

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КАЛИБРОВКИ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА МКВ-4

А. А. Шаталин, А. Е. Калинычев, Г. В. Карпов, С. С. Ломтев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

При моделировании высотных взрывов на стенде МКВ-4 установки «ИСКРА-5» внутри вакуумной камеры создается магнитное образование ловушечной конфигурации, называемое магнитной каверной, и исследуются протекающие в каверне магнитоплазменные процессы. Для создания каверны используется лазерный взрыв расположенной внутри камеры сферической мишени во внешнем квазистатическом соленоидальном магнитном поле, создаваемом расположенными снаружи камеры четырьмя катушками Гельмгольца. Разлетающаяся мишенная плазма раздвигает магнитное поле, в результате чего магнитные силовые линии приобретают конфигурацию, характерную для магнитной ловушки. Обычно в экспериментах используются два лазерных импульса с энергетикой до 300 Дж каждый. С помощью первого лазерного импульса создается магнитная каверна. Второй лазерный импульс, взаимодействующий с плоской металлической мишенью, используется для генерирования быстрых электронов и заполнения ими области магнитной каверны. В зависимости от целей и задач эксперимента параметры и конфигурация внешнего соленоидального магнитного поля могут быть разными. Требуемая напряженность квазистатического магнитного поля может изменяться от сотен эрстед до нескольких килоэрстед. Требуемая исходная конфигурация магнитного поля может варьироваться от распределения с максимумом в центре камеры до распределения с минимумом в средней плоскости, характерного для пробочной конфигурации. Для правильной трактовки результатов экспериментов с лазерной плазмой необходимо более точное знание параметров исходного распределения магнитного поля, которые могут быть получены с помощью достаточно миниатюрных откалиброванных магнитных датчиков. Решение вопроса калибровки магнитных датчиков неоднозначно, поскольку создание специального калибровочного стенда потребует немалых затрат, сравнимых со стоимостью самого стенда МКВ-4. Поэтому было решено провести сравнительно небольшую доработку стенда для проведения на нем калибровочных измерений. Существо доработки состоит во включении последовательно с катушками Гельмгольца одного или нескольких специальных соленоидов, внутри которых могут располагаться калибруемые датчики. Индуктивности соленоидов должны быть достаточно малыми, чтобы не оказывать суще-

ственного влияния на токи в катушках Гельмгольца. Погонное количество витков в соленоидах должно быть таким, чтобы напряженность магнитного поля внутри соленоидов примерно совпадала бы с напряженностью поля внутри рабочего объема камеры. Токи в цепях соленоидов и катушек Гельмгольца могут измеряться с помощью стандартных серийно выпускаемых токовых шунтов. При таком подходе существо работы сводится к измерению электрических параметров стенда МКВ-4, правильному выбору калибровочных соленоидов и постановки достаточно корректных измерений протекающих по ним токов.

Описание стенда МКВ-4

Стенд МКВ-4 представляет собой достаточно капитальное сооружение, располагаемое в оптическом зале каналов № 7 и 8 установки «ИСКРА-5» [1]. Фотографии стенда представлены на рис. 1 и 2. Основным элементом стенда является вакуумная камера с окнами для ввода лазерного излучения и диагностики. Снаружи вакуумной камеры располагаются четыре катушки Гельмгольца, соединенные с батареей магнитного поля.

