

УДК 621.039.623, 533.9.08, 519.688

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТРТ НА СИГНАЛЫ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

© 2024 г. А. М. Белов^{a,b,*,**}, В. Ф. Андреев^a, А. В. Сушков^a

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^b Государственный научный центр РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Троицк, Москва, Россия

* e-mail: Belov_AM@nrcki.ru

** e-mail: abelov@triniti.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

После доработки 15.02.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

Приведены результаты модельных численных расчетов, показывающие влияние вакуумной камеры ТРТ на амплитуду и фазу сигналов в магнитных датчиках, которые расположены на внутренней и внешней поверхности вакуумной камеры. Показано, что характерное время в датчиках напряжения обхода существенно зависит от их положения на вакуумной камере ТРТ. Поэтому требуется их тщательное согласование между собой, особенно на динамической стадии разряда, когда в вакуумной камере наводятся большие вихревые токи. Приведены результаты численных расчетов при периодическом возмущении в плазменном шнуре. Они показали, что вакуумная камера практически полностью экранирует сигналы в датчиках формы магнитной поверхности, расположенных на внешней поверхности вакуумной камеры. При этом она влияет не только на амплитуду сигналов в магнитных датчиках, но и на фазу сигналов. Численные исследования позволяют заключить, что приоритетным является расположение датчиков формы магнитной поверхности именно на внутренней поверхности вакуумной камеры ТРТ.

Ключевые слова: токамак с реакторными технологиями, электромагнитная диагностика, магнитные датчики, вакуумная камера, моделирование, уравнения Кирхгофа, вихревые токи

DOI: 10.31857/S0367292124040056, EDN: QDNYCD

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной целью токамака ТРТ является отработка ключевых технологий термоядерного реактора и достижение параметров плазмы, обеспечивающих горение ($Q > 1$) [1]. Для достижения этих целей планируется разработать электромагнитную систему (ЭМС) токамака на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), позволяющую создавать тороидальное магнитное поле до 8 Тл, которое будет удерживать горячую плазму от контакта со стенкой вакуумной камеры (ВК). Для обеспечения заданных параметров плазмы необходимо в реальном времени контролировать форму и положение плазменного шнура внутри ВК. Существенным препятствием для получения требуемых параметров плазмы являются различные типы неустойчивостей [2], которые возникают в плазме. Наиболее опасными являются МГД-неустойчивости, которые относятся к макроскопическим неустойчивостям плазмы, так как их неконтролируемое развитие может привести, например к развитию неустойчивости срыва, при котором

происходит потеря тепловой и магнитной энергии за очень малые времена, что приводит к существенному воздействию на первую стенку ВК, ЭМС токамака.

Электромагнитная диагностика (далее в тексте магнитная), основанная на датчиках индуктивного типа, представляющих собой как одно-, так и многовитковые катушки, имеющих различные линейные размеры, обеспечивает как локальные (порядка нескольких сантиметров), так и распределенные (сравнимо с линейными размерами токамака) измерения магнитного поля в разных частях токамака. На основе измерений магнитными датчиками можно определить ток и энергосодержание плазмы, вихревые токи, текущие по конструктивным элементам токамака, напряжение обхода и др.

Данные магнитной диагностики, после их обработки, используются для управления системой электропитания ЭМС токамака в реальном времени, которая обеспечивает реализацию заданного сценария разряда. Анализ сигналов магнитной диагностики после разряда позволяет восстанавливать

форму и положение плазмы, исследовать процессы возникновения и развития МГД-неустойчивостей, турбулентности плазмы. В современных установках электромагнитная диагностика состоит из сотен индуктивных датчиков различных типов, которые устанавливаются как на внутренней поверхности, так и на внешней поверхности ВК [3–8].

Вакуумная камера ТРТ толстая, она имеет двухстенную конструкцию из аустенитной нержавеющей стали AISI 316LN с толщиной внешней и внутренней стенок по 25 мм, которые будут соединены между собой ребрами толщиной также 25 мм [1], поэтому при изменении токов в полоидальных обмотках индукторе или плазменном шнуре в ней наводятся значительные вихревые токи. Эти токи влияют на равновесие плазмы и систему управления плазменным разрядом. Поэтому численное моделирование дает важную информацию, которая может быть использована как для проектирования системы электромагнитной диагностики, так и для оценки сигналов в магнитных датчиках, расположенных в разных местах внутри и снаружи ВК токамака. Математическое моделирование позволяет оптимизировать расположение магнитных датчиков с учетом влияния ВК, а также рассчитать необходимые параметры датчиков, учесть их взаимное расположение, геометрию, возможность замены и корректировки величины измеряемых сигналов.

В статье представлены результаты математического моделирования сигналов для двух типов магнитных датчиков при различных возмущениях, задаваемых в плазменном шнуре. Первый тип датчиков — распределенный, петли для измерения полоидального потока (датчик напряжения обхода — ДНО, представляющий собой осесимметричный тороидальный виток (одновитковая индуктивная катушка)), установленные на внутренней поверхности ВК. Второй тип датчиков — локальный, датчик формы магнитной поверхности (ДФМП), который представляет собой индуктивный датчик из двух ортогональных многовитковых катушек: одна катушка для определения нормальной составляющей магнитного поля B_n (ось катушки перпендикулярна измерительному контуру); другая катушка для определения тангенциальной составляющей магнитного поля B_r (ось катушки параллельна касательной к измерительному контуру), линейные размеры датчика порядка нескольких сантиметров. ДФМП могут располагаться как на внутренней, так и на внешней поверхности ВК.

Численное моделирование, проведенное в работе, позволяет оценить влияние вакуумной камеры ТРТ на величину и поведение сигналов ДНО и ДФМП и, соответственно, учесть эту информацию при выборе магнитных датчиков, их количества, параметров

и расположения в процессе рабочего проектирования ВК, первой стенки и дивертора токамака ТРТ.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА СИГНАЛОВ В МАГНИТНЫХ ДАТЧИКАХ

Будем предполагать, что ВК является аксиально-симметричной по большому обходу тора. В этом случае задачу вычисления магнитных полей и сигналов в магнитных датчиках можно сформулировать в двумерной постановке для цилиндрической системы координат r и z . Здесь ось r направлена вдоль горизонтальной оси токамака, а ось z — вдоль вертикальной оси токамака.

Для расчета магнитных полей будем использовать скалярную величину магнитного потока $\psi(r, z)$, которая в точке с координатами (r, z) от обмоток полоидального поля и пассивных элементов ВК вычисляется по формуле

$$\psi(r, z) = \iint_{S_i} G(r, z, r_i, z_i) j(r_i, z_i) dr_i dz_i, \quad (1)$$

где $j(r_i, z_i)$ — распределение плотности тока в i -й полоидальной обмотке или в пассивном элементе ВК; S_i — площадь сечения i -го проводника.

Если предположить, что ток I по сечению обмотки и пассивного элемента распределен равномерно, то получаем

$$\psi(r, z) = \frac{I}{S_i} \iint_{S_i} G(r, z, r_i, z_i) dr_i dz_i, \quad (2)$$

где G — функция Грина [9]:

$$G(r, z, r_i, z_i) = \sqrt{\frac{r r_i}{k^2}} \left[(2 - k^2) K(k) - 2E(k) \right], \quad (3)$$

$$k^2 = \frac{4r r_i}{(r + r_i)^2 + (z - z_i)^2},$$

а $K(k)$ и $E(k)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\theta,$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta. \quad (4)$$

Таким образом, функция Грина $G(r, z, r_i, z_i)$ — это, фактически, магнитный поток в точке (r, z) от кольцевого тока, расположенного в точке (r_i, z_i) , т.е. взаимная индуктивность двух тонких колец.

Поэтому скалярную величину $\psi(r, z)$ от конечного числа проводников можно вычислить

алгебраическим сложением действий от всех источников. В этом случае компоненты магнитного поля в цилиндрических координатах (r, z) рассчитываются через производные от потока ψ

$$B_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad B_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (5)$$

Наведенные вихревые токи в пассивных элементах вычисляются из решения уравнений Кирхгофа для электрических цепей

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \mathbf{R}\mathbf{I} = -\frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (6)$$

где \mathbf{L} — матрица индуктивностей (положительно определенная и симметричная) [Гн]; \mathbf{I} — вектор токов в пассивных элементах [А]; \mathbf{R} — диагональная матрица сопротивлений [Ом]; $\psi(r, z)$ — вектор суммарного магнитного потока от активных проводников [Вб].

Сигнал в магнитных датчиках U , который измеряется в эксперименте, $U = -d\Phi/dt$, где $\Phi = \mathbf{B}NS$, \mathbf{B} — вектор индукции магнитного поля вдоль оси датчика, S — площадь поперечного сечения датчика, N — количество витков датчика.

Численный алгоритм решения задачи (1)–(6) состоит из следующей последовательности шагов:

- 1) разбиваем ВК на некоторое количество тороидальных витков;
- 2) задаем ток $I(t)$ в плазме;
- 3) решаем уравнения Кирхгофа (6) и находим вихревые токи в тороидальных витках ВК;
- 4) вычисляем суммарный магнитный поток $\psi(r, z)$ в местах расположения ДНО и ДФМП от тока плазмы и вихревых токов пассивных элементов;
- 5) вычисляем магнитное поле B_z и B_r в местах расположения ДНО и ДФМП по формулам (5);
- 6) для расчета сигнала в магнитных датчиках необходимо спроецировать поля B_z и B_r на ось ДНО и ДФМП с учетом угла их расположения относительно ВК.

Вычисление тангенциальной B_τ и нормальной B_n компоненты магнитного поля в местах расположения ДФМП осуществляется по формулам

$$\begin{aligned} B_\tau &= B_z \sin \alpha - B_r \cos \alpha, \\ B_n &= B_z \cos \alpha + B_r \sin \alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

где α — угол между нормалью к стенке вакуумной камеры и вертикалью (ось z), см. рис. 1.

Таким образом, задавая ток в плазме и вычисляя вихревые токи в пассивных элементах ВК, можно рассчитать сигналы в ДНО и ДФМП.

Сделаем несколько замечаний о численном методе решения задачи (1)–(6).

