

Измерение импульсного магнитного поля

Андрианов Роман Артурович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 18305, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

Касаев Алексей Сергеевич, научный сотрудник.

Аннотация

Целью работы являлось построение теоретической модели импульсного магнитного поля в установке, оценка однородности поля в апертуре и проверка теоретической модели на реальных параметрах амплитуды и однородности поля в центре. За основу моделирования был взят закон электромагнитной индукции Фарадея. Для этой цели при помощи компьютерного моделирования была построена модель, на основании которой проводились теоретические расчёты. Проведена экспериментальная проверка модели. По результатам проверки было выяснено, что разработанная модель подходит для оценки амплитудного значения поля в установке, а также для оценки поведения поля.

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Андрианов Роман Артурович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение импульсного магнитного поля

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18305

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ
Научный руководитель
Преподаватель практикума
Куратор практикума

Аннотация

Целью работы являлось построение теоретической модели импульсного магнитного поля в установке, оценка однородности поля в апертуре и проверка теоретической модели на реальных параметрах амплитуды и однородности поля в центре. За основу моделирования был взят закон электромагнитной индукции Фарадея. Для этой цели при помощи компьютерного моделирования была построена модель, на основании которой проводились теоретические расчёты. Проведена экспериментальная проверка модели. По результатам проверки было выяснено, что разработанная модель подходит для оценки амплитудного значения поля в установке, а также для оценки поведения поля.

Ключевые слова: Закон электромагнитной индукции Фарадея, импульсное магнитное поле, амплитудное значение магнитного поля.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	5
2.1 Магнитное поле	5
2.2 Закон электромагнитной индукции Фарадея	5
3. Экспериментальная часть	6
3.1 Методика измерений	6
3.2 Результаты измерений	9
4. Выводы	11
5. Список литературы	12

1. Введение

На сегодняшний день импульсные магнитные поля находят широкое применение в физических экспериментах. Так важными элементами ускорителя элементарных частиц являются кикеры, в основе работы которых лежит создание короткого импульса магнитного поля. На примере циклического ускорителя ВЭПП-2000 можно понять, что кикеры могут осуществлять впуск частиц в ускоритель, либо же сообщать определенный импульс пучку для его накопления, а также осуществлять переброс пучка в коллайдер.

Импульсный метод генерации магнитного поля как правило более сложный в реализации, чем генерация постоянного поля той же индукции. Но принципиальная возможность использовать импульсные магнитные поля для научных исследований связана с тем, что характерные времена многих физических явлений и процессов существенно меньше времени существования импульсного магнитного поля, так что для них последнее можно рассматривать как квазистационарное.

Поэтому важно иметь представление о том, как воссоздавать импульсные магнитные поля с необходимыми параметрами, и иметь представление о том, каким способом можно измерить магнитное поле или оценить магнитное поле.

Целью работы являлось разработка теоретической модели магнитного поля в представленной установке, и проверка модели на полученных измерениях. Для достижения этих целей при помощи компьютерного моделирования, было рассчитано магнитное поле при определенных параметрах. А также данная модель была проверена на конкретных измерениях.

2. Теоретическая часть

2.1 Магнитное поле

Как известно, неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Магнитное же поле может создаваться током заряженных частиц или магнитными моментами электронов в атомах, кроме того, оно возникает в результате изменения во времени электрического поля. Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Но в общем случае разделение электрического и магнитного поля условно и зависит от выбора системы отсчёта. Вектора $\vec{B}$ и $\vec{E}$ (вектор напряженности электрического поля) на самом же деле являются компонентами единого тензора электромагнитного поля.

2.2 Закон электромагнитной индукции Фарадея

Явление электромагнитной индукции определяется возникновением электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока через площадь данного контура.

Основной же закон Фарадея заключается в том, что ЭДС (электродвижущая сила) прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через контур. Данный закон выражен следующей формулой:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

где $d\Phi$ – это есть скалярная величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади контура:

$$d\Phi = d\vec{B}\vec{S} \quad (2)$$

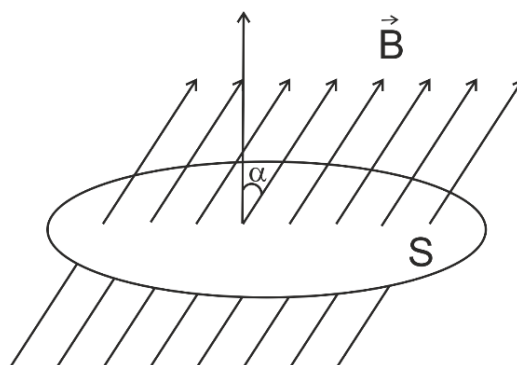


Рисунок 1.