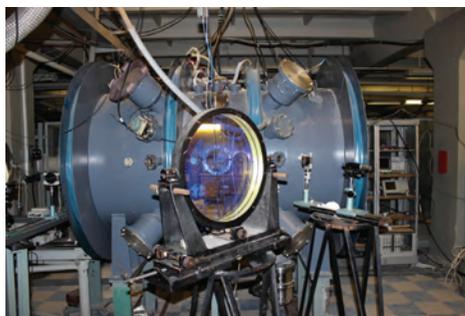


Рис. 1. Камера стенда МКВ-4

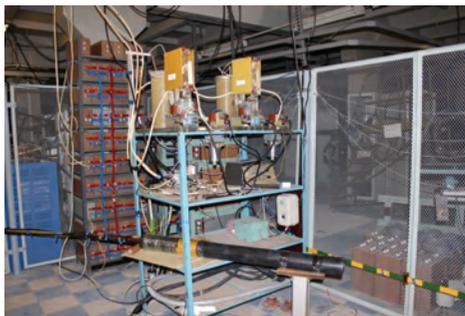


Рис. 2. Батарея магнитного поля

Поперечное сечение вакуумной камеры МКВ-4 с катушками Гельмгольца схематично показано на рис. 3.

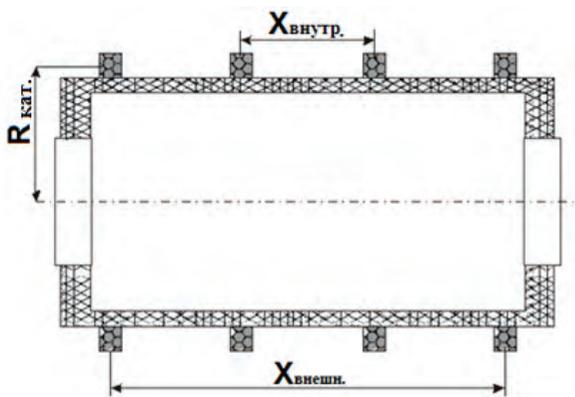


Рис. 3. Поперечное сечение камеры с катушками Гельмгольца:

Здесь $X_{внутр}$ и $X_{внешн}$ — расстояния между центрами внутренних и внешних катушек Гельмгольца, $R_{кат}$ — средний радиус катушки. Данные величины соответственно равны:

$$X_{внутр} = 0,538 \text{ м} \quad X_{внешн} = 1,888 \text{ м} \quad R_{кат} = 0,6435 \text{ м}$$

Вакуумная камера стенда МКВ-4 выполнена из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т. Внешний диаметр камеры — 1110 мм, толщина стенки камеры — 5 мм. Располагаемые снаружи камеры катушки Гельмгольца выполнены в виде трехзаходных спиралей из изолированных медных проводов с суммарным сечением $3 \times 7 \text{ мм}^2$. Спирали намотаны непосредственно на корпус камеры и уложены в металлические кожухи. Средний радиус катушки — 643,5 мм. Две внутренние и две внешние катушки Гельмгольца, попарно объединены между собой; каждая пара соединена со своей секцией конденсаторной батареи. Возможны последовательное и параллельное пар катушек. Конденсаторная батарея выполнена с использованием конденсаторов К41И-7 (5 кВ, 100 мкФ), соединенных в виде двух секций по 52 конденсатора в каждой. Емкости секций C_1 и C_2 составляют

$$C_1 = C_2 = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ф.}$$

Зарядные устройства позволяют заряжать секции конденсаторной батареи от 2 до 5 кВ за время не более 2 минут. Максимальный энергозапас одной секции — 70 кДж.

Расчет индуктивностей катушек Гельмгольца

Индуктивность отдельной катушки может быть рассчитана по известной формуле [2],

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} N_i^2 d \psi F, \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, N_i — количество витков в i -ой катушке, d — средний диаметр катушки, ψ и F — табличные коэффициенты, зависящие от геометрии катушек. Катушки были изготовлены сравнительно давно и к моменту выполнения настоящей работы не сохранились данные о числе витков N_i в каждой катушке. Наиболее простым способом определения N_i без разборки катушки представляется нахождение числа витков по ее активному сопротивлению R . Количество витков в отдельной катушке,

$$N_i = \frac{RS_{общ}}{\sigma^{-1} \pi D_{кат}}, \quad (2)$$

где $S_{общ}$ — суммарная площадь поперечного сечения трехзаходной катушки, σ^{-1} — удельное сопротивление проводника (для меди $\sigma^{-1} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$). $D_{кат}$ — средний диаметр катушки. Зная геометрию катушек и активные сопротивления R , нетрудно определить числа витков N_i в каждой катушке. Найденные значения N_i приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество витков в катушках камеры стенда МКВ-4

