать успешного создания плазменного шнура в токамаке МИФИСТ-0.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана и испытана система создания тороидального магнитного поля токамака МИФИСТ-0. Из соображений упрощения конструкции было принято решение использовать единый тороидальный соленоид с 12 витками вместо 12 отдельных катушек тороидального поля.

Форма витков тороидального соленоида была определена из условий безмоментности и минимизации рассеянных полей. Ожидаемые рассеянные поля от соленоида составляют не более ~0.37% от величины тороидального поля на большом радиусе токамака. Гофрировка тороидального магнитного поля от созданного соленоида на большом радиусе токамака была оценена как $\delta \approx 0.6\%$, что сравнимо с гофрировкой в существующих успешно функционировавших токамаках.

Экспериментально измеренные величины индуктивности и омического сопротивления тороидального соленоида составили 37 мкГн и 12 мОм соответственно. При испытаниях тороидального соленоида были успешно достигнуты импульсные значения магнитного поля до ~0.6 Тл на большом радиусе токамака.

Экспериментально измеренное пространственно-временное распределение отношений вертикального к тороидальному магнитных полей позволяет ожидать успешного создания шнура в токамаке.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке договора НИОКР 313/1755-Д между НИЯУ МИФИ и АО “Нау-

ка и Инновации” (проект ЕОТП-УТП-058 единого отраслевого тематического плана ГК “Росатом”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Mitchell N., Bessette D., Gallix R., Jong C., Knaster J., Libeyre P., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2008. V. 18. P. 435–440.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2008.921232>
2. Huguet M., Dietz K., Hemmerich J.L., Last J.R. // Fusion Technol. 1987. V. 11. P. 43–70.
<https://doi.org/10.13182/FST87-A25000>
3. Khvostenko P.P., Azizov E.A., Alfimov D.E., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Chudnovsky A.N., et al. // Fusion Eng. Des. 2015. V. 98–99. P. 1090–1093.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.05.036>
4. Цаун С.В., Юшманов П.Н., Левицкий А.Н., Фёдоров О.В., Шаховец К.Г. Разработка системы тороидального магнитного поля в сферическом токамаке GLOBUS. 1992. Препринт.
5. Ovsyannikov D.A., Ovsyannikov A.D., Zhabko A.P., Veremey E.I., Vorobyov G.M., Zavadskij V.M. Proc. 2005 Int. Conf. Physics of Control. 2005. IEEE, Saint-Petersburg State University, Russia. 2005. P. 75–79.
<https://doi.org/10.1109/PHYCON.2005.1513954>
6. Ahmad Z., Ahmad S., Naveed M.A., Deebe F., Javeed M.A., Batool S., et al. // Phys. Scr. 2017. V. 92. P. 045601.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa6458>
7. Kurnaev V.A., Vorobyov G.M., Nikolaeva V.E., Krat S.A., Melnikov A.V., Ivanov D.P., Gasparyan Yu.M. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1329–1331.
<https://doi.org/10.1134/S1063778819100144>
8. Шафранов В.Д. // Журнал технической физики. 1972. Т. 42. С. 1785–1791.
9. Vorobyov G.M., Krat S.A., Mironov V.D., Kurnaev V.A. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 1675.
<https://doi.org/10.1134/S1063778820100257>
10. Перфилов С.В., Чудновский А.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. термоядерный синтез. 2013. № 36. С. 65–71.
11. Knoepfel H. (ed.) Tokamak Start-up. 1986. Boston: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1889-8>
12. Захаров Л.Е. // Журнал технической физики. 1975. Т. 45. С. 1049–1052.
13. АН49Е. <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/АН49Е.pdf>.

MEPHIST-0 Tokamak Toroidal Magnetic Field System

S. A. Krat¹, *, A. S. Pryshvitsyn¹, A. I. Alieva¹, N. E. Efimov¹, E. A. Vinitskiy¹,
D. G. Bulgadaryan¹, G. M. Vorobyov¹, and V. A. Kurnaev¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: stepan.krat@gmail.com*

Received September 11, 2021; revised October 1, 2021; accepted October 4, 2021

Abstract—A system for creating a toroidal magnetic field in the MEPHIST tokamak is described. The system is a single toroidal solenoid consisting of 12 copper loops made from a copper strip of variable width. The shape of the poloidal cross section is selected based on the zero torque condition. The distribution of the angle of inclination of the loops in the toroidal direction along their length was selected empirically by means of numerical modeling designed to minimize the scattered fields. The expected corrugation of the magnetic field at the large radius of the tokamak is $\sim 0.6\%$. The inductance of the solenoid and the current supply lines is ~ 37 mH, the ohmic resistance is ~ 12 mW. When the toroidal field was raised, the loop voltage of ~ 3 V was observed.

Keywords: tokamaks, magnetic fields, magnetic system, COMSOL, magnetometry