

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Куршаков Владислав Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение флуктуаций магнитного поля на установке ГОЛ-NB

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 18307

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. Поступаев В. В.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

ассистент Краснопевцев С. Е.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Аннотация

В данной работе рассматривается создание измерительной системы для исследования флуктуаций магнитного поля, вызванных плазменными процессами, на открытой многопробочной ловушке ГОЛ-NB. Описаны материалы катушки и результаты её изготовления. Расчитана также её индуктивность и постоянная времени. Проводится оценка её работоспособности на стенде с катушками Гельмгольца. Показано допустимое сходство с эталонным сигналом. Выявлена независимость периода в катушке от напряжений подаваемых на катушки Гельмгольца. Приведены первые измерения компонент магнитного поля на установке.

Ключевые слова: плазма, диагностика плазмы, многопробочная ловушка.

Оглавление

1. Введение.....	3
1.1. В общем о плазменных ловушках.....	3
1.2. Постановка задачи	3
2. Теоретическая часть	4
2.1. О возникающих флуктуациях	4
2.2. Методы измерения магнитного поля.....	4
3. Экспериментальная часть	5
3.1. Описание установки	5
3.2. Конструкция датчика	6
3.2.1. Требования к датчику	6
3.2.2. Описание конструкции датчика.....	7
3.3. Схема измерений на стенде	10
3.4. Результаты экспериментов на стенде	12
3.5. Результаты измерений на установке.....	13
4. Результаты	15
5. Список литературы	16

1. Введение

1.1. В общем о плазменных ловушках

Плазма открывает возможность для получения термоядерной энергии за счёт слияния плавающих в ней ядер частиц, для этого необходимо её создать и удерживать достаточно долгое время, чтобы получить требуемую энергию. Создание плазмы не является проблемой, ведь это результат дуговых разрядов, которые уже умеют создавать. Для удержания плазмы на Земле используются магнитные ловушки. В них стартовая, холодная плазма нагревается и далее – исследуется.

Все магнитные ловушки могут быть разделены на два основных класса – открытые и замкнутые. В Новосибирском Институте ядерной физики изучают действие открытых магнитных ловушек. Действующие на данный момент ловушки различаются по принципу удержания плазмы: многопробочные, в которых плазма удерживается в переменном магнитном поле различной конфигурации; газодинамические, в которых плазма удерживается в широкой секции однородного поля за счет того, что на её концах создается сильное магнитное поле, являющееся пробкой для плазмы; также действует ловушка с геликоидальным полем.

Интеграция многопробочной и газодинамической ловушки на основе ГОЛ-3 привела к началу работы над установкой ГОЛ-NB [1]. Общее магнитное поле в установке состоит из медленно меняющегося поля от катушек магнитной системы, удерживающей плазму, и быстро меняющихся полей, генерируемых токами, текущими по плазме. Причина возникновения таких токов может быть неравномерная температура плазмы, конвекция, а также механическое движение плазмы. Именно эти флуктуации и представляют интерес для этой работы.

1.2. Постановка задачи

Подобные измерения позволят больше сказать о структуре периферии плазменного шнура при нагреве плазмы нейтральными частицами, а также о том, что происходит в моменты включения и завершения работы установки.

На предыдущей версии установки проводилось схожее исследование [2], опираясь на него и указания о неоднородности плазменного шнура можно ожидать наблюдение «струек тока» в холодной плазме на этапе включения и стабильный плазменный шнур на более поздних этапах. Конструкционно на датчик для установки ГОЛ-3 налагались более жёсткие условия в силу того, что он помещался в импульсную установку, датчик для этой работы несколько упрощён.

В этой работе основной целью стоит создание измерительного датчика для исследования флуктуаций магнитного поля на установке ГОЛ-NB, проведение проверки работоспособности датчика, а также получение первых измерений на установке. Для решения данной задачи было необходимо спроектировать и подготовить магнитный датчик, способный измерять две компоненты магнитного поля: B_z и B_ϕ , получить тестовый сигнал с катушек Гельмгольца и провести его первичный анализ, подобрать место и установить магнитный зонд на установку.

2. Теоретическая часть

2.1. О возникающих флуктуациях

Кроме уже отмеченных причин возникновения флуктуаций есть ещё одна – вмороженность магнитных линий в плазму [3]. За счёт того, что высокотемпературная плазма становится хорошим проводником электрическое поле в ней старается быть направленно так, чтобы через любой замкнутый контур, движущийся с объёмом плазмы, сохранялся одинаковым поток магнитного поля, что можно также можно интерпретировать как приклеенность магнитных линий. Это, в совокупности с механическим распространением по системе, может также приводить к созданию флуктуаций на периферии плазменного шнура.