Номер катушки	1	2	3	4
Активное сопротивление R , Ом	0,614	0,643	0,652	0,671
Количество витков, N_i	182	191	194	199

Входящие в (1) коэффициенты ψ и F определяются из таблицы (6-3) [2] в зависимости от геометрических параметров ϕ и ρ определяемых размерами катушек,

В соответствии с обозначениями рис. 6, a — ширина, r — толщина, а d — средний диаметр катушки Гельмгольца.

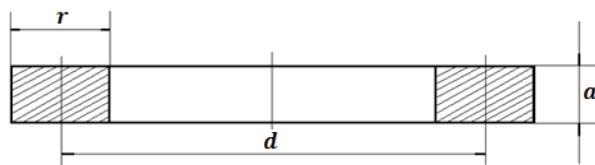


Рис. 4. Геометрия магнитной катушки

Размеры катушки для нашего случая,

$$d = 1,287 \text{ м} \quad a = 0,085 \text{ м} \quad r = 0,17 \text{ м.}$$

По таблице (6-3) [2] находим соответствующие им значения ψ и F ,

$$\rho = \frac{r}{d} = \frac{0,177}{1,287} = 0,1375 \rightarrow \psi = 36,14,$$

$$\frac{1}{\phi} = \frac{a}{r} = \frac{0,085}{0,177} = 0,48 \rightarrow F = 0,86.$$

Из (1) можно найти индуктивности каждой катушки. Полученные значения индуктивностей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанные индуктивности катушек

Номер катушки	1	2	3	4
L , мГн	66,42	72,84	74,89	79,32

Для уточнения значений индуктивности использовался экспериментальный метод по кривым напряжения $U(t)$ на выходных клеммах конденсаторной батареи, измеряемым с помощью высокоомного делителя. Место включения высокоомного делителя напряжения схематично показано на рис. 5.

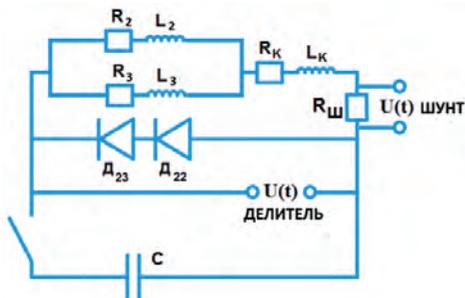


Рис. 5. Измененная электрическая схема запитки катушек Гельмгольца

Относительное различие экспериментальных и расчетных данных по индукностям не превышает $\pm 4\%$. Приведенная на рис. 5 электрическая схема, по существу, иллюстрирует включение катушек Гельмгольца на стенде МКВ-4. Изменения этой схемы, необходимые для проведения калибровки, состоят во включении дополнительного соленоида L_k и измерительного токового шунта $R_{ш}$. В остальном все элементы схемы соответствуют изначально используемым на стенде МКВ-4. Здесь C – емкость секции конденсаторной батареи, через L_2 , R_2 и L_3 , R_3 обозначены индуктивности и активные сопротивления отдельных катушек. D_{22} и D_{23} – низкочастотные диоды типа Д233-500-44. Последовательно соединенная пара диодов $D_{22} - D_{23}$ выполняет роль крубарзамыкателя, предотвращающего перезарядку секции конденсаторной батареи. Благодаря этим диодам, обеспечивается однополярный импульс тока в магнитных катушках. Секция конденсаторной батареи выполнена с использованием 52 конденсаторов К41И-7 (5кВ, 100 мкФ).