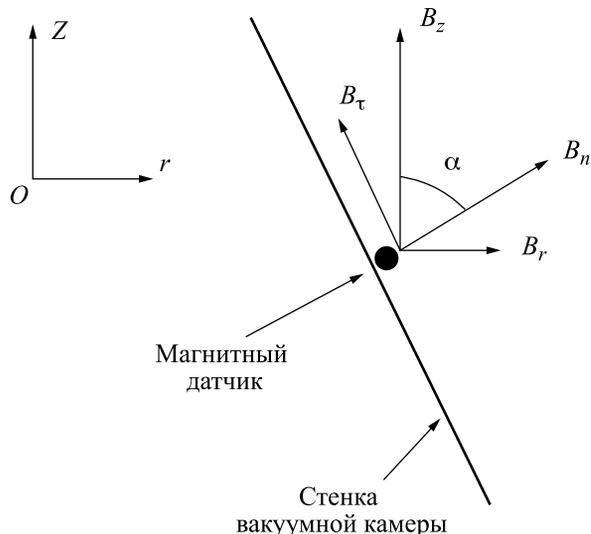


Рис. 1. Тангенциальная B_τ и нормальная B_n компоненты магнитного поля ДФМП, относительно угла α между нормалью к стенке ВК и вертикалью (ось z).

3. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА СИГНАЛОВ В МАГНИТНЫХ ДАТЧИКАХ

Первая проблема — использование большого количества тороидальных витков для моделирования ВК, что увеличивает количество уравнений Кирхгофа (6) и требует обращения матрицы индуктивностей большой размерности. Так как вакуумная камера ТРТ состоит из двух стенок, то необходимо разбивать на тороидальные витки как внутреннюю, так и внешнюю стенки ВК токамака. В нашем случае внутренняя стенка и внешняя стенки ВК разбивались равномерно по контуру камеры, в результате, общее количество используемых тороидальных витков составило 220.

Вторая проблема — при решении уравнений Кирхгофа (6) необходимо обращать матрицу индуктивностей большой размерности \mathbf{L} . При большом количестве тороидальных витков, индуктивности соседних витков близки между собой, и поэтому обращение матрицы может оказаться неустойчивым. Для решения этой задачи использовалась регуляризация по А. Н. Тихонову [10]. Вместо решения уравнения $\mathbf{A}\mathbf{z} = \mathbf{u}$ решается уравнение $(\mathbf{A}\mathbf{A}^* + \alpha\mathbf{E})\mathbf{z} = \mathbf{A}^*\mathbf{u}$, где \mathbf{E} — единичная матрица, \mathbf{A}^* — сопряженная матрица, α — параметр регуляризации. Однако если матрица \mathbf{A} симметрична, то уравнение сводится к виду $(\mathbf{A} + \alpha\mathbf{E})\mathbf{z} = \mathbf{u}$. Поэтому вместо матрицы индуктивностей \mathbf{L} использовалась модифицированная матрица $\mathbf{D} = \mathbf{L} + \alpha\mathbf{E}$. Коэффициент α находился из условия его минимального значения и устойчивого решения задачи (1)–(6). Отметим, что обращение модифицированной матрицы индуктивностей \mathbf{D} проводилось по методу Гаусса–Жордана [11].

Третья проблема — решение системы дифференциальных уравнений (6) с большой точностью, так как необходимо численно решать задачу на длительном интервале времени до выхода вихревых токов в ВК на стационар. Для численного решения использовался неявный метод Гаусса–Лежандра четвертого порядка, который является А-устойчивым [12].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 приведена математическая модель вакуумной камеры ТРТ [13], показано расположение полоидальных обмоток (PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6), индуктора (CSD1, CSD2 и CSU1, CSU2) и витков пассивной стабилизации (ПС, красные отрезки внутри ВК). Данная модель будет использоваться в расчетах магнитного поля в ВК. На рис. 2 (слева) дано тестовое расположение 28 датчиков напряжения обхода, которые расположены равномерно по полоидальному углу внутри ВК, а на рис. 2 (справа) — тестовое расположение 16 датчиков формы магнитной поверхности, одна половина этих датчиков (№ 1—8) расположена внутри ВК, а другая (№ 9—16) — снаружи ВК.

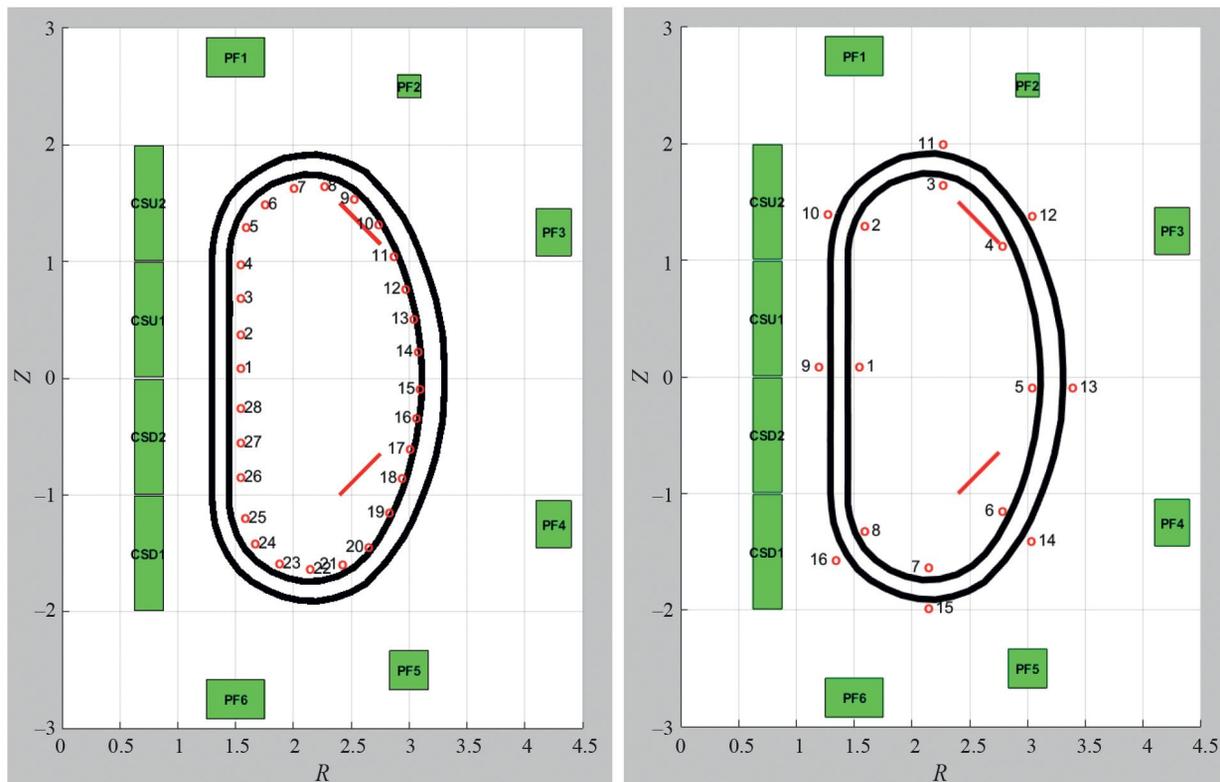


Рис. 2. Математическая модель вакуумной камеры ТРТ: черные кривые — вакуумная камера; зеленые прямоугольники — индуктор и обмотки полоидального поля; красные отрезки — витки пассивной стабилизации; красные кружочки слева — датчики напряжения обхода; красные кружочки справа — датчики формы магнитной поверхности.

4.1. Задание растущего с постоянной скоростью тока в плазменном шнуре

Первый модельный численный эксперимент заключался в следующем. Плазменный шнур моделировался 100 тороидальными витками. Задаем скорость роста в одном плазменном витке равным 10 000 А/с. Рассчитываем характерное время выхода сигнала в ДНО на стационарное значение, т.е. на значение, если бы отсутствовало влияние ВК.

На рис. 3 приведен заданный полный ток в плазменном шнуре и рассчитанный суммарный вихревой ток в ВК.

На рис. 4 показано распределение магнитного потока ψ (рис. 4а) и модуля вектора магнитной индукции B (рис. 4б) в момент времени $t = 0.05$ с.

На рис. 5 приведены сигналы в некоторых ДНО и характерное время τ в миллисекундах выхода на стационар, что показывает влияние ВК на эволюцию сигналов в этих магнитных датчиках.

На рис. 6 приведено характерное время τ в миллисекундах для всех датчиков напряжения обхода (представлены на рис. 2 слева).

Таким образом, численный эксперимент показал следующее. Во-первых, в ВК токамака наводятся

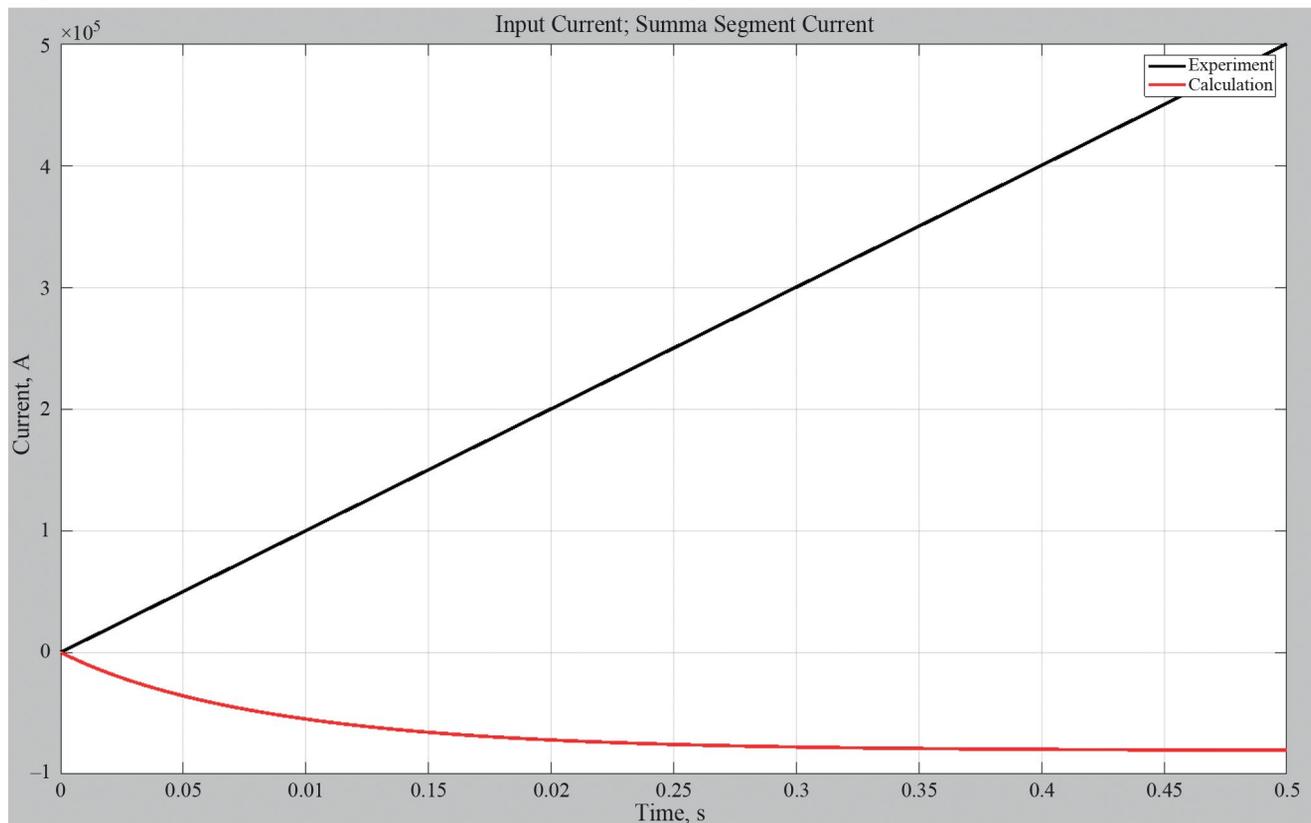


Рис. 3. Полный ток в плазменном шнуре (черная прямая) и суммарный вихревой ток в ВК (красная кривая).