2.2. Методы измерения магнитного поля

Для рассматриваемой задачи принципиально доступно два метода измерений магнитного поля: индукционный и гальвомагнитный [4]. Первый способ основывается на законе Фарадея. В магнитное поле помещается катушка с известной

геометрией и проводится измерение наведённого в ней ЭДС. Зная, что ЭДС $\mathcal{E}$ пропорциональна производной магнитного потока Φ :

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt},$$

что и является законом Фарадея, и учитывая геометрию катушки (её индуктивность L), можно говорить о величине искомого магнитного поля в данной точке, ведь ЭДС порождает ток I по закону самоиндукции:

$$\mathcal{E} = L \frac{dI}{dt}$$

Другой способ основывается на эффекте Холла. В простейшем рассмотрении устройство такого датчика выглядит следующим образом. На пластину, через которую протекает ток направляется магнитное поле, часть электронов отклоняется от исходного направления и на боковых поверхностях бруска датчика возникает разность потенциалов, исходя из которой может быть вычислено значение магнитного поля.

В этой работе используется индукционный метод измерения. Это обусловлено необходимостью исследовать быстрые изменения магнитного поля, а также тем, что датчики ЭДС Холла имеют ограничения, связанные с рабочим интервалом температур.

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание установки

Исследование будет проводиться на открытой плазменной ловушке ГОЛ-NB (ГОЛ – аббр. от гофрированная открытая ловушка) Новосибирского Института ядерной физики, которая на данный момент имеет вид, отображенный на рисунке 1 [5]. Как уже было сказано, ловушка будет соединять в себе ловушку многопробочного и газодинамического типа. В данный момент газодинамическая секция не установлена, однако уже сейчас проводятся первые эксперименты для оценки остаточного количества плазмы в установке.

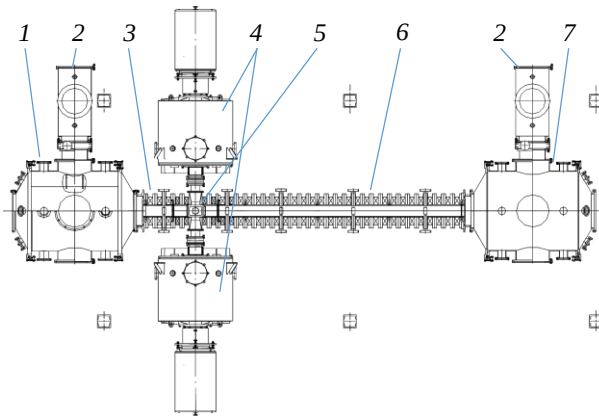


Рис. 1. Схема и фотография стартовой конфигурации установки ГОЛ-NB: 1 – бак расширителя магнитного потока с плазменной пушкой; 2 – модуль системы вакуумной откачки; 3 и 6 – секции сильного поля; 4 – инжекторы атомарных пучков водорода; 5 – секция для присоединения инжекторов; 7 – бак выходного расширителя магнитного потока с плазмоприемником. Расстояние между колоннами 3 м

превосходить 1 см^3 в объёме и заходить вглубь канала для плазмы более чем на 1 см, также каркас катушки должен был быть изготовлен из диэлектрического материала, для уменьшения наводок, не предсказанных геометрией датчика, а его крепление к окну установки должно быть выполнено из немагнитного материала.

В этой установке стартовая плазма нагревается с помощью двух инжекторов нейтральных частиц (neutral beams, NB) с мощностью 0,75 МВт. С двух сторон от инжекторной системы находятся два соленоида с переменным магнитным полем, $B_{\text{max}} = 4,5 \text{ Тл}$, $B_{\text{min}} = 3,4 \text{ Тл}$ – многопробочные секции. Соленоид справа несколько больше, чем будет использоваться на установке, сейчас он содержит 34 катушки с периодом 11 см и суммарной длиной $\sim 3,8 \text{ м}$. Основная часть неоднородностей возникает в области плазменной пушки, там и будет расположен датчик.

3.2. Конструкция датчика

3.2.1. Требования к датчику

При создании датчика налагались определённые условия, связанные с сохранением конфигурации плазмы и вакуума в системе. Датчик не должен был

Также было необходимо окружить датчик защитным слоем, чтобы сохранить чистоту вакуума, обеспечить механическую и температурную защиту для датчика.

3.2.2. Описание конструкции датчика

Для измерения магнитного поля был собран датчик на основе катушки индуктивности, главная часть которого показана на рисунке 2. Головка измеритель-

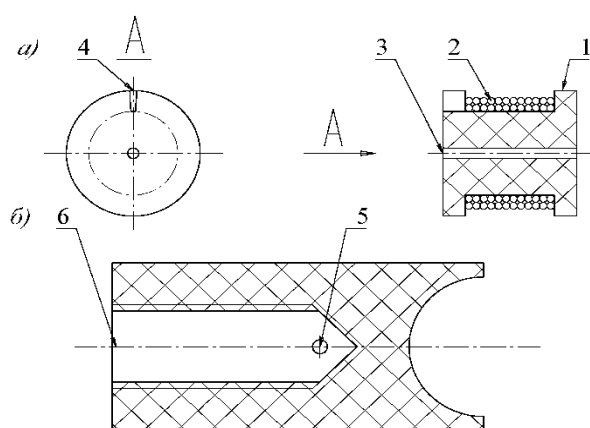


Рис. 2. Чертёж головки измерительного датчика:

а) каркас катушки индуктивности в двух проекциях: 1 – каркас; 2 – проволока из меди; отверстия 3 и 5 сделаны для скрепления частей; паз 4 на виде А предусмотрен для вывода проводов обмотки;

б) крепление катушки: 6 – отверстие, служащее для соединения катушки со шпилькой.

