

Измерение рассеянных магнитных полей установки ГОЛ-NB

Лавронов Кирилл Дмитриевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. 3 семестр.

Группа №19313, 2020.

Научный руководитель:

И. А. Иванов, к. ф-м н., с.н.с. ИЯФ со РАН

Аннотация

Целью работы являлось измерение рассеянных магнитных полей на вакуумных насосах ТМР-3203, установленных на многопробочной ловушке ГОЛ-NB. Вокруг установки присутствует значительное количество магнитных объектов, которые перераспределяют магнитное поле вокруг установки. Готовность к запуску ГОЛ-NB обеспечивается ТМН, их работоспособность критически зависит от магнитных помех. В результате являются актуальными непосредственные измерения вектора и величины индукции магнитного поля внутри насосов. Для решения этой задачи были разработаны и собраны катушки, которые помещаются между насосом и защитой и обладают достаточной точностью для вычисления индукции магнитного поля. На установке проводился импульсный эксперимент с включением только центрального соленоида с большими катушками. Диаметр катушки в соленоиде равен 1,4 м, а количество витков – 70. Измерены и пересчитаны значения индукции магнитного поля 160 Гс. Полученные результаты превышают критические значения на насосах в 5.3 раза, из чего становится ясно, что установка магнитной защиты на насосы необходима. В дальнейшем предполагается, что катушки будут выполнять контрольно-защитную функцию.

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Лавронов Кирилл Дмитриевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение рассеянных магнитных полей установки ГОЛ-NB
Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19313

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. И. А. Иванов

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Д. С. Чуркин

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось измерение рассеянных магнитных полей на вакуумных насосах ТМР-3203, установленных на многопробочной ловушке ГОЛ-NB. Вокруг установки присутствует значительное количество магнитных объектов, которые перераспределяют магнитное поле вокруг установки. Готовность к запуску ГОЛ-NB обеспечивается ТМН, их работоспособность критически зависит от магнитных помех. В результате являются актуальными непосредственные измерения вектора и величины индукции магнитного поля внутри насосов. Для решения этой задачи были разработаны и собраны катушки, которые помещаются между насосом и защитой и обладают достаточной точностью для вычисления индукции магнитного поля. На установке проводился импульсный эксперимент с включением только центрального соленоида с большими катушками. Диаметр катушки в соленоиде равен 1,4 м, а количество витков – 70. Измерены и пересчитаны значения индукции магнитного поля 160 Гс. Полученные результаты превышают критические значения на насосах в 5.3 раза, из чего становится ясно, что установка магнитной защиты на насосы необходима. В дальнейшем предполагается, что катушки будут выполнять контрольно-защитную функцию.

Оглавление	
1. Введение	4
2. Теоретическая часть	5
2.1 Магнитное поле.....	5
2.2 Закон электромагнитной индукции.....	5
3. Экспериментальная часть.	6
3.1 Измерительное устройство.....	6
3.2 Расчет данных рассеянных полей от установки ГОЛ-NB.....	8
3.3 Методика проведения эксперимента.....	9
4. Результаты.	10
4.1. Результаты измерений.....	10
4.2. Обсуждение результатов.....	12
5. Заключение.	12
6. Библиографический список.	13