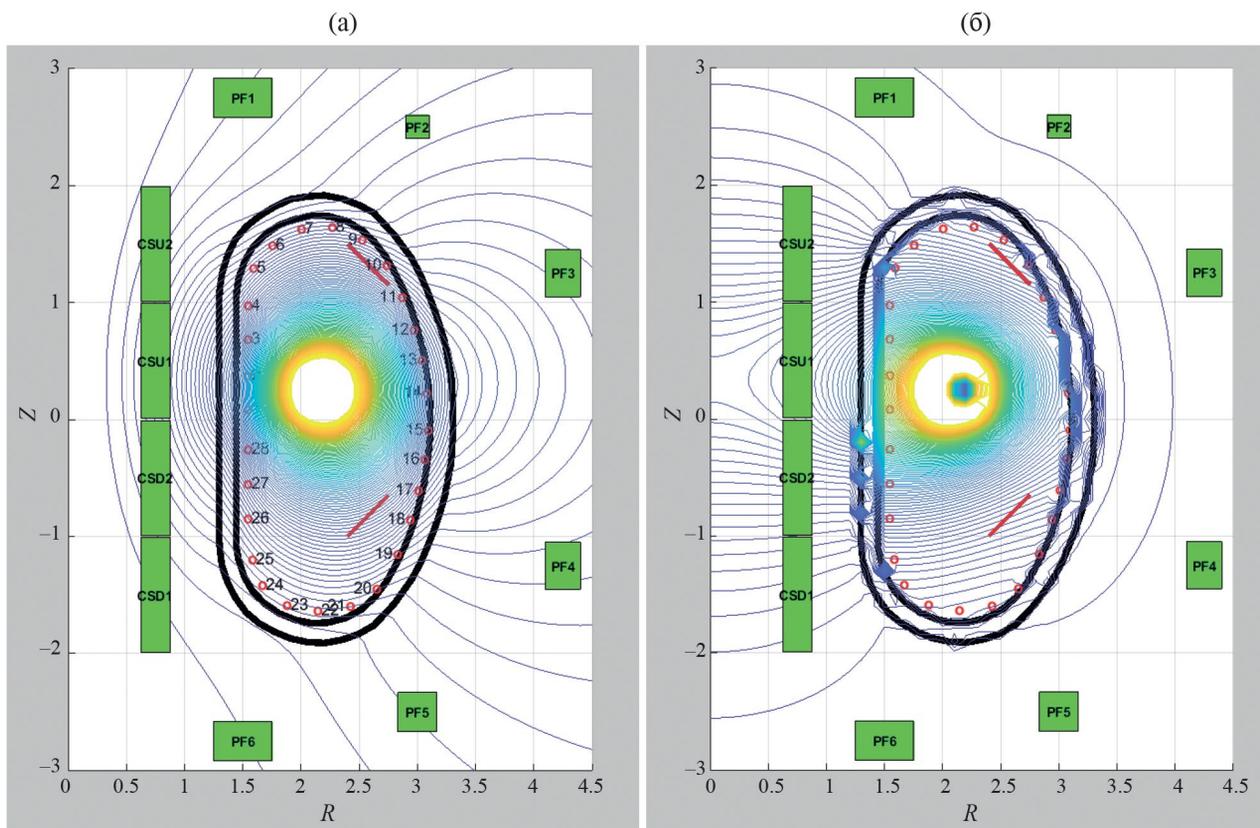


Рис. 4. Распределение магнитного потока ψ (а) и распределение модуля вектора магнитной индукции B (б).

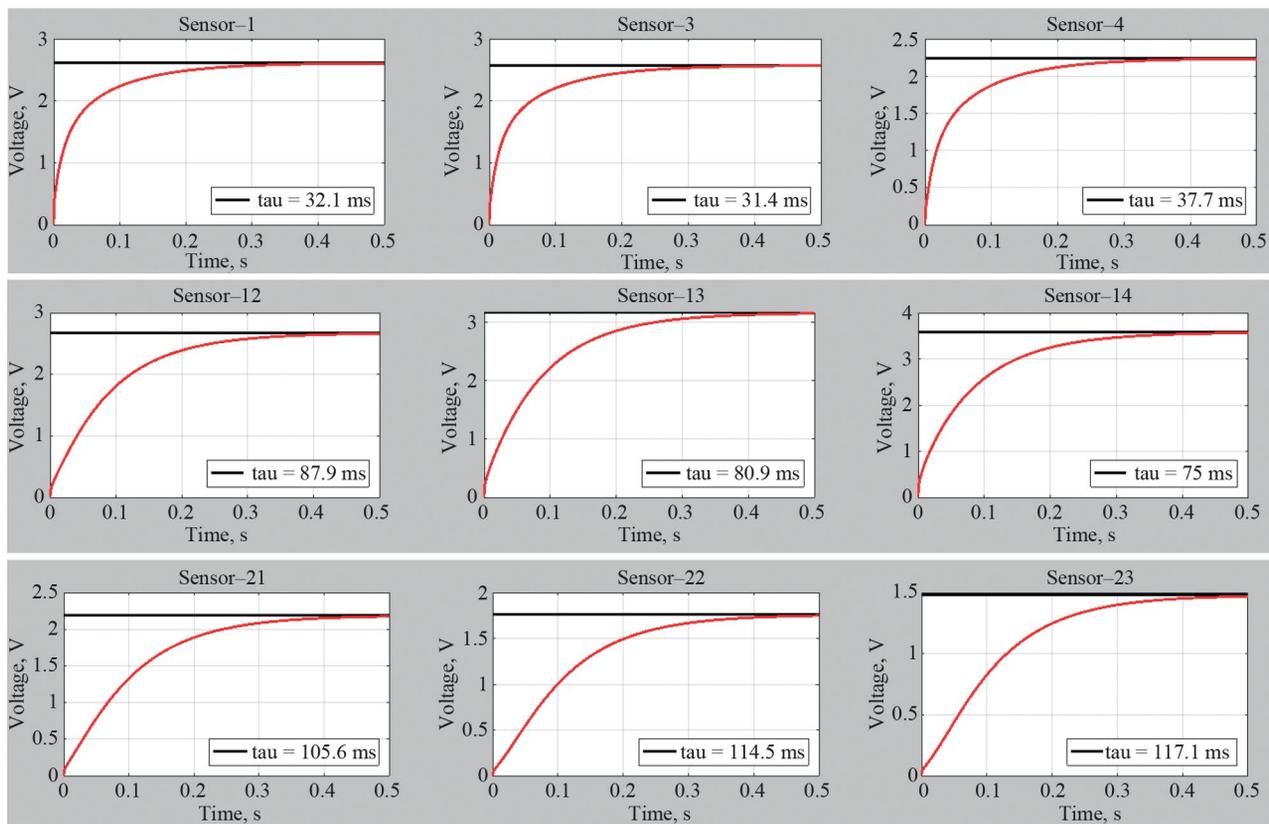


Рис. 5. Сигналы в ДНО с (красная кривая) и без (черная прямая) учета влияния ВК.

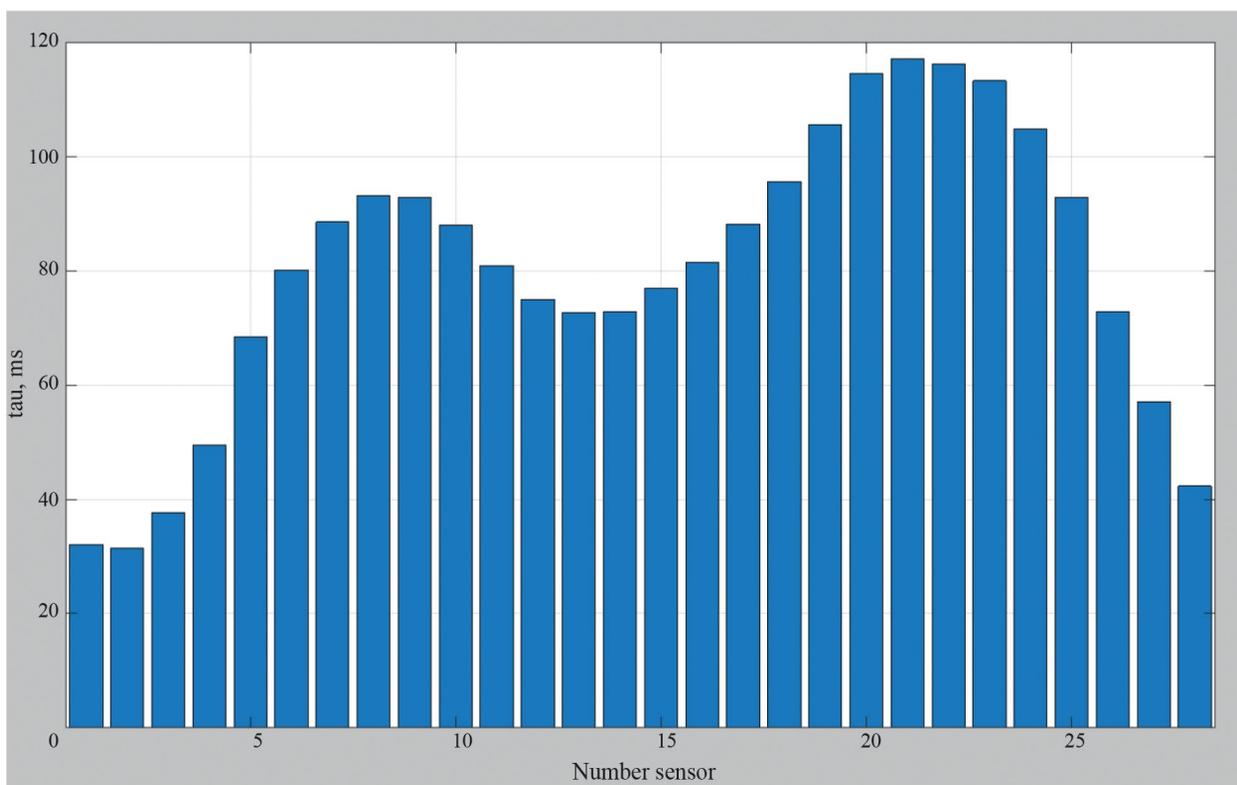


Рис. 6. Характерное время τ в миллисекундах в сигналах ДНО.