Детали на рисунке не в масштабе относительно друг друга и размеров страницы. (детали относительно оси, указанной на рисунке 2б).

Шпилька, соединяющая вращающее устройство и изображенную головку имеет длину 20 см и изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72). Также для соединения вращающего устройства и описанной шпильки

ного датчика изготовлена из диэлектрика РЕЕК. На неё намотано 30 витков проволоки (в два слоя) диаметром 0,25 мм из меди с каптоновой плёнкой. Количество витков, материал и диаметр провода определяет постоянную времени для нашей системы, которая отвечает через какое время амплитуда в цепи уменьшается в e раз при релаксации [6]. В качестве формы каркаса для катушки был выбран цилиндр, т.к. для тела вращения можно точно рассчитать площадь и сама форма проще для изготовления.

Для того, чтобы измерять две компоненты магнитного поля: B_z и B_ϕ использовано вращающее устройство, позволяющее ориентировать катушку относи-

изготовлен вал, представляющий собой полый цилиндр из той же стали с двумя отверстиями под винты для укрепления его на установке.

Защитный слой был выполнен из тонкой фольги нержавеющей стали, толщиной 20 мкм, и скреплён точечной сваркой. Однако, при окружении датчика экраном за счёт скин-эффекта максимально возможная наблюдаемая амплитуда уменьшается [7], поэтому были проведены предварительные расчеты амплитудно-частотной характеристики без экрана для оценки (см. рис. 3).

Для этого сначала была рассчитана индуктивность катушки по формуле [8]:

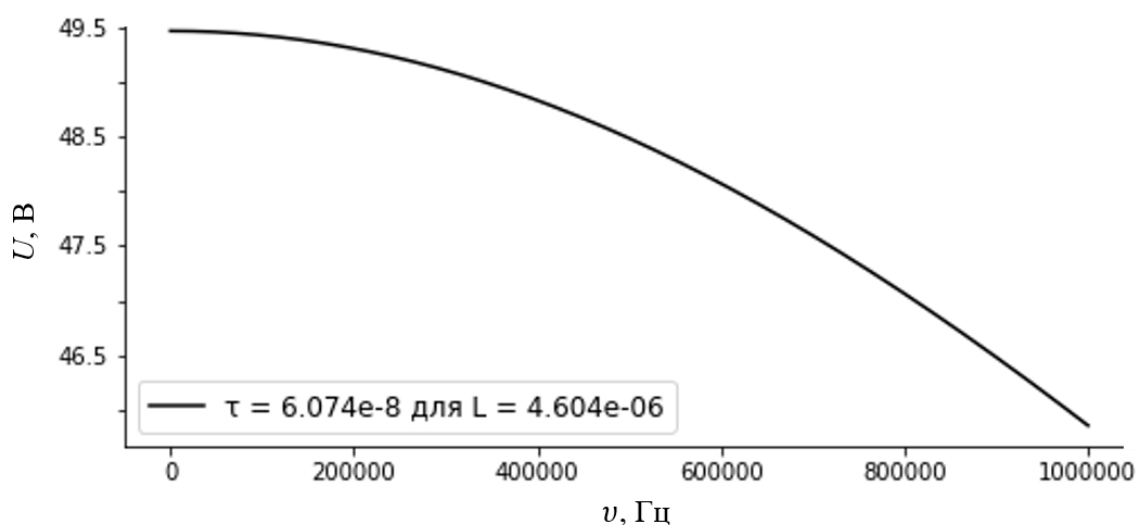


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика сигнала: τ – постоянная времени; L – индуктивность катушки

$$L_p = L_0 - \Delta ,$$

где L_0 – индуктивность идеальной катушки (рассчитывается как для длинного соленоида):

$$L_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} w^2 d \Phi ,$$

здесь μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, w – число витков соленоида (у нашего их 30), d – средний диаметр соленоида (в нашем случае это 8,25 мм), Φ – численный коэффициент [8, стр. 248-249], определяющийся отношением длины катушки к среднему диаметру.