3. Экспериментальная часть

3.1 Методика измерений

Для создания импульсного магнитного поля, в эксперименте использовался генератор импульсного напряжения. Импульс с него подавался на две параллельно расположенные шины, заключенные между С-образными ферритами.

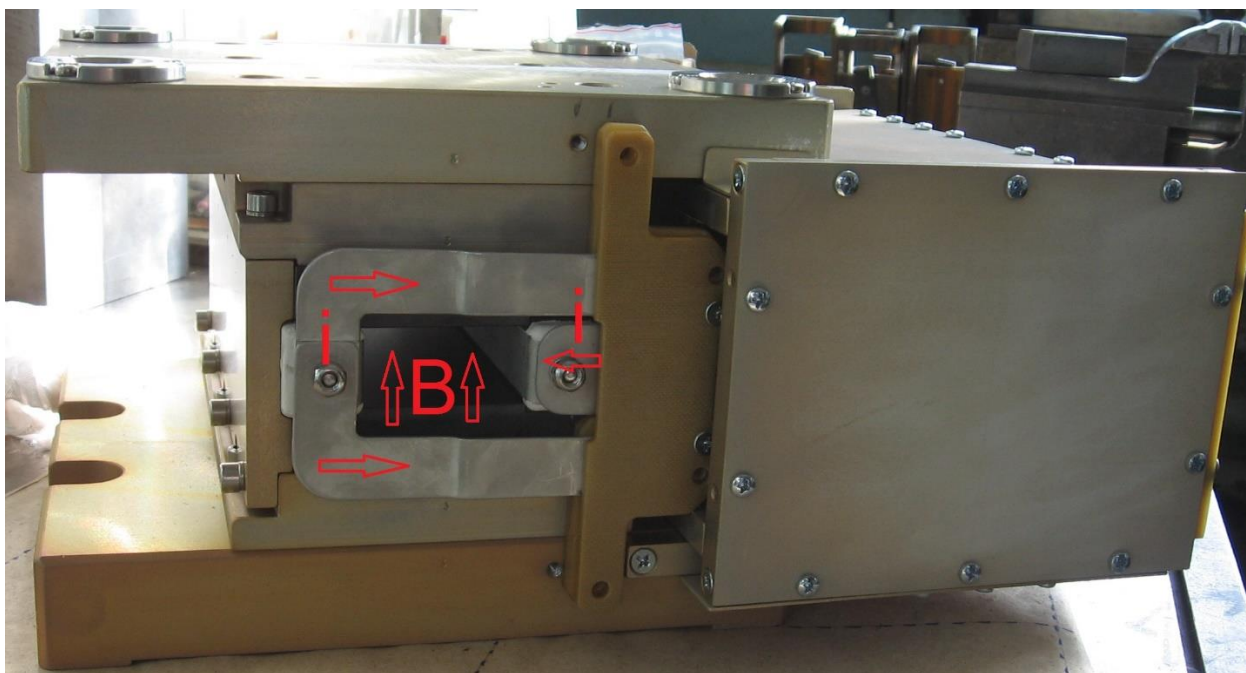


Рисунок 2. Установка.

Поле же измерялось при помощи измерительного контура, помещенного между шинами. В следствии протекания по шинам импульсного тока, в пространстве между ними возникало переменное магнитное поле, которое по закону электромагнитной индукции Фарадея индуцировало в контуре ЭДС, снимаемую подключенным к рамке осциллографом.

В данном эксперименте вследствие того, что на проводники подается импульсное напряжение, в них возникает явление самоиндукции:

$$\varepsilon = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3)$$

В эксперименте значение индуктивности может быть определено либо по рисунку 3:

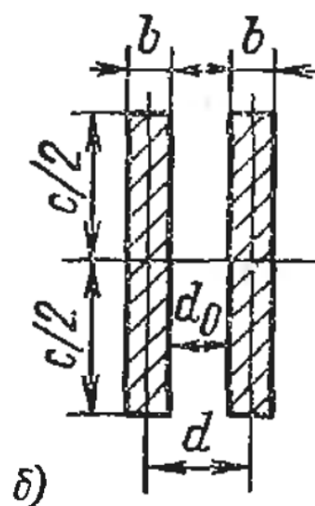
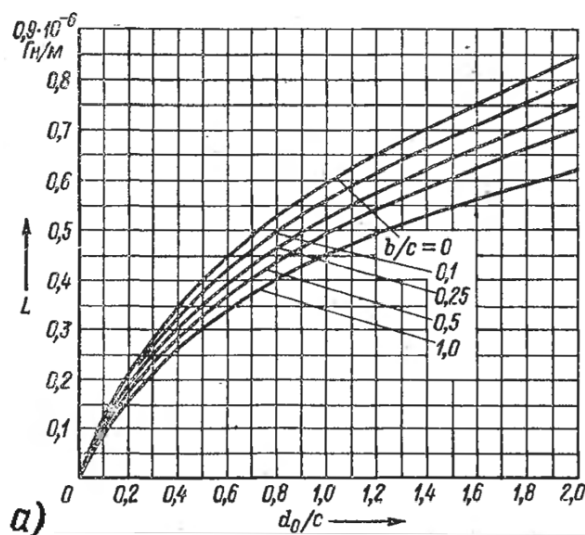