значительные вихревые токи (рис. 3, красная кривая), которые препятствуют как проникновению магнитного поля из ВК, так и влияют на сигналы ДНО. Во-вторых, следует отметить, что влияние ВК на сигналы в магнитных датчиках неравномерно по полоидальному углу обхода вакуумной камеры. Характерное время τ изменяется от минимального значения $\tau \approx 32$ мс до максимального значения $\tau \approx 118$ мс. В-третьих, при обработке и интерпретации сигналов с ДНО необходимо учитывать характерное время τ сигнала в каждом магнитном датчике.

4.2. Задание переменного тока в плазменном шнуре

Основная цель численных экспериментов, приведенных в данном разделе, состоит в сравнении сигналов в ДФМП, расположенных внутри и снаружи ВК, т.е. реакции магнитных датчиков на периодическое возмущение, которое возникает в плазменном шнуре.

Численное моделирование проводилось следующим образом. задается синусоидальный ток в плазме с заданной частотой и вычисляется амплитуда и сдвиг фазы сигналов в ДФМП. Магнитные датчики двухкомпонентные, а их тестовое расположение приведено на рис. 2 (справа).

Перейдем к результатам численных расчетов. В первом численном эксперименте частота, задаваемого тока в плазме, равна 100 Гц и амплитудой ~ 15 кА, а время расчета равно 0.1 с, рис. 7.

На рис. 8 показано распределение магнитного потока ψ (рис. 8а) и модуля вектора магнитной индукции \mathbf{B} (рис. 8б) для момента времени $t = 0.01$ с.

На рис. 9 приведены сигналы в ДФМП, расположенные внутри и снаружи ВК, для нормальной компоненты магнитного поля. Отметим, что сигналы в магнитных датчиках, которые расположены снаружи ВК (№ 9–16) увеличены в 10 раз. Это сделано для более наглядного сравнения сигналов.

На рис. 10а приведена амплитуда, а на рис. 10б фаза сигналов в ДФМП, расположенных внутри и снаружи ВК, для нормальной компоненты магнитного поля.

На рис. 11 приведены сигналы в ДФМП, расположенных внутри и снаружи ВК для тангенциальной компоненты магнитного поля. Отметим, что сигналы в датчиках, расположенных снаружи ВК (№ 9–16) увеличены в 100 раз. Это сделано для более наглядного сравнения сигналов.

На рис. 12а приведена амплитуда, а на рис. 12б фаза сигналов в магнитных датчиках, расположенных внутри и снаружи ВК.

Хорошо видно, что амплитуда сигналов наружных магнитных датчиков существенно меньше амплитуды сигналов во внутренних магнитных датчиках,

что указывает на значительное влияние толстой стенки ВК токамака. Также следует отметить, что сигналы в ДФМП, расположенные внутри и снаружи ВК, отличаются не только по амплитуде, но и по сдвигу фазы относительно задаваемого в плазме возмущения.

Во втором численном эксперименте частота задаваемого тока в плазме была равна 1000 Гц, а расчет осуществлялся в течение 0.01 с, рис. 13.

На рис. 14 показано распределение магнитного потока ψ (рис. 14а) и модуля вектора магнитной индукции \mathbf{B} (рис. 14б) для момента времени $t = 0.001$ с.

На рис. 15 приведены сигналы в ДФМП для нормальной компоненты магнитного поля. Отметим, что сигналы в магнитных датчиках на внешней поверхности (№ 9–16) увеличены в 100 раз. Это сделано для более наглядного сравнения сигналов.

На рис. 16 приведена амплитуда и фаза сигналов в магнитных датчиках, расположенных внутри и снаружи ВК.

На рис. 17 приведены сигналы в ДФМП для тангенциальной компоненты магнитного поля. Сигналы в магнитных датчиках (№ 9–16), расположенные снаружи ВК, увеличены в 100 раз. Это сделано для более наглядного сравнения.

На рис. 18а приведена амплитуда и на рис. 18б фаза сигналов в ДФМП для тангенциальной компоненты магнитного поля.

Хорошо видно, что амплитуда сигнала в магнитных датчиках, расположенных снаружи ВК, существенно меньше сигналов в магнитных датчиках, расположенных внутри ВК. Такая эволюция сигналов в ДФМП определяется влиянием толстой стенки вакуумной камеры ТРТ. Следует также отметить, что сигналы в соответствующих ДФМП (пары датчиков, расположенные по разные стороны стенки ВК, № 1 и 9, № 2 и 10 и т.д.) отличаются не только по амплитуде, но они имеют разный сдвиг по фазе. Также из приведенных численных расчетов хорошо видно, что тангенциальная компонента магнитного поля для датчика, расположенного снаружи ВК, практически, полностью экранируется толстой стенкой ВК.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные модельные численные расчеты по анализу влияния ВК ТРТ на сигналы ДНО и ДФМП показали, что ВК оказывает существенное влияние на сигналы индуцированные в магнитных датчиках, при изменении внешнего магнитного в следствие наведения больших вихревых токов в ВК, имеющую совокупную толщину стенок из аустенитной нержавеющей стали 50 мм.

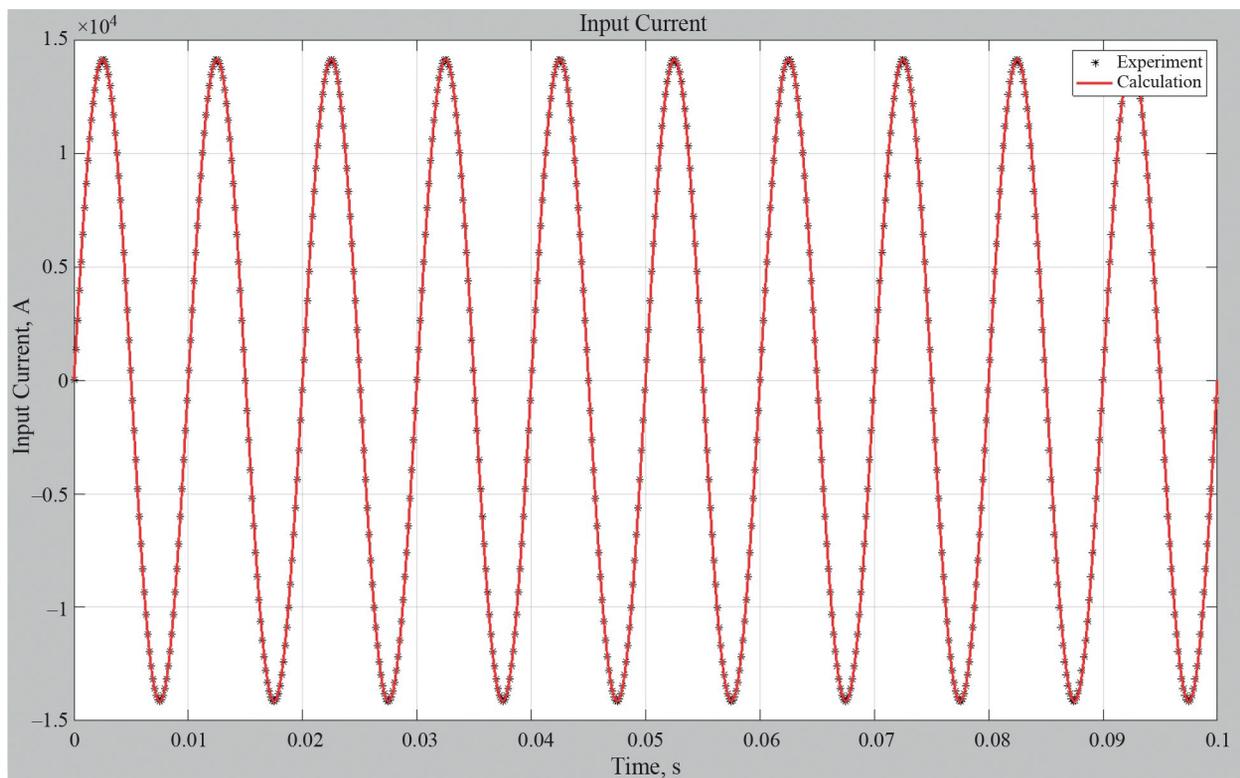


Рис. 7. Ток с частотой 100 Гц, задаваемый в плазменном шнуре.