Второе же слагаемое Δ - описывает толщину катушки и вычисляется так:

$$\Delta = \frac{\pi \mu_0 w^2 d}{24 \alpha^2} \left(2 \alpha \rho (1 - \rho) - \rho^2 \left(\frac{2}{3\pi} \left(\ln \frac{4}{\rho} - \frac{23}{12} \right) + \frac{\beta}{3} \right) \right),$$

где $\alpha = \frac{l}{d}$, $\beta = \frac{1}{\sqrt{1+4\alpha^2}}$, $\rho = \frac{t}{d}$, тут l – длина катушки (ограничена каркасом и составляет 8 мм), t – толщина намотки. Расчётная индуктивность составила $4,6 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Зная индуктивность и полное сопротивление цепи R можно рассчитать собственное время катушки [6, стр. 168]:

$$\tau = \frac{L_p}{R} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ (с)}$$

В собранном виде вся измерительная система представлена на следующем рисунке (см. рис. 4). Правый рисунок выполнен в масштабе относительно корпуса

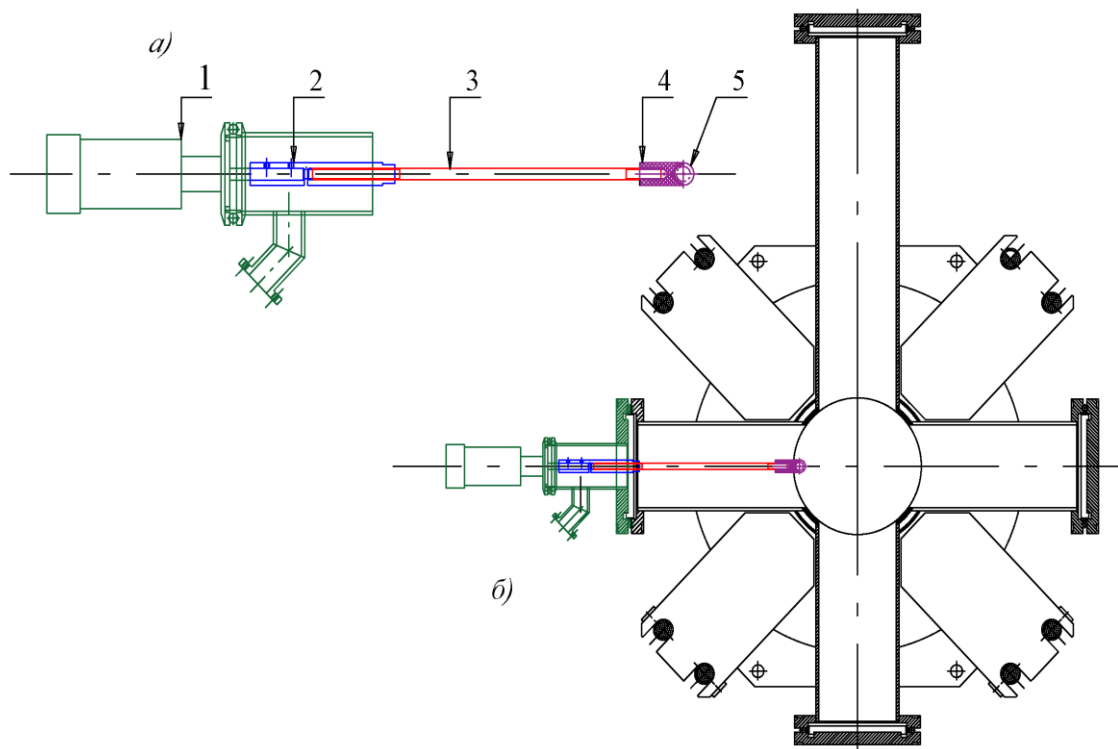


Рис. 4. Макет магнитного зонда:

а) собранный макет магнитного зонда: 1 – наружная часть, позволяющая изменять положение катушки вращением вдоль выделенной оси; 2 – вал, соединяющий наружную и внутреннюю части; 3 – шпилька; 4 и 5 – головка датчика;

б) зонд, установленный на ГОЛ-NB

установки, центральное отверстие имеет диаметр 15 см. Расчётные требования предусматривают выполнение поставленных выше ограничений.

В окончательном виде, после намотки провода, спайки и сборки, катушка представлена на рисунке 5. Ноль выставлен так, что ориентация катушки перпендикулярна изображённому на рисунке 5а).