Описание калибровочного соленоида. Результаты калибровки

Согласно результатам расчета и измерений, индуктивности катушек Гельмгольца составляют ~ 70 мГн. Включение в цепь разряда батареи калибровочного соленоида индуктивностью L_k на один-два порядка меньшей величины не сильно повлияет на параметры токового импульса в магнитных катуш-

ках. Исходя из этого, были выбраны параметры калибровочного соленоида, представляющего собой однозаходную катушку из медного изолированного провода диаметром 4 мм намотанного на полиэтиленовую трубу диаметром 110. Длина соленоида 1135 мм, количество витков – 266. Активное сопротивление соленоида 0,25 Ом, индуктивность 0,745 мГн. Для токовых измерений использовался промышленно выпускаемый манганиновый шунт 75ШИП-200А, рассчитанный на максимальный 200 А и имеющий номинальное сопротивление $R_{ш} = 375$ мкОм. Калибруемые датчики располагались в средней плоскости внутри соленоида. Процедура калибровки опробовалась на магнитных датчиках двух типов.

- Изготавливаемый в лабораторных условиях индукционный датчик, представляющий собой катушку из 15 витков провода МГТФ с диаметром изоляции 0,3 мм намотанного на диэлектрический корпус с внешним диаметром 16 мм. Чувствительность датчика находится расчетным способом. Измеряемая кривая зависимости $H(t)$ определяется путем интегрирования осциллографического сигнала.

- Промышленно выпускаемый датчик Холла, чувствительность которого указывается в паспорте. Датчик заключен в прямоугольный пластиковый корпус со сторонами $5 \times 5 \times 2$ мм³ и тремя электрическими контактами. Наибольшая плоская поверхность корпуса ориентирована перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

Напряженность магнитного поля в центре соленоида может быть рассчитана по классической формуле

$$H = \frac{N}{l} I(t), \quad (3)$$

где N – количество витков в калибровочном соленоиде, l – его длина, $I(t)$ – ток в соленоиде, измеряемый с помощью шунта. Таким образом, зависимость от времени напряженности магнитного поля в центре соленоида может быть найдена тремя независимыми способами. На рис. 6 приведены соответствующие кривые $H(t)$.

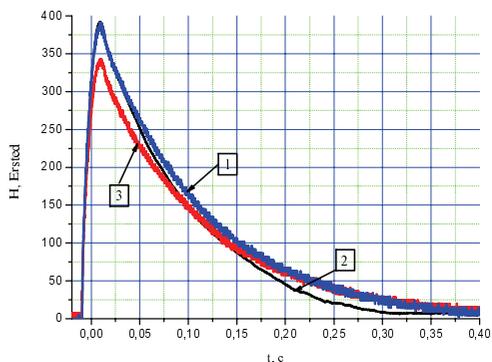


Рис. 6. Кривые напряженности, полученные тремя независимыми способами: 1 – напряженность, рассчитанная по току в соленоиде; 2 – напряженность, полученная интегрированием сигнала индукционного датчика; 3 – напряженность Холла, измеренная датчиком Холла

Заключение

Реализована возможность использования стенда МКВ-4 для прецизионной калибровки датчиков магнитного поля. Для этого выполнена доработка электрической схемы стенда, состоящая в использовании дополнительного соленоида, включенного в цепь разряда батареи магнитного поля. Калибруемые датчики располагаются внутри дополнительного соленоида; ток в цепи соленоида измеряется с использованием прецизионного манганинового шунта. Индуктивность соленоида на два порядка меньше индуктивностей катушек магнитного поля, благодаря

чему влияние его на разряд батареи магнитного поля пренебрежимо мало. Используя стенд МКВ-4, проведена калибровка индукционных датчиков и магнитных датчиков типа датчиков Холла.

Литература

1. Анненков В. И., Безуглов В. Г., Бессараб А. В. и др. Новые возможности «Искра-5» // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 6. С. 508–510.
2. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.