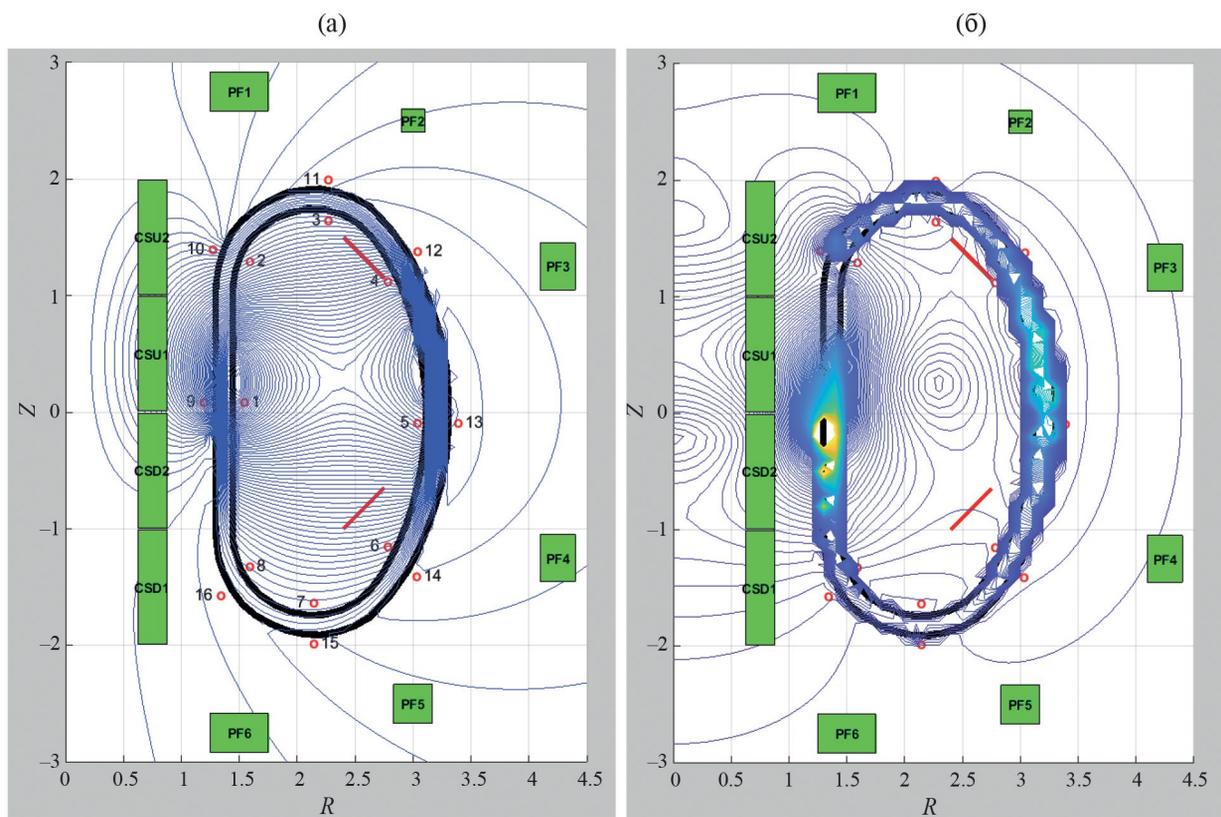


Рис. 8. Распределение магнитного потока ψ (а); распределение модуля вектора магнитной индукции \mathbf{B} (б) в момент времени $t = 0.01$ с.

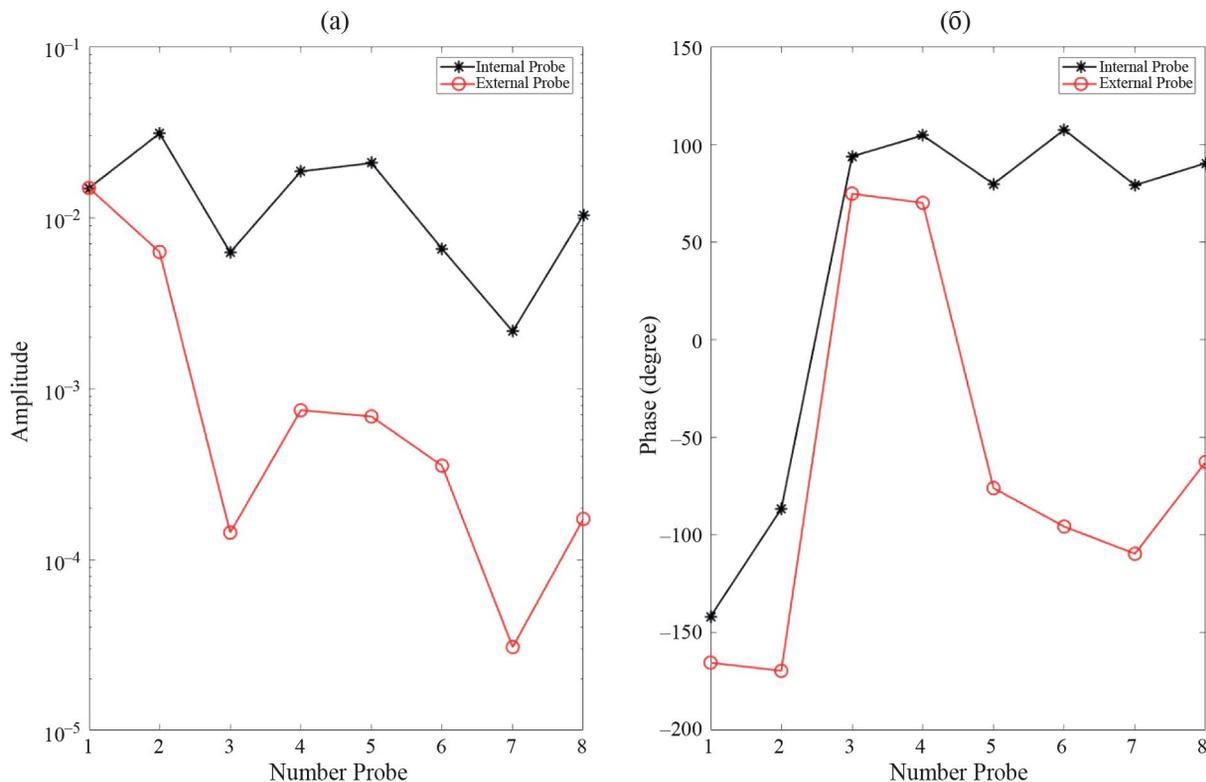


Рис. 9. Сигналы в ДФМП, расположенные внутри (черные кривые) и снаружи (красные кривые) ВК, для нормальной компоненты магнитного поля. Сигналы в ДФМП, расположенные снаружи ВК, увеличены в 10 раз.

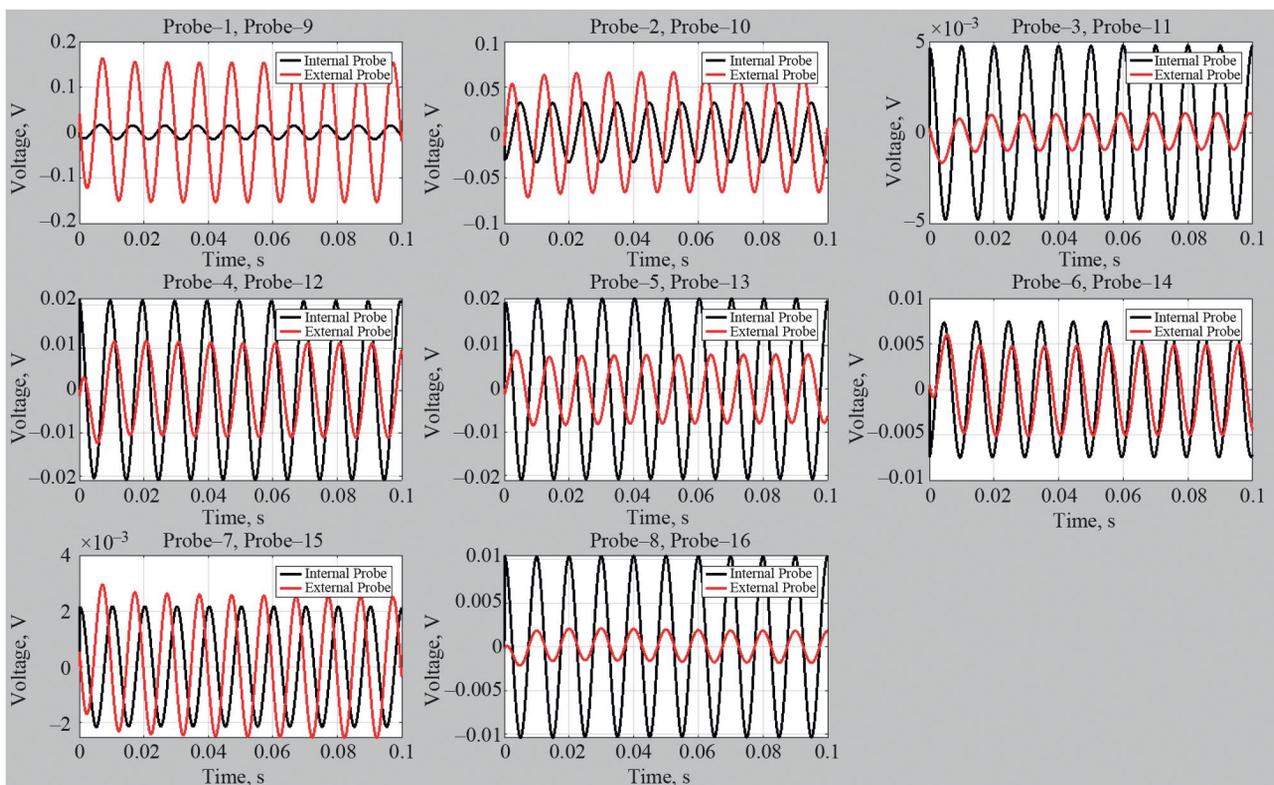


Рис. 10. Амплитуда в логарифмической шкале (а) и фаза (б) сигнала в ДФМП для нормальной компоненты магнитного поля. Черная кривая — датчики на внутри, а красная кривая — датчики снаружи ВК.