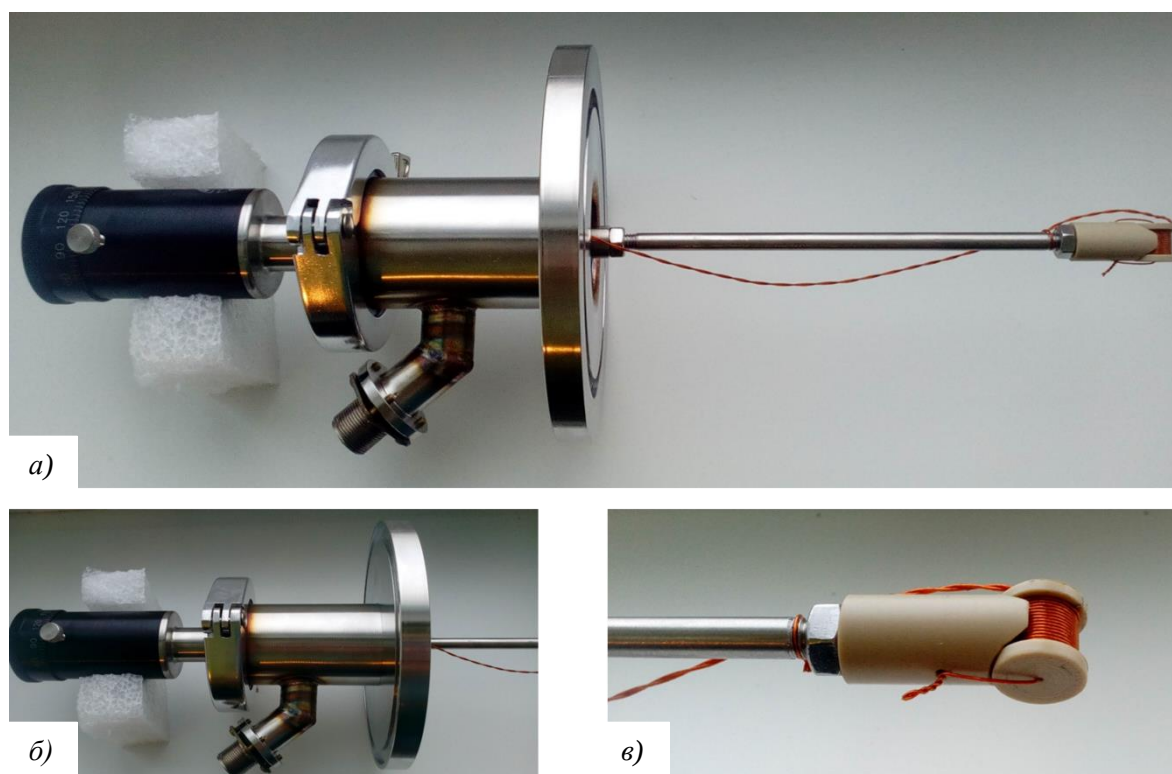


Рис. 5. Изготовленная катушка без защитного экранчика:

а) общий вид установки; б) вращающий механизм и часть, обеспечивающая возможность присоединить установку к вакуумной камере; в) головка измерительного датчика

3.3. Схема измерений на стенде

На рисунке 6 описана схема измерения на тестовом стенде. Левая часть схемы (отмечена как а)) создаёт в катушках Гельмгольца (две катушки по 30 витков из провода диаметром 1 мм и диаметром сердечника 160 мм) импульсное поле следующим образом: сначала от напряжения питания $U_{\text{пит}}$ через резистор R_1 (его сопротивление сделано большим, чтобы в случае неполадок источник питания не испортился) заряжается главный конденсатор C_1 . Далее производится запуск, замыканием ключа K , при этом загорается сигнальная лампа L , через 100 мкс на

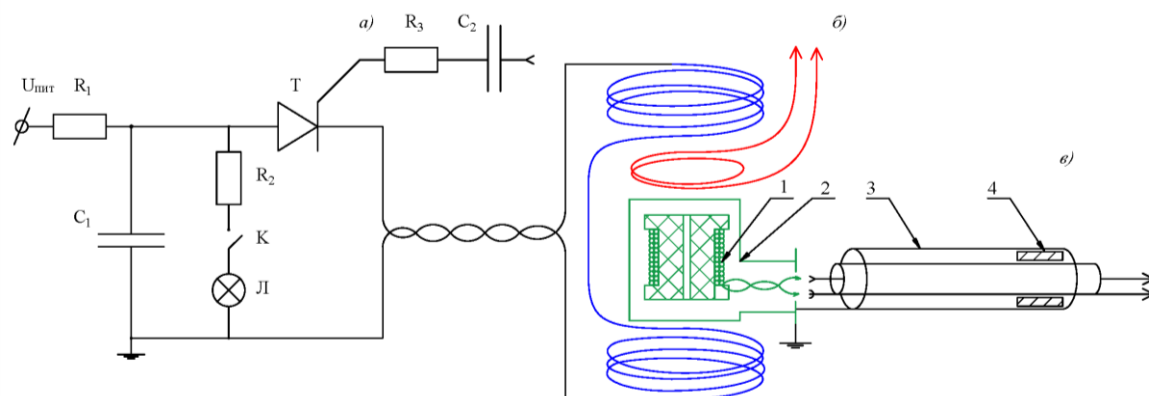


Рис. 6. Схема измерений на стене:

а) эквивалентная цепь системы, подающей импульс тока на катушки Гельмгольца: $U_{\text{пит}}$ – напряжение от источника; R_1 – зарядное сопротивление; C_1 – основная ёмкость (100 мкФ, 500 В); R_2 – разрядное сопротивление; K – ключ замыкания; $Л$ – лампа индикации запуска; T – тиристор; R_3 – согласующее сопротивление запуска (75 Ом); C_2 – гальваническая развязка импульса запуска; схема заканчивается катушками Гельмгольца;

б) эталонная катушка;

в) магнитный датчик: 1 – катушка; 2 – защитный экранчик; 3 – экранирующая внешняя оплётка; 4 – ферритовый синфазный фильтр;

ёмкость C_2 подаётся импульсный сигнал, при этом цепь замыкается и через R_3 начинает течь ток (величина сопротивления подобрана так, чтоб ток успел распространиться по всей цепи за известное время). Тиристор T начинает проводить и ёмкость C_1 разряжается через R_2 на катушки Гельмгольца. Катушки Гельмгольца, как известно, создают в центре однородное магнитное поле, эти катушки могут создать однородное поле в шаре ~ 3 см, куда заведомо попадает наш датчик.