Рисунок 3. а) график зависимости индуктивности от параметров шин;
б) сечение шин.

либо из расчётных формул. В нашем случае приближенное значение индуктивности можно рассчитать по следующей формуле:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\sinh^{-1} \frac{d}{f} - \sinh^{-1} \frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \right) \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ (м кг с⁻² А⁻²), а f вычисляется по следующей формуле:

$$f = \frac{c}{2E} (1 + \eta) \sqrt{1 - \eta^2} \quad (5)$$

где $\eta = \frac{d}{c}$, а E – полный эллиптический интеграл второго рода с модулем $k = \sqrt{1 - \eta^2}$.

После расчёта индуктивности по формуле (3) рассчитывается значение тока в шине, так как это значение нужно для компьютерной модели.

После чего в программе FEMM строится модель установки, и рассчитывается напряженность поля в пространстве между шинами. Зная какое поле создается при определенных условиях исходя из формулы (2) рассчитывается изменение потока через площадь измерительной рамки. Подставив это значение в формулу (1) получаем ЭДС, индуцируемую на измерительном контуре. Но стоит учитывать, что помимо изменяемого потока магнитного поля через измерительный контур, на значение ЭДС оказывает влияние электрическое поле, которое создает разность потенциалов на сторонах контура. Этот эффект можно исключить, если сделать 2 измерения в каждой точке, внося контур сначала с одной стороны, а потом с противоположной. Таким образом разница двух напряжений будет

давать нам значение индуцируемой ЭДС именно от изменения потока магнитного поля.

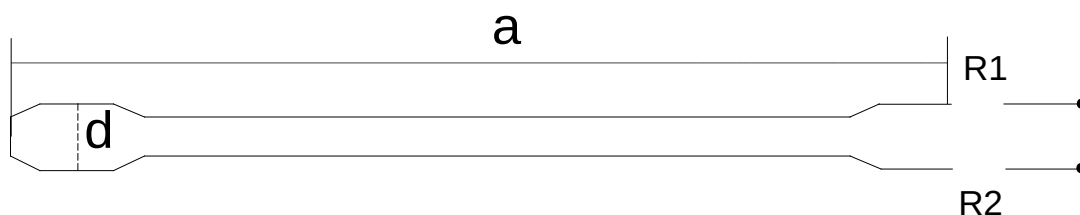


Рисунок 4. Измерительный контур: r_1 и r_2 – сопротивления на концах контура.

Для определения показаний осциллографа следует учитывать как сопротивления имеющиеся на концах измерительного контура, так и входное сопротивление осциллографа.

В таком случае, для простоты вычислений, можно свести подключение измерительного контура к осциллографу к следующей эквивалентной схеме:

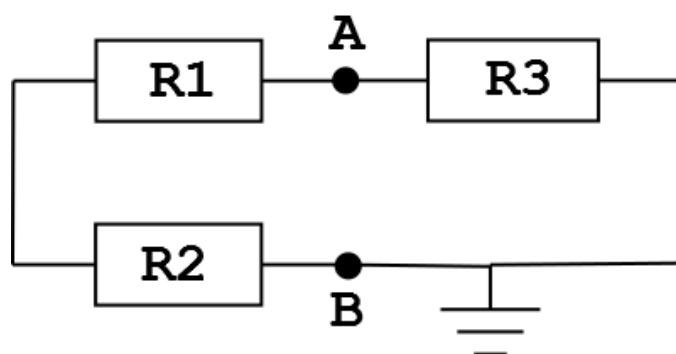


Рисунок 5. Эквивалентная схема подключения рамки: R_1 и R_2 – сопротивления на концах контура; R_3 – сопротивление на входе осциллографа.