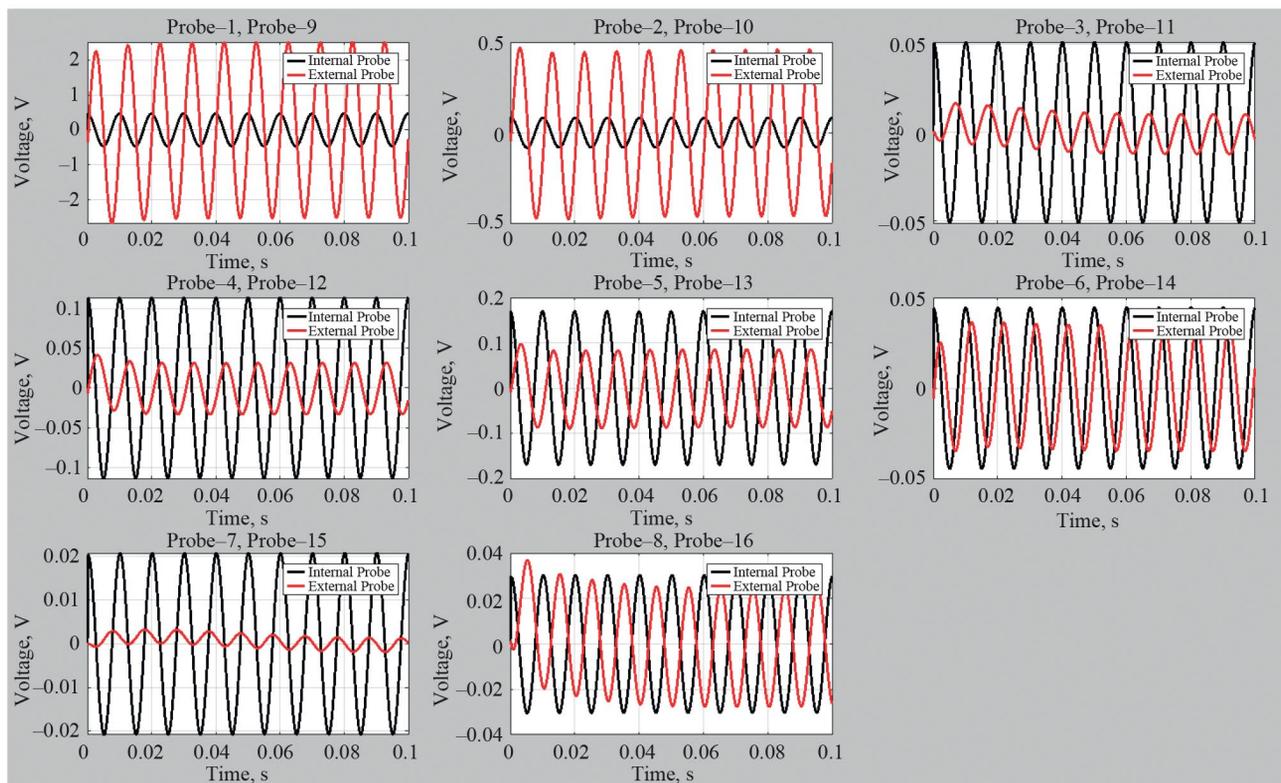


Рис. 11. Сигналы в ДФМП, расположенных внутри (черные кривые) и снаружи (красные кривые) ВК для тангенциальной компоненты магнитного поля. Сигналы в ДФМП, расположенные снаружи ВК, увеличены в 100 раз.

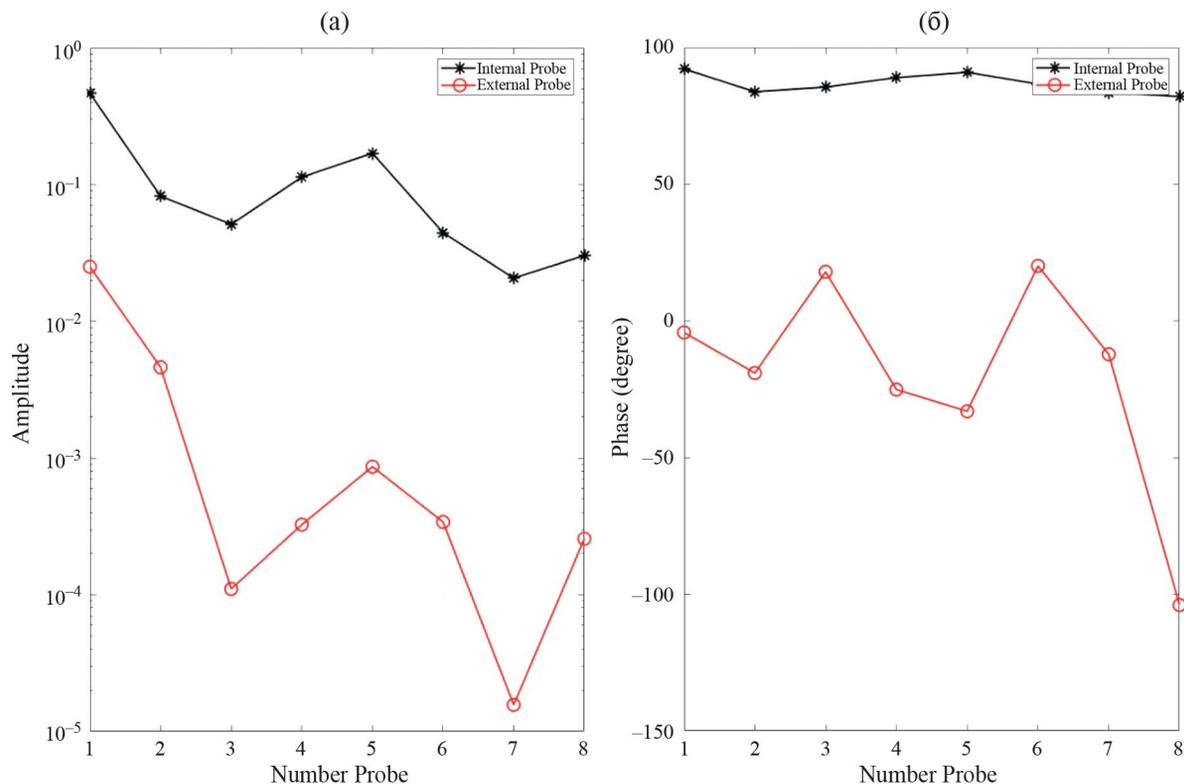


Рис. 12. Амплитуда в логарифмическом масштабе (а) и фаза (б) сигналов в ДФМП для тангенциальной компоненты магнитного поля. Черная кривая — датчики внутри, а красная кривая — датчики снаружи ВК.

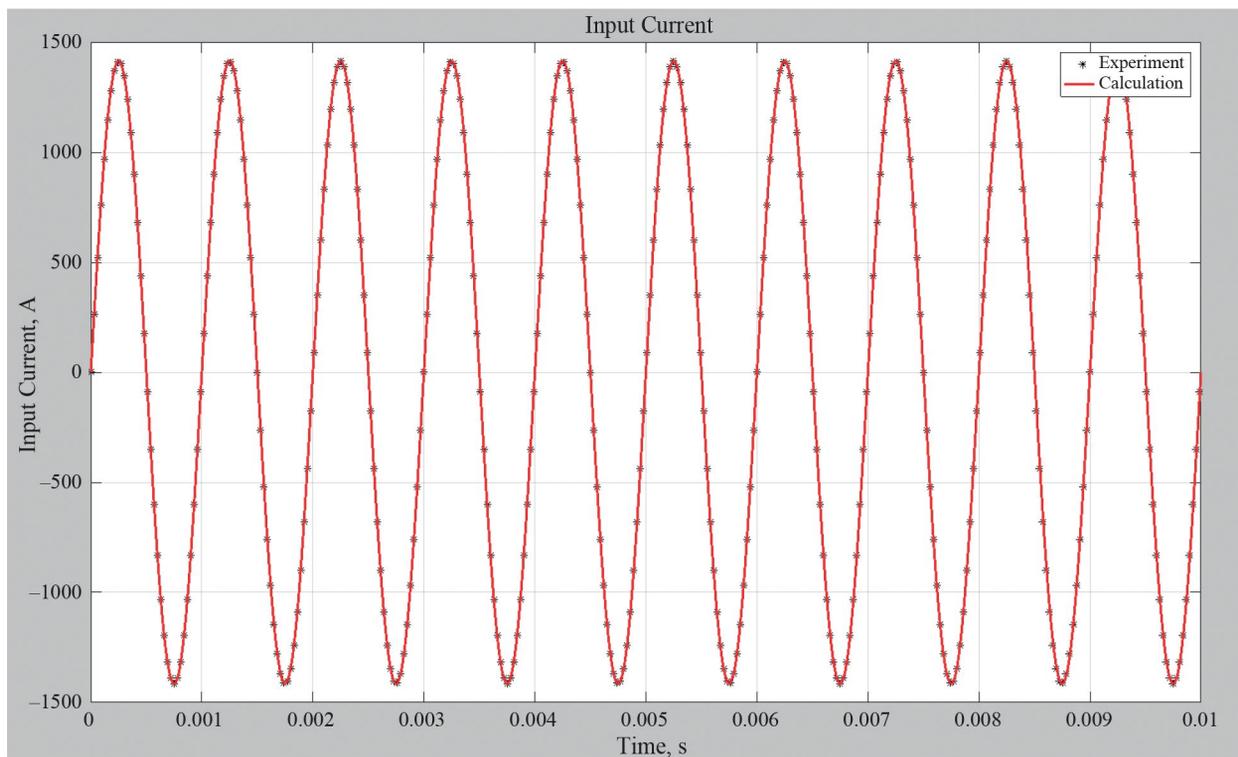


Рис. 13. Ток с частотой 1000 Гц, задаваемый в плазменном шнуре.

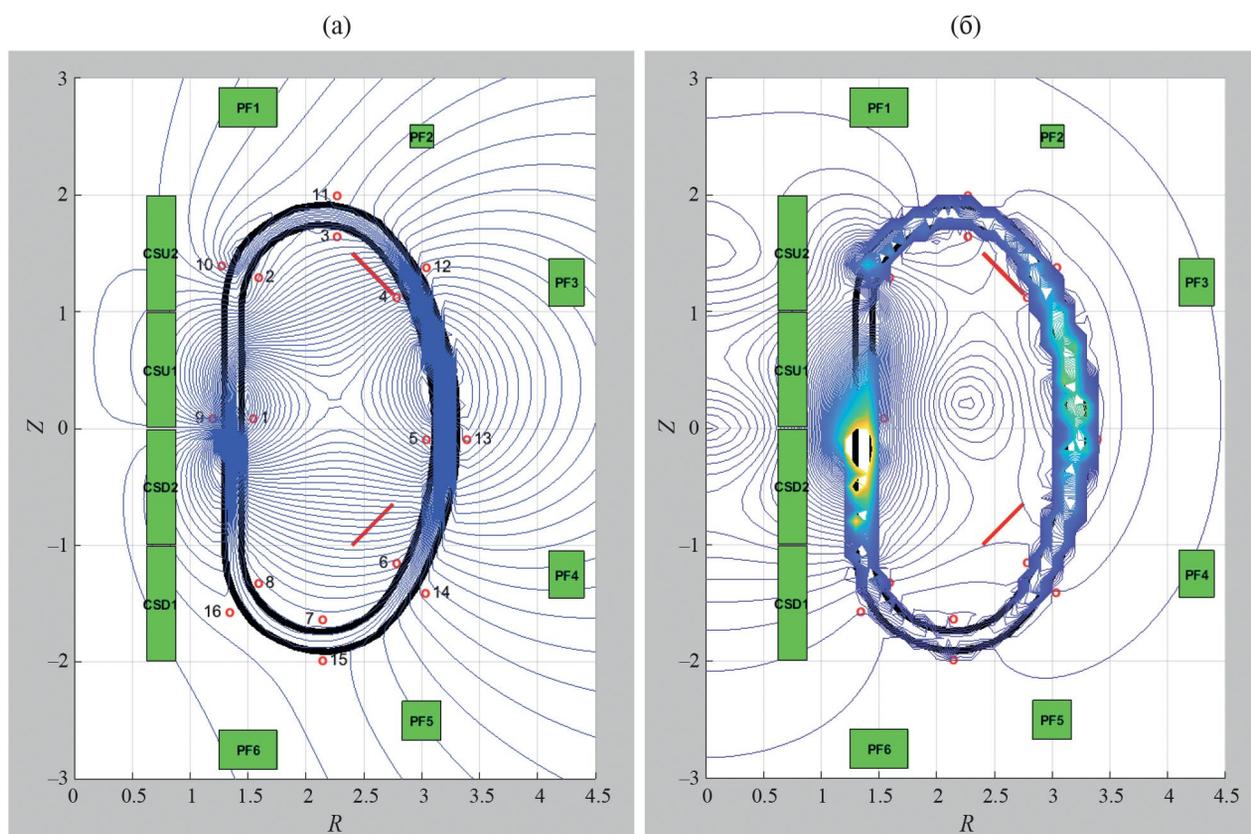


Рис. 14. Распределение магнитного потока ψ (а) и модуля вектора магнитной индукции B (б).

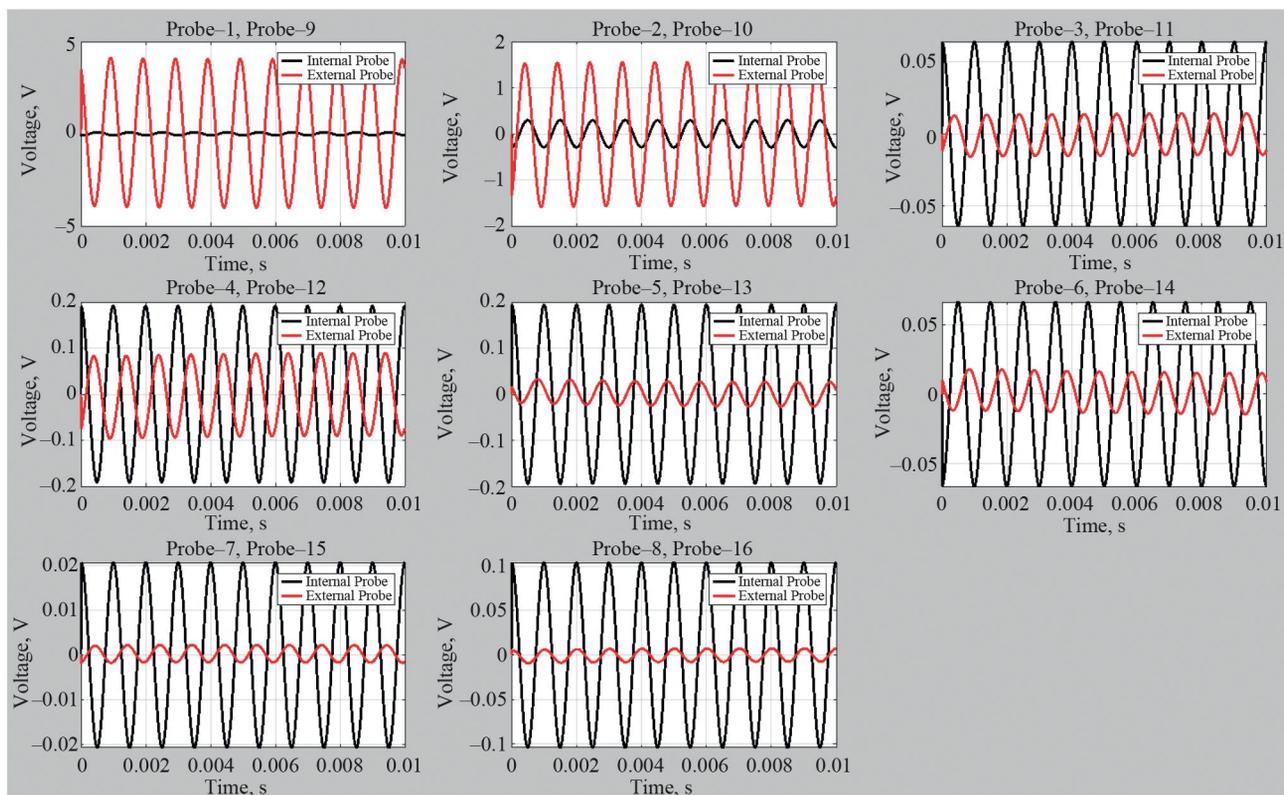


Рис. 15. Сигналы в ДФМП, расположенные внутри (черная кривая) и снаружи (красная кривая) ВК, для нормальной компоненты магнитного поля. Сигнал в ДФМП, расположенного снаружи ВК, увеличен в 100 раз.

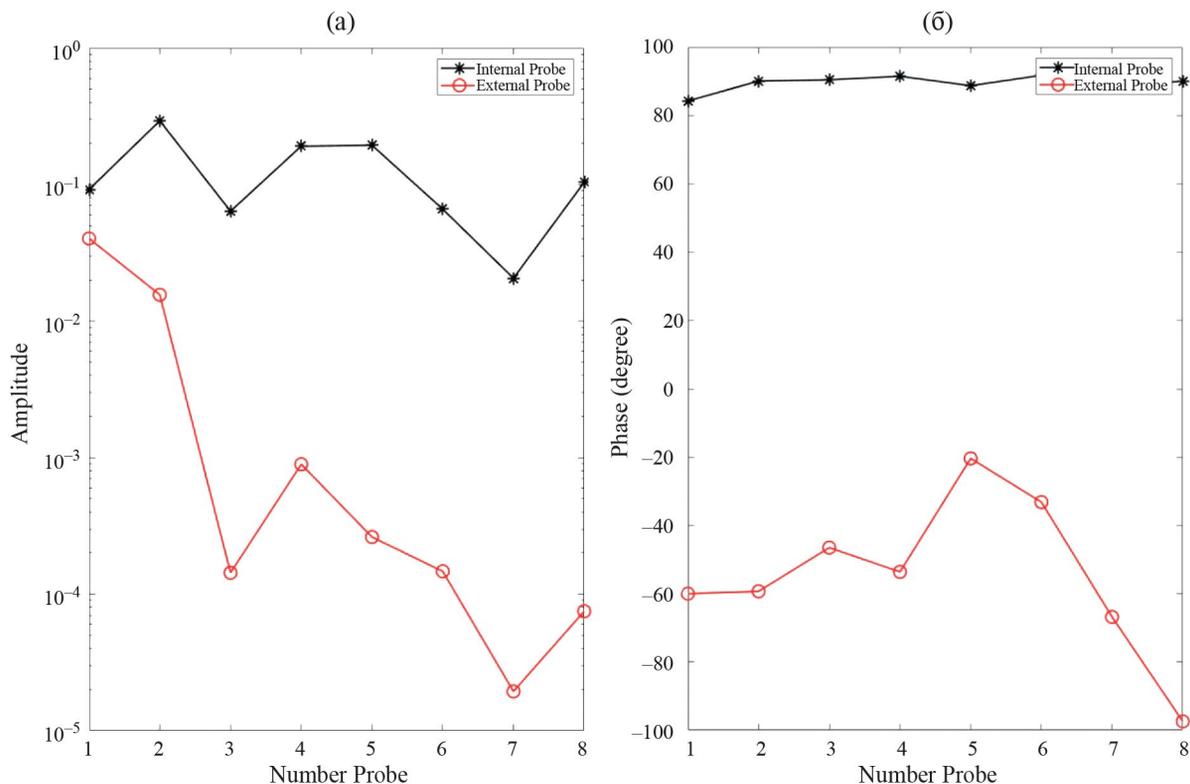


Рис. 16. Амплитуда в логарифмическом масштабе (а) и фаза (б) сигналов в ДФМП для нормальной компоненты магнитного поля. Черная кривая — датчики внутри ВК, а красная кривая — датчики снаружи ВК.

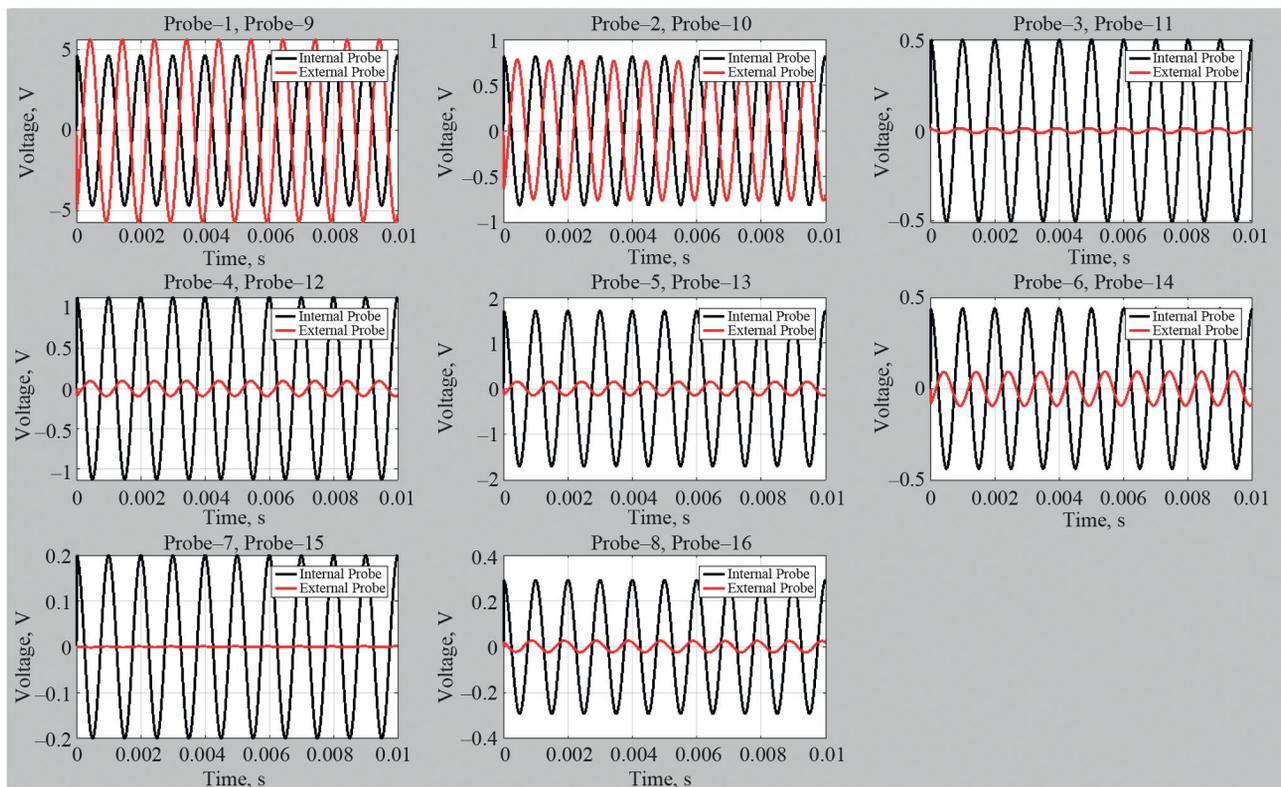


Рис. 17. Сигналы в ДФМП внутри (черная кривая) и снаружи (красная кривая) ВК для тангенциальной компоненты магнитного поля. Сигнал в ДФМП, расположенный снаружи ВК, увеличен в 100 раз.

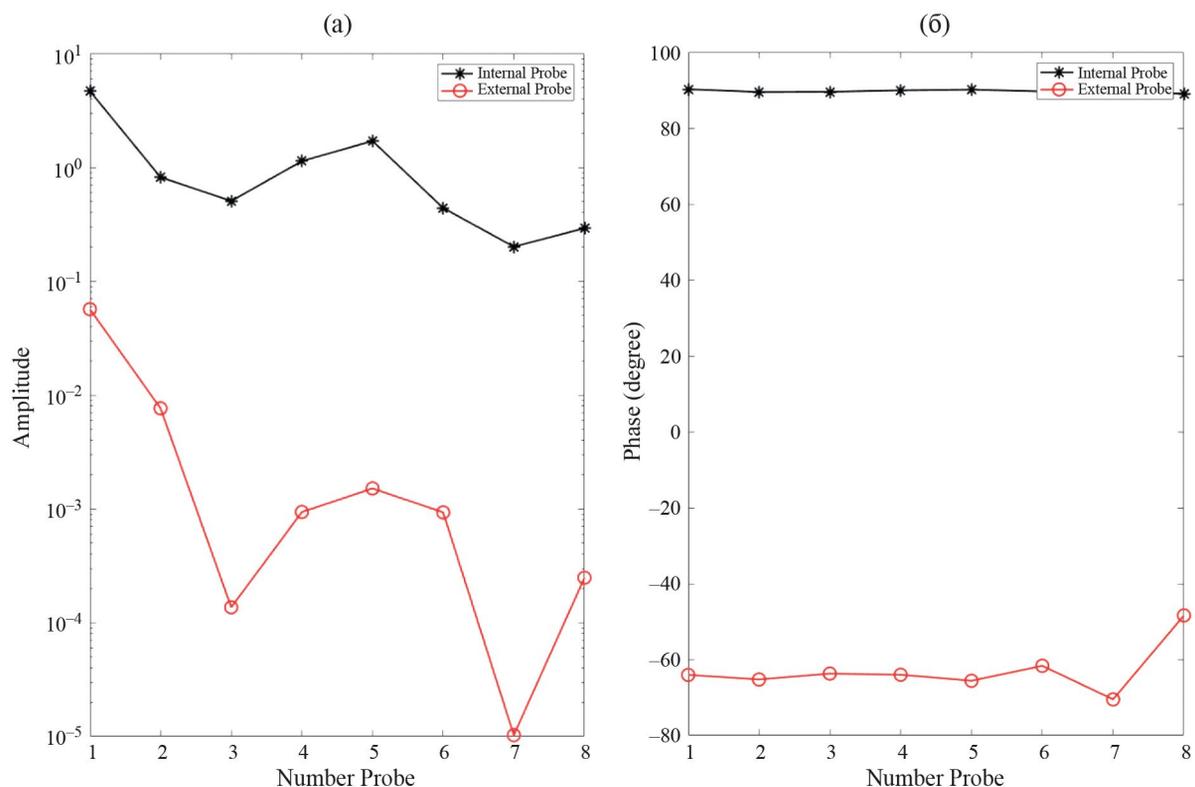


Рис. 18. Амплитуда в логарифмическом масштабе (а) и фаза (б) сигналов в ДФМП для тангенциальной компоненты магнитного поля. Черная кривая — датчики внутри ВК; красная кривая — датчики снаружи ВК.

Следует отметить, что хотя размещение ряда типов магнитных датчиков снаружи ВК технологически гораздо выгоднее, например, для обеспечения ремонтпригодности или трассировки сигналов датчиков до системы регистрации, однако при анализе различных видов МГД-неустойчивостей плазмы ВК практически полностью “экранирует” магнитные датчики, расположенные снаружи, не позволяя регистрировать частоты более 1 кГц. Таким образом, магнитные датчики могут быть установлены только внутри ВК, кроме того, эффективная площадь сечения NS датчика может быть значительно увеличена (с целью получения большей чувствительности) без риска уменьшения его полосы пропускания ниже частоты, определяемой влиянием ВК.

Использование сигналов магнитных датчиков в системах управления плазмой может привести к потере контроля над разрядом без соответствующего учета наведенного вихревого тока в ВК на сигналы этих датчиков.

Таким образом, так как ВК ТРТ накладывает существенные ограничения на осуществление быстрых магнитных измерений, возможный список типов магнитных датчиков ЭМД будет короче традиционного набора, обычно представленных на токамаках, а именно: петли для измерения полоидального потока; седловые петли; диамагнитные петли; двухкомпонентные магнитные зонды; пояса Роговского.

Для хорошей точности восстановления равновесия плазменного шнура необходимо значительное количество ДНО примерно равномерно размещенных вдоль полоидального обхода ВК, но их установке препятствуют горизонтальные патрубки ВК ТРТ, которые имеют значительные вертикальные размеры, поэтому для восстановления внешней границы плазмы необходимо наряду с сигналами ДНО использоваться и сигналы ДФМП.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены модельные численные расчеты, в которых анализировалось влияние вакуумной камеры ТРТ на амплитуду и фазу сигналов в магнитных датчиках, которые были расположены как внутри, так и снаружи вакуумной камеры.

Показано, что в датчиках напряжения обхода характерное время τ зависит от их положения в вакуумной камере ТРТ и изменяется от минимального значения $\tau \approx 32$ мс до максимального значения $\tau \approx 118$ мс. Такое различие во времени τ сигналов магнитных датчиков требует тщательного согласования сигналов в ДНО между собой, особенно на

динамической стадии разряда, когда в ВК наводятся большие вихревые токи.

Показано, что вакуумная камера ТРТ практически полностью “экранирует” сигналы в датчиках формы магнитной поверхности, расположенных снаружи вакуумной камеры. При этом ВК влияет не только на амплитуду сигналов, но и на их фазу при периодическом возмущении в плазме. Таким образом, результаты численных исследований позволяют заключить, что приоритетным является расположение ДФМП именно внутри вакуумной камеры ТРТ. Однако для более аккуратного определения местоположения и технических параметров магнитных датчиков, необходимо провести дополнительное математическое моделирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А. В., Коновалов С. В., Бондарчук Э. Н., Мазуль И. В., Родин И. Ю., Минеев А. Б., Кузьмин Е. Г., Кавин А. А., Карпов Д. А., Леонов В. М., Хайрутдинов Р. Р., Кукушкин А. С., Портнов Д. В., Иванов А. А., Бельченко Ю. И., Денисов Г. Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 970.
2. Кадомцев Б. Б. // УФН. 1967. Т. 91. С. 381.
3. Strait E. J. // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 023502.
4. Moret J.-M., Buhlmann F., Fasel D., Hofmann F., Tonetti G. // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 2333.
5. Edlington T., Martin R., Pinfold T. // Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72. P. 421.
6. Lee S. G., Bak J. G., Ka E. M., Kim J. Y., Hahn S. H. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 10F117.
7. Coccoresse V., Albanese R. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 4311.
8. Sushkov A. V., Belov A. M., Igonkina G. B., Kachkin A. G., Khayrutdinov E. N., Melnikov A. V., Sokolov M. M. // Fusion Engineering Design. 2019. V. 146. P. 383.
9. Никуфоров А. Ф., Уваров В. Б. Специальные функции математической физики. М.: Наука. 1978.
10. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988.
11. Kendall E. Atkinson. An Introduction to Numerical Analysis (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 1989.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Физматгиз, 1968.
13. Медведев С. Ю., Мартынов А. А., Коновалов С. В., Леонов В. М., Лукаш В. Э., Хайрутдинов Р. Р. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 998.

Simulations of TRT Vacuum Vessel Effect on the Magnetic Diagnostics System Sensor Signals

A. M. Belov^{a, b,*,**}, V. F. Andreev^a, A. V. Sushkov^a

^a National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123098, Russia

^b State Scientific Center of the Russian Federation “Troitsk Institute of Innovative and Thermonuclear Research”, Moscow, 108840, Russia

* e-mail: Belov_AM@nrcki.ru

** e-mail: abelov@triniti.ru

The results of model numerical calculations are presented, showing the effect of the TRT vacuum vessel on the amplitudes and phases of the magnetic sensors signals, which are located on the inner and outer vacuum vessel surfaces. It is shown that the characteristic times of loop voltage sensors considerably depend on their position on the TRT vacuum vessel. Therefore, their accurate mutual matching is required, especially in the dynamic stage of the discharge, when high eddy currents are induced in the vacuum vessel. The results of numerical calculations for the case of periodic disturbances in the plasma column are presented. They showed that the vacuum vessel almost completely shields the signals of the magnetic sensors located on the outer surface of the vacuum vessel. Moreover, it affects not only the amplitudes of magnetic sensors signals, but also their phases. Numerical studies brought us to conclusion that it is of priority to install the magnetic sensors just on the inner surface of the TRT vacuum vessel.

Keywords: tokamak with reactor technology, magnetic diagnostics, magnetic sensor, vacuum vessel, modeling, Kirchhoff equation, eddy current