Эталонная катушка б)(10 витков из того же провода с сердечником 92 мм) служит для проверки измерений, полученных с нашей катушки в)(выводы подключены к осциллографу Tektronix 2004B). Магнитный датчик в целом был описан выше, сейчас отметим то, что он присоединяется к осциллографу посредством коаксиального кабеля с дополнительной внешней оплёткой. Также на кабель надеты ферритовые кольца, чтобы не пропускать наводки от внешних полей

3.4. Результаты экспериментов на стенде

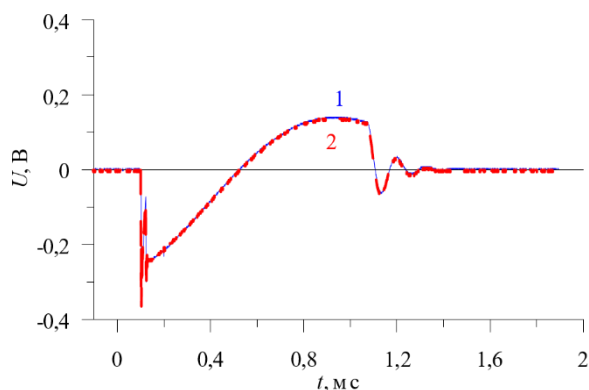


Рис. 7. Сравнение формы полученных напряжений на эталонной (1) и изготовленной (2) катушках

На рисунке 7 представлено сравнение формы сигнала эталонной катушки 1 и нормированного сигнала 2 (показан штриховкой) от изготовленной катушки (нормировка производится по экстремумам, где вклад шумовых амплитуд наименьший). Стоит отметить пару положений: первое - видно, что весь сигнал от изготовленной катушки смещён вниз, это может возникать от неконтролируе-

мых наводок, исходящих от окружения; второе – скачок при запуске установки, это систематическая ошибка. Она связана с тем, что часть тока с тиристора проходит на катушку в момент импульса. Зная геометрию эталонной катушки (описана выше) и изготовленной можно достаточно просто оценить правильность измерений:

$$\frac{U_{\text{эт}}}{U} \propto \frac{N_{\text{эт}} d_{\text{эт}}^2}{N d^2}$$

в этом эксперименте это отношение равно 1,09. Такая ошибка, скорее всего,

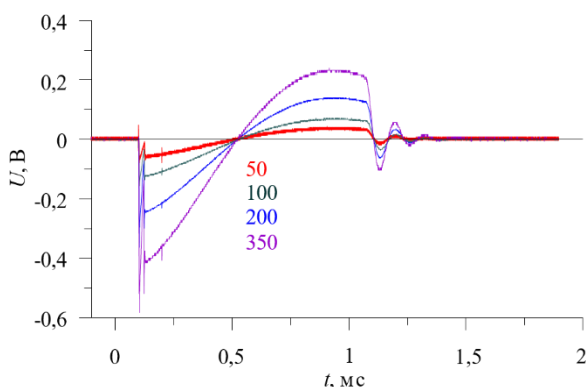


Рис. 8. Зависимость напряжений на изготовленной катушке от питающего напряжения: сверху вниз соответственно: 350 В, 200 В, 100 В, 50 В

возникает от того, диаметр катушки больше пространственных размеров области однородного поля.

На рисунке 8 показана зависимость напряжений на изготовленной катушке от напряжения питания. На каждом из графиков видны характерные скачки в начале, также любопытно отметить то, что все графики пересекаются в одной

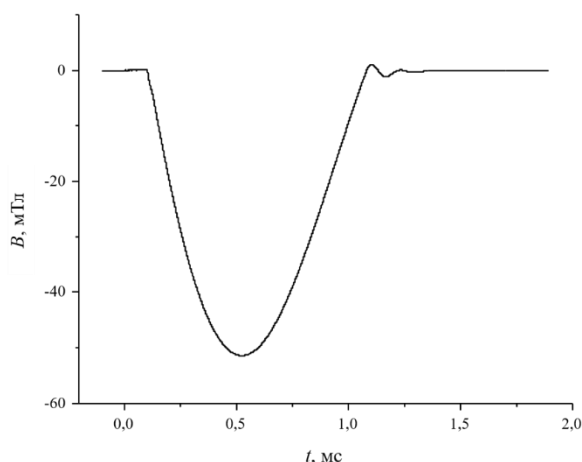


Рис. 9. Магнитное поле в изготовленной катушке, полученное на стенде

перед интегрированием весь график был поднят на среднее смещение от нуля, чтобы убрать погрешность. Заметно, что первая часть, хорошо напоминает синусоидальный сигнал, дальше же он несколько спрямляется, что определяется неидеальностью контура, подключённого к катушкам Гельмгольца.

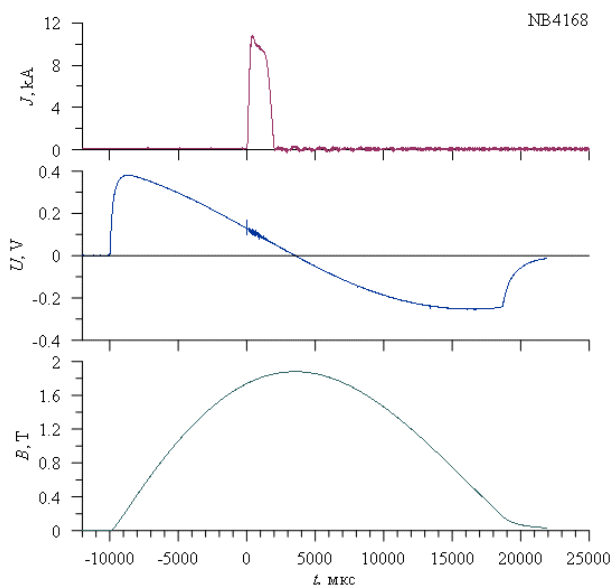


Рис. 10. Осциллограммы сигналов, сверху вниз: ток разряда плазменной пушки, сигнал магнитного зонда в ориентации измерения продольной компоненты магнитного поля, вычисленная по сигналу динамика магнитной индукции

точке. Это значит, что период наблюдаемых сигналов сохраняется, независимо от изменения питающего напряжения. Также можно заметить, что график для 50 В шире остальных, это может быть потому, что в соседней комнате проводился эксперимент и в нашей системе появилась от этого наводка. Приведём также график интеграла напряжения (см. рис. 9), т.е. фактически – магнитное поле. Перед

3.5. Результаты измерений на установке

По проведённой серии измерений продольной компоненты поля B_z видно, что датчик исправен и показывает ожидаемые результаты: на рисунке 10 видно, что максимальное магнитное поле $\sim 1,8$ Тл, что соответствует максимальному полю в магнитных катушках системы.

Искажение в $t = 0$ связано с тем, что по корпусу установки в момент запуска протекают токи, создающие наводки.

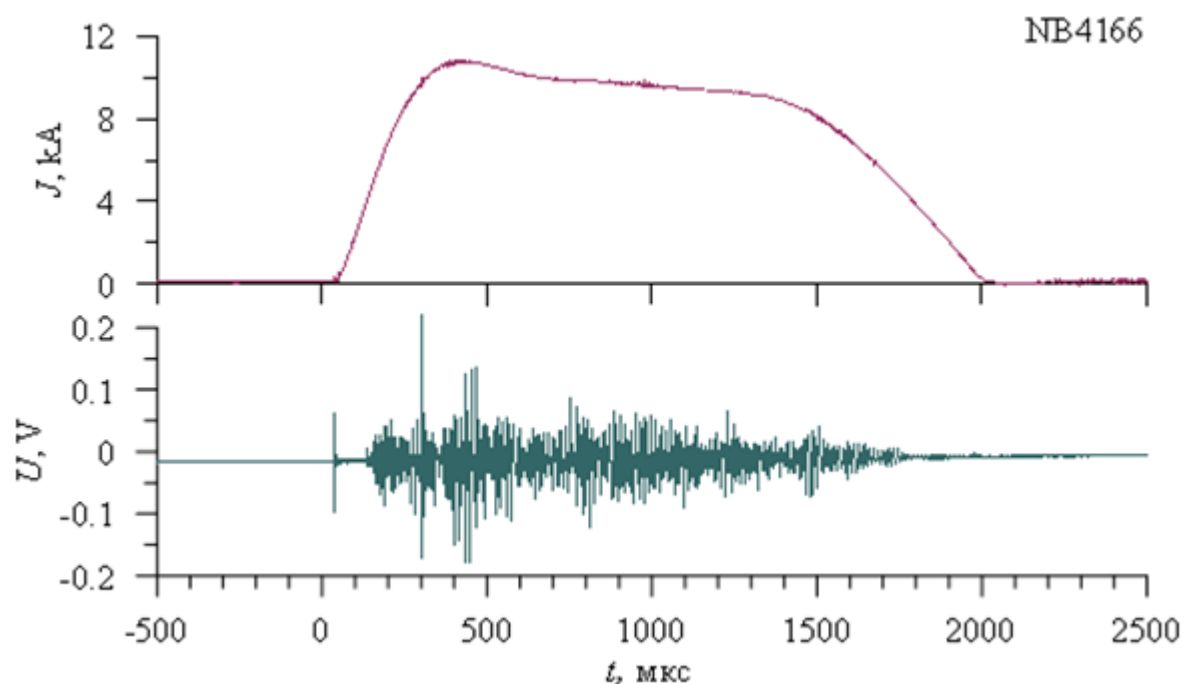


Рис. 11. Осциллограммы сигналов, сверху вниз: ток разряда плазменной пушки, сигнал магнитного зонда в ориентации измерения азимутальной компоненты магнитного поля.

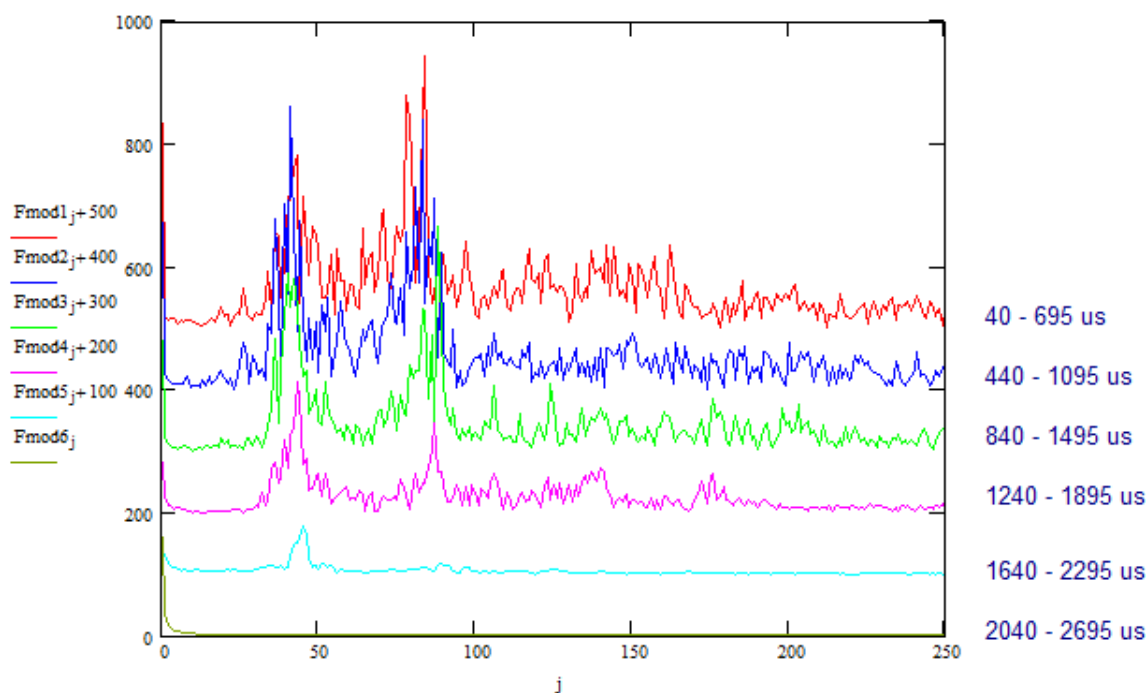


Рис. 12. Фурье-спектры флуктуаций азимутального поля (j – номер гармоники) в разные интервалы по времени, по выборке 2048 точек

Интерес сейчас представляют измерения азимутальной компоненты поля B_ϕ . На рисунке 11 показано сравнение тока разряда плазменной пушки и первого измерения азимутальной компоненты магнитного поля на установке. Из Фурье-анализа сигнала (см. рис. 12) видно, что в плазме наблюдаются гармонические флуктуации этой компоненты поля с несколькими модами (напоминающие бие-ния). На более поздних этапах остаётся, видимо, самая легко-возбуждаемая частота. Дальнейшая обработка и анализ измерений будут проводиться в научной лаборатории, где была написана работа. За уже проведённую работу автор благодарит своего научного руководителя Поступаева В. В., а также команду установки ГОЛ-NB.

4. Результаты

Разработана конструкция датчика для измерения флуктуаций магнитного поля на установке ГОЛ-NB. Освоена программа AutoCAD, в которой выполнены рабочие чертежи катушки. Проведена намотка катушки, спайка контактов, а также сборка измерительной системы. Проведена серия тестовых измерений на стенде с катушкой Гельмгольца, которая продемонстрировала работоспособность датчика. Получены первые измерения магнитного поля на установке. Поставленная задача полностью выполнена.

5. Список литературы

1. Бурдаков А. В., Поступаев В. В. Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору //Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 6. – С. 651–671.
2. Судников А. В., Поступаев В. В. Магнитная диагностика плазменных колебаний в многопробочной ловушке ГОЛ-3 //Вестник НГУ. – 2007. – Т. 2. – №. 3. – С. 62–67
3. Кадомцев Б. Б. Перезамыкание магнитных силовых линий //Успехи физических наук. – 1987. – Т. 151. – №. 1. – С. 3-29.
4. Чечерников В. И. Магнитные измерения. – Рипол Классик, 1969.
5. Postupaev V. V. et al. Results of first plasma campaign in start configuration of GOL-NB multiple-mirror trap //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2019.
6. Хохлов А. В. Теоретические основы радиоэлектроники. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005.
7. Котельников И. А., Черкасский В. С. Скин-эффект в задачах //Электронный учебник. Новосибирск. – 2013. – Т. 79.
8. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей //Л.: Энергоатомиздат. – 1986. – Т. 9. – С. 88.