1. Введение

В наше время, в связи с необходимостью замены старых видов получения энергии и поиска новых, важна роль физики плазмы, как направления, в котором идут исследования и эксперименты в области термоядерного синтеза энергии. Этот метод подразумевает удержание плазмы в вакууме в сильном магнитном поле, внутри которой более легкие элементы образуют более тяжелые с сопутствующим выделением энергии. Одной из систем для удержания плазмы является многопробочная ловушка, именно такая система используется в установке ГОЛ-NB. Для устойчивой работы установки необходимо, помимо создания магнитного, удерживающего плазму, поля обеспечить вакуум внутри камеры, для этого и нужны вакуумные насосы. В данной установке используются турбо-молекулярные насосы (ТМН). Современные насосы создают и используют собственные магнитные поля для удержания турбины для уменьшения сил трения подшипника, что способствует уменьшению потерь и более высокой производительности. Для корректной работы насоса, необходимо изолировать его от воздействий внешних сильных магнитных полей. Для этого существует, выполненная из магнито-мягкого железа, специальная защита, плотно прилегающая к корпусу насоса. Несмотря на то, что рассеянное магнитное поле на насосе можно рассчитать по Закону Био-Савара с хорошей точностью, реально вокруг установки присутствует значительное количество магнитных объектов (несущая конструкция, металлические перекрытия и др.), которые перераспределяют магнитное поле вокруг установки. ТМН чувствительны к внешнему изменению поля, поэтому является актуальным непосредственное измерение вектора и величины индукции магнитного поля внутри насосов. Для решения этой задачи необходимо разработать и собрать катушки, которые помещаются между насосом и защитой (благодаря малым габаритам) и обладают достаточной точностью для вычисления индукции магнитного поля. $\vec{B}_{max} = 30$ Гс (определяется из паспорта на ТМН) и с полупериодом в 13 мс.

2. Теоретическая часть

2.1 Магнитное поле.

Наличие магнитного поля – экспериментально подтвержденный факт. На основе опытов было установлено, что на движущейся заряд действует сила, направленная от одного полюса к другому. Эта сила Ампера $F_m = \frac{q}{c} [\vec{v}\vec{B}]$, где вектор \vec{B} не зависит от заряда и его движения, он характеризует только магнитное поле. Мы можем обобщить наши данные о поле. Таким обобщением будет являться закон Био–Савара-Лапласа, описывающий магнитное поле, создаваемое элементом тока $\vec{j}(\vec{r}')dV'$ в точке наблюдения с радиус вектором \vec{r} :

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \frac{[\vec{j}(\vec{r}') \times \vec{R}]}{R^3} dV'.$$

Зная, что $\vec{j}dV = \left(\frac{I}{S}\right) Sd\vec{l} = Id\vec{l}$, приведем нашу формулу к конечному виду:

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{I}{c} \frac{[d\vec{l} \times \vec{R}]}{R^3}.$$

Теперь закон Био-Савара-Лапласа позволяет определить магнитное поле в любой точке пространства.

В документации, к представленным в работе насосам, все данные записаны в системе СИ. В работе использовалась более удобная система для расчетов – СГСМ. Все значения поля посчитаны в Гс.

2.2 Закон электромагнитной индукции.

Закон электромагнитной индукции был открыт Фарадеем экспериментально. Он установил возникновение электрического тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного потока через этот контур. Закон индукции Фарадея выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$$

Эта формула связывает ЭДС индукции в контуре ε со скоростью изменения магнитного потока Φ через контур. Знак минус в формуле объясняется

правилом Ленца. Фарадей установил, что ток в проводящем контуре возникает при любом способе изменения магнитного потока через этот контур (как от перемещения замкнутого контура в постоянном магнитном поле, так и от изменения самого магнитного поля через этот контур). Измерив ЭДС индукции контура и, при помощи закона Фарадея, установив связь с изменением магнитного поля, можно найти поле, проходящее через этот контур.

3. Экспериментальная часть

3.1 Измерительное устройство.

Проведение эксперимента было вызвано необходимостью эмпирически получить значения индукции магнитного поля на ТМН. Так как ТМН чувствительны к воздействию внешнего магнитного поля и имеют предельные значения $\vec{B}_{max} = 30$ Гс, поэтому были созданы и установлены специальные измерительные катушки. Т.к. эксперимент был импульсный (такие эксперименты принято называть выстрел), то этот один выстрел, это разряд ёмкости на катушку магнитного поля. Конденсатор и индуктивность - это колебательный контур. Поэтому форма тока - половина синусоиды, и $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$, где $\frac{\tau}{2} = 12,5$ мс. Зная форму тока, можем получить, что $\dot{B} = \omega B_{max} \cos\omega t$. По закону Фарадея: $U_{max} = -\dot{B}S$, откуда $S = 0,5$ м² – необходимая для измерения индукции магнитного поля площадь катушки.

Помимо теоретической задачи нахождения необходимой площади для измерения магнитного поля, присутствует еще механическая: щель между насосом и защитой, не позволяет использовать крупные измерительные приборы, а получившаяся площадь необходимого витка с током слишком большая. Корпус насоса имеет цилиндрическую форму, поэтому необходимо наличие гибкости у измерительного прибора. Поэтому катушки состоят из тонкой медной проволоки, которая обладает хорошей проводимостью и достаточной гибкостью, для придания катушкам удовлетворяющей всем требованиям формы.

Схема установки представляет из себя АЦП, подключенную к катушкам. Катушки сделаны из медной проволоки, периметр которых 40 см.

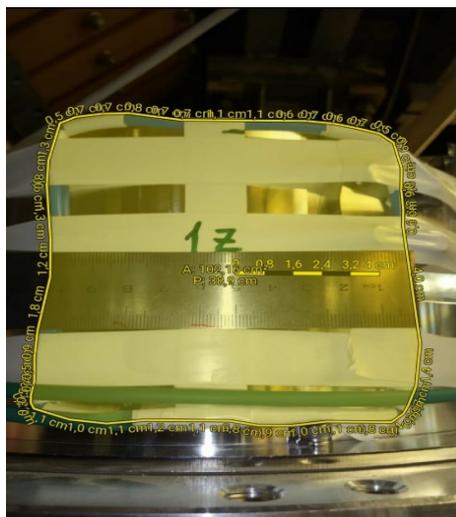


Рис. 1

Благодаря гибкости материала, удалось придать катушке наиболее удобную, с механической точки зрения, форму (квадрат со стороной 10 см) и закрепить на корпусе насоса (Рис. 1). Площадь катушки, рассчитанная с помощью приложения ImageMeter, равна $100 \pm 10 \text{ см}^2$.

Для регистрации данных с катушек использовались АЦП. Катушки подключены к измерительным приборам следующим образом (Рис. 2):



Рис. 2 Схема эксперимента

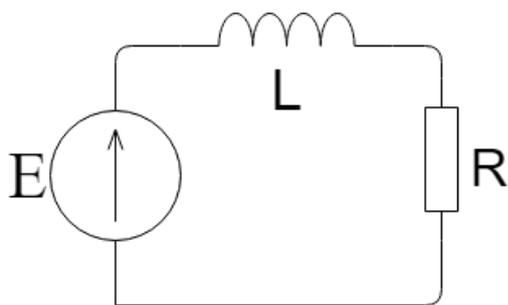


Рис. 3. Эквивалентная схема

Схема эксперимента эквивалентна следующей цепочке (Рис. 3). Цепочку, у которой выходной сигнал пропорционален интегралу по времени от входного сигнала, называют интегрирующей. Для этого необходимо выполнение следующего критерия: $\tau \ll \frac{R}{L}$, где τ - характерное время

входного сигнала E – ЭДС, L – индуктивность, R – резистор.

3.2 Расчет данных рассеянных полей от установки ГОЛ-NB.

На примере данных ТМН модели ТМР-3403ЛМС [2] можно увидеть, что насос способен выдержать 3 мТ (30Гс) радиальной составляющей поля и 15 мТ (150Гс) осевой составляющей. В работе рассматривались только радиальные составляющие поля, т.к. при небольшом превышении критического значения индукции магнитного поля в 30 Гс уже выводит насос из строя. В результате присутствия большого количества магнитных объектов вокруг насоса, внешнее рассеянное поле может перераспределиться таким образом, что превысит допустимые значения поля, тем самым выведя насос из строя. Насосы являются частью установки ГОЛ-NB (Рис.4).

Основной научной задачей ГОЛ-NB является прямая демонстрация подавления продольных потерь частиц и энергии из ловушки при помощи секций с многопробочным магнитным полем, присоединяемых к центральной ловушке газодинамического типа. Нагрев плазмы в ГОЛ-NB будет проводиться методом нейтральной инжекции с мощностью до 1.5 МВт.

На установке проводился импульсный эксперимент (выстрел с магнитным полем), с включением только центрального соленоида с большими катушками. Диаметр катушки в соленоиде равен 1,4 м, а количество витков – 70.

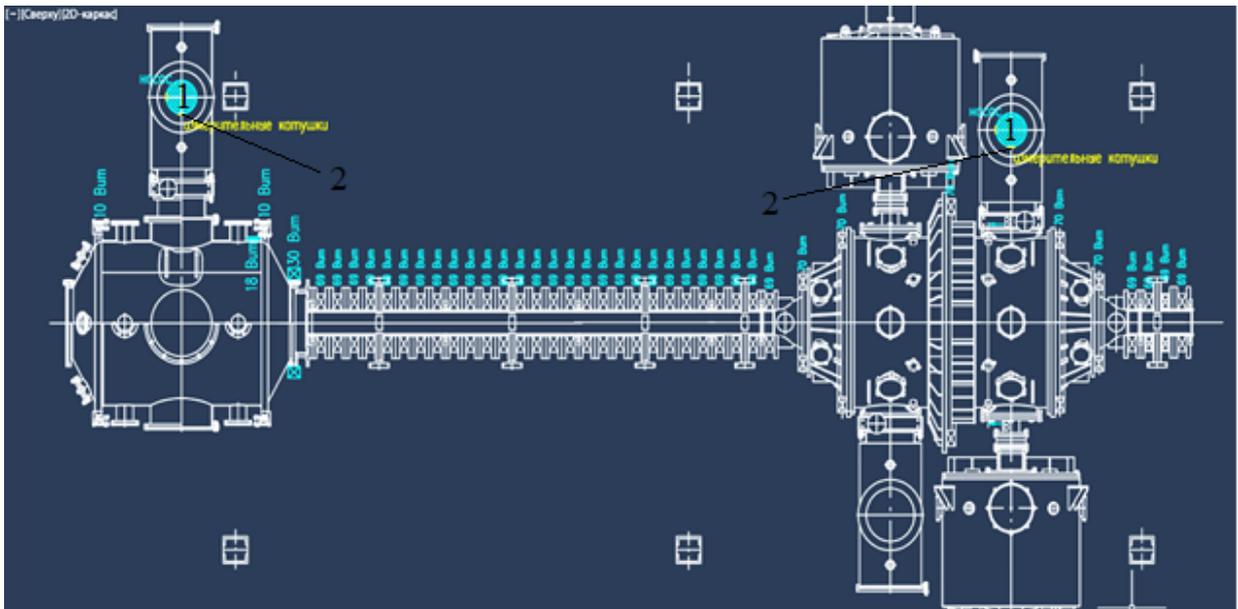


Рис.4. Чертеж ГОЛ-NB. 1 – ТМН, 2 - измерительные катушки.

Из-за несимметричного положения насосов относительно соленоида, значения индуктивности поля для них будут отличаться.

Полученные данные были пересчитаны с использованием приложения COMSOL Multiphysics. Была построена геометрическая модель соленоида и посчитано значение индукции магнитного поля в нужной точке, оно оказалось равным 140 ± 20 Гс.

3.3 Методика проведения эксперимента.

Для проведения эксперимента необходимо измерить магнитное поле на насосах, не терпящих превышения критических значений поля вдоль осей z и r. Для этого катушки располагаются соосно, с нужными для измерения, осями, и обладают необходимыми механическими характеристиками, для измерения поля. Проведя измерения, получили данные в виде компонент, откуда по

формуле $\vec{B}_{\text{нас}} = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}$ находим полное магнитное поле на насосах.

Полученные данные затем с допустимыми значениями поля для вакуумных насосов.

Точность измерений интеграла $\int U dt$ в формуле $\int U dt = B \int dS = 50BS_{\text{вит}}$, находится как $\frac{\sum \sqrt{\sigma_i^2}}{\sqrt{N-1}}$, где N – количество снятых измерений, т.к. N свыше 30000, а $\Delta t \sim 100$ мкс, эта величина пренебрежимо мала, по сравнению с погрешностью вычислений интеграла $B \int dS$. Т.о. основная погрешность в измерениях является точность измерения площади катушек, которая составляет: $\Delta S/S = 0,01$, где за ΔS можно принять толщину провода катушки равной 1,1 см. Также, используемая для измерения катушка, усредняет получаемый сигнал, точность измерения сигнала ΔB составляет $\pm 10\%$.

4. Результаты

4.1. Результаты измерений.

Для проведения эксперимента был произведен импульсный запуск установки. Данные были измерены в виде зависимости ЭДС от времени (Рис.6). Т.к. ЭДС индукции связан с магнитным полем законом Фарадея, были получены зависимости магнитного поля от времени. На представленном графике $U(t)$ также можно увидеть, что значения 1 и 2 первой катушки находятся около нуля. Это связано с тем, что расстояние между соленоидом и регистрирующими катушками велико, ЭДС практически не меняется.

На полученном графике z-компоненты индукции магнитного поля (Рис. 7) видно критическое значение компоненты поля, оно достигается при $t = 15$ мс.

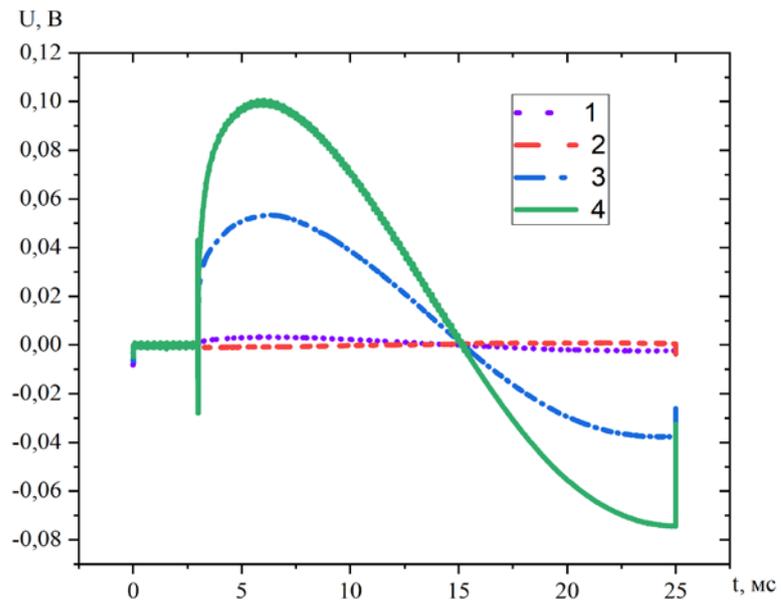


Рис.6. ЭДС индукции на катушках 1 и 3.

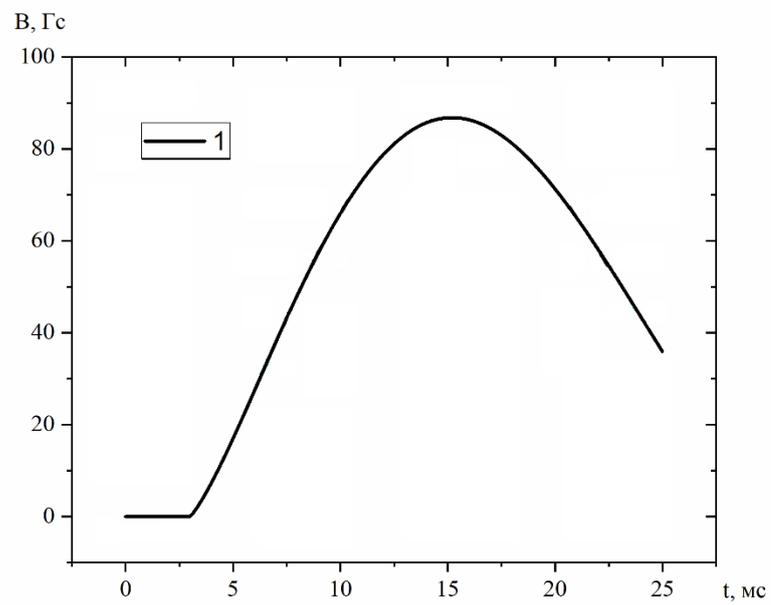


Рис.7. График зависимости $B_r(t)$

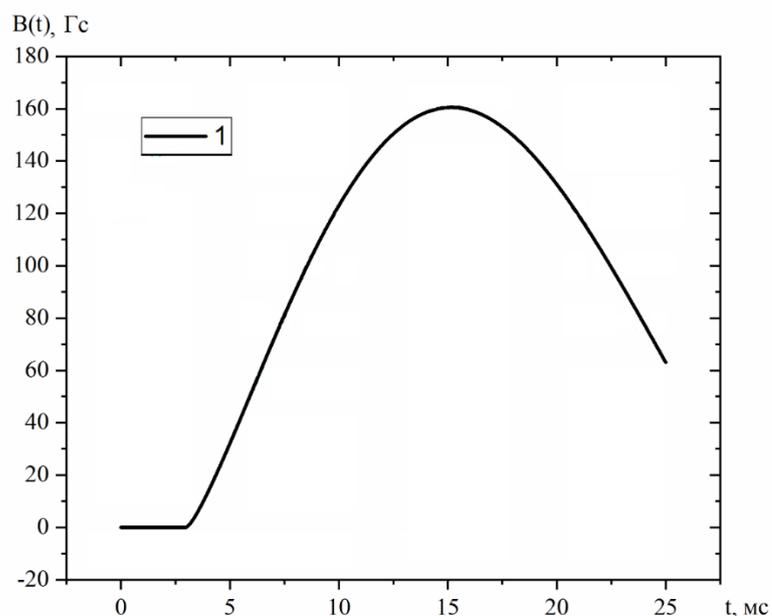


Рис.7. График зависимости $B(t)$

4.2. Обсуждение результатов.

В ходе выполнения работы были измерены компоненты магнитного поля. В результате проведенного эксперимента критическое значение магнитного поля оказалось равным 160 Гс. Оно было сравнено с паспортными данными допустимого магнитного поля для насоса - 30 Гс. Полученные результаты превышают критические значения в 5,3 раза, из чего становится ясно, что установка защитных пластин на корпуса необходима.

5. Заключение

Для выполнения целей и задач работы были созданы катушки измерения магнитного поля и установлены на насосах. Выбранный метод отличается своей простотой как в технической реализации, так и в теоретической. С датчиков сняты измерения магнитного поля на насосах. Показано, что при номинальных токах в катушках соленоида установки ГОЛ-НВ в насосах ТМН достигается индукция магнитного поля в 5,3 раза превышающая критические значения. В результате становится ясна необходимость установки магнитной защиты на насосы. Т.к. защита ТМН находится в стадии монтажа, то проверка ее

характеристик будет проведена позже. Важным можно отметить, что созданная диагностика стала штатной.

6. Библиографический список

1. Яковлев В. И. Классическая электродинамика: Учеб. Пособие/ Новосиб. ун.-т. Новосибирск, 2003. 267с.

2. И. Н. Мешков, Б. В. Чириков электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм. – Изд. 2-е, исп. И доп. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 544с.

3.

https://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/pdf/manuals/manual%203203,%203403.pdf

4. Лаб. Работа №5.1. – Процессы в RL и RC цепях.

https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab5:%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_51