

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:47:56

Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

	Стр.
Общие сведения по выполнению лабораторных работ по теоретическим основам электротехники	4
2. Основные правила техники безопасности в лаборатории теоретических основ электротехники	4
. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ	5
. Лабораторная работа № 1. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе	6
. Лабораторная работа № 2. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла	10
. Лабораторная работа № 3. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек	15
. Лабораторная работа № 4. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов	17
. Лабораторная работа № 5. Исследование поляризационной кривой сегнетоэлектрика	20
. Лабораторная работа № 6. Снятие петли гистерезиса ферромагнетика	24
. Лабораторная работа № 7. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле	28
0. Лабораторная работа № 8. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости	31
1. Приложения	
2.	39
3. Список литературы	47

Общие сведения по выполнению лабораторных работ по теоретическим основам электротехники

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений физических основ электротехники, законов электрических цепей, а также знакомство с электрооборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электрических схем и приборов, практически подтвердить основные положения и законы электрических цепей. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано четырнадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

Основные правила техники безопасности в лаборатории теоретических основ электротехники

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

1. К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.
2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.
3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

1. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование или приборы с других рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, *величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.*

Лабораторная работа №1

Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе

Цель работы: получение картины силовых линий моделируемых плоскопараллельным электромагнитным и электростатическим полем на токопроводящем листе и определение его напряженности или индуктивности в отдельных точках.

Краткие сведения из теории: известно, что электростатическое поле в области, где нет свободных зарядов, а также постоянное магнитное поле в области, где нет токов, описывается такими же уравнениями, как и поле постоянного тока в проводящей среде вне источников энергии, в частности, уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi = 0.$$

Поскольку уравнение Лапласа имеет единственное решение при заданных граничных условиях, то при подобных граничных условиях в диэлектрике и в проводящей среде распределение потенциала будет одинаковым в обеих средах. Это подобие позволяет моделировать как электростатические, так и магнитные поля полем электрического тока в проводящей среде. Соблюдение подобных граничных условий сводится к геометрическому подобию областей, в которых исследуется поле.

Плоский проводящий лист позволяет моделировать распределение электрического потенциала или магнитных силовых линий в сечении плоскопараллельного поля, перпендикулярном длинным заряженным проводникам или проводникам с током. Эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют эквипотенциальным линиям в электростатическом поле между заряженными проводниками. При моделировании магнитного поля эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют магнитным силовым линиям при протекании тока в проводниках. Собранный установка для моделирования с одним из планшетов показана на рис. 1.1. Остальные четыре планшета – на рис. 1.2.

Планшеты №№ 1, 2, 3, 4 используются для моделирования электростатических полей заряженных длинных проводов соответствующих сечений. Планшет №1 и, в меньшей степени, №3 и №4 пригодны также и для моделирования магнитного поля двухпроводной линии с