Тогда значение напряжения на осциллографе будет вычисляться по следующей формуле:

$$U = \frac{\varepsilon R_3}{(R_1 + R_2 + R_3)} \quad (6)$$

3.2 Результаты измерений

В данном эксперименте на шины подавалось напряжение $U = 1(\text{kV})$ с длительностью импульса $t = 640(\text{нс})$. При расчёте индуктивности следует учитывать, что в программе FEMM можно построить только двумерную модель, соответственно при расчётах не будет учтено влияние краевых эффектов. Для этих целей была рассчитана эффективная длина, путем моделирования электрического поля в продольном сечении установки. Эффективная длина таким образом составила $l = 35(\text{см})$.

Расчётная индуктивность шины $L = 6.1528 \cdot 10^{-7}(\text{Гн})$. А ток через шины в таком случае составил $I = 1040 \text{ А}$.

После чего в программе FEMM была построена модель распределения магнитного поля в установке:

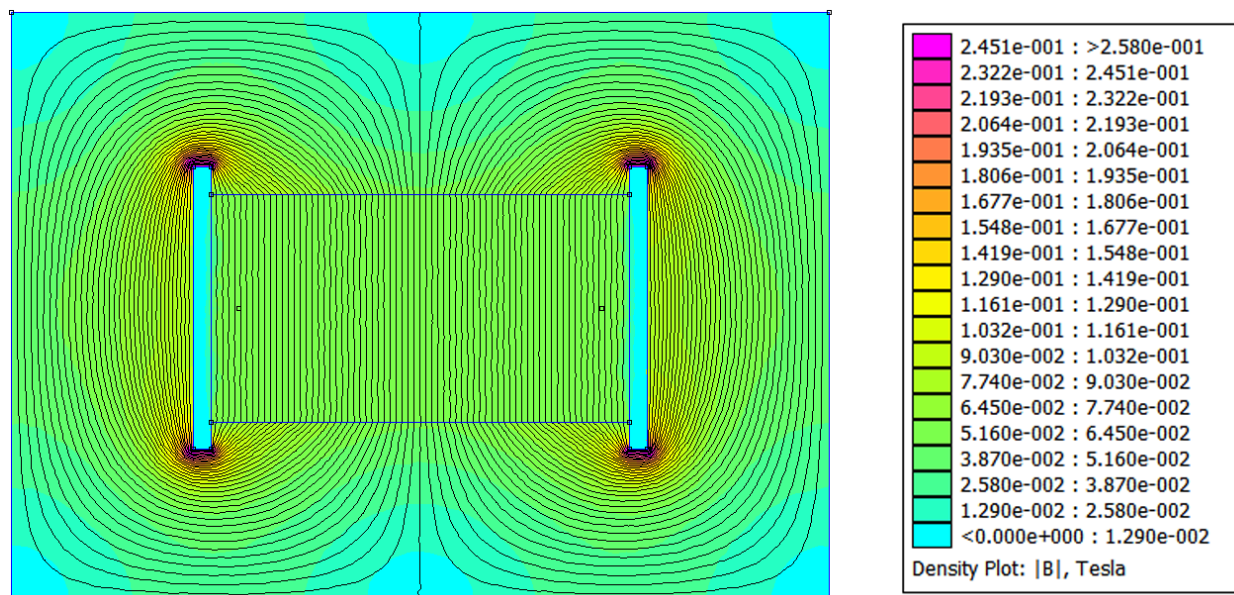


Рисунок 6. Карта поля.

По результатам моделирования был построен график расчетного напряжения, выдаваемого на осциллографе в зависимости от расстояния до пластин. После чего был проведен эксперимент, в котором было снято напряжение в 21 точках, расположенных на оси, перпендикулярной плоскости шин. Ниже представлен график расчетного напряжения и экспериментального:

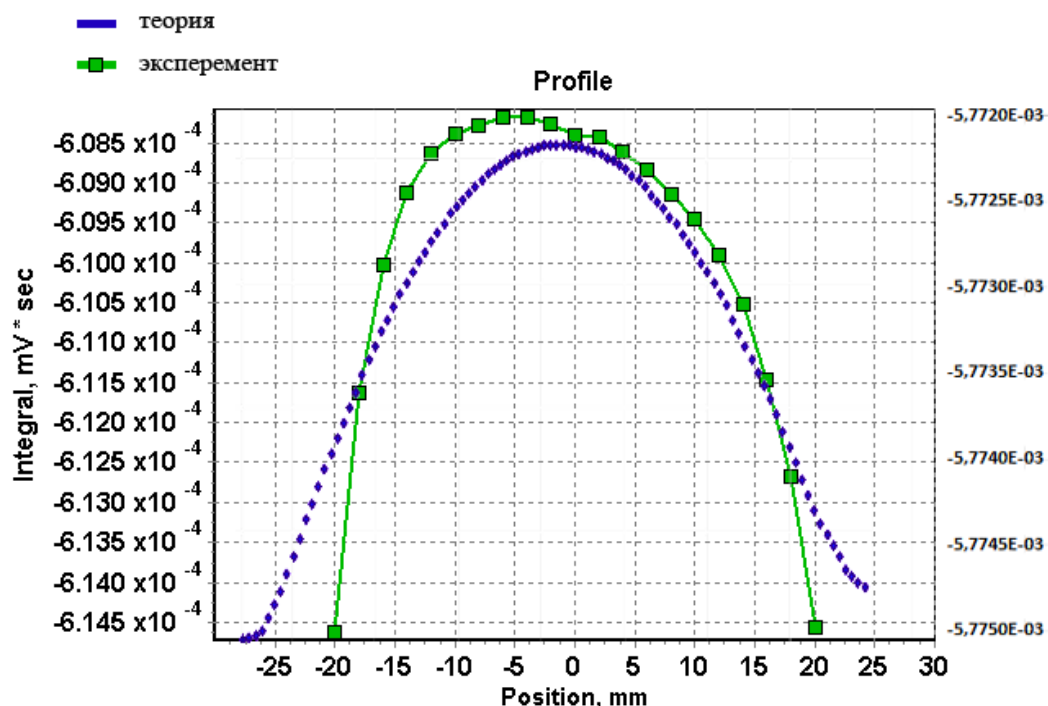


Рисунок 9. График зависимости напряжения от расстояния до центра между пластинами.

Слева от графика расположена экспериментальная шкала, справа теоретическая. По графику было оценено отклонение от однородного поля. Теоретическое отклонение однородности поля составило $\pm 0,04\%$. Тогда как экспериментальное равно $\pm 0,5\%$.

Была также рассчитана амплитуда поля, создаваемого данным током, она составила $175(\text{Гс} \cdot \text{м})$. В то время как экспериментальная амплитуда составила $160(\text{Гс} \cdot \text{м})$:

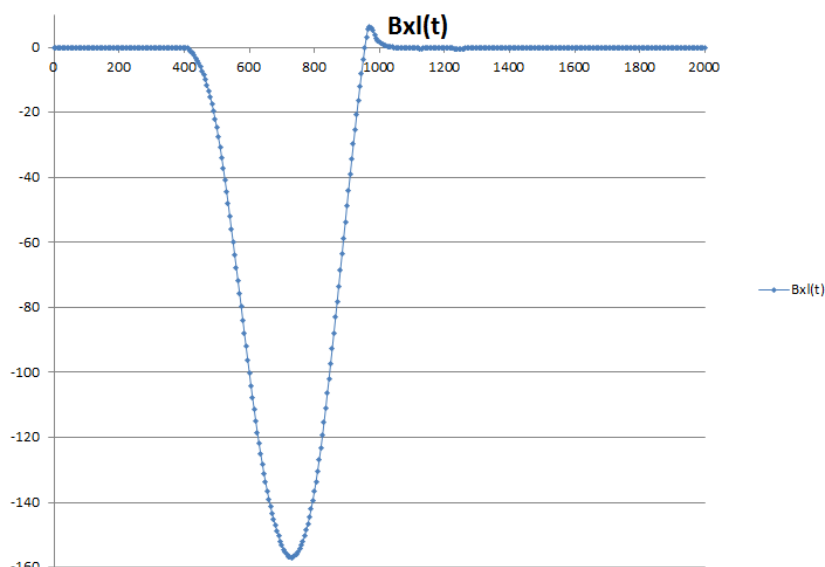


Рисунок 10. Поле в центре установки от времени.

4. Выводы

Таким образом Была построена теоретическая модель импульсного магнитного поля в установке. Рассчитано амплитудное значение магнитного поля в апертуре и определена однородность поля.

Эксперимент показал, что разработанная модель не даёт точных результатов как амплитуды магнитного поля, так и однородности поля в установке. Но данная модель подходит для оценки как поведения магнитного поля, так и верхней границы амплитуды.

5. Список литературы

1. Яковлев.В.И. Классическая электродинамика:Часть1.Электричество и магнетизм. – Изд.2-е, испр.и доп. – М.-Ижевск, 2016. Глава 4.
2. Сивухин Д. В., Общий курс физики. Москва Физматлит МФТИ. Т. 3. Глава III.
3. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин, Расчет индуктивностей. – Изд.3-е, переработанное и дополненное. Глава 3, §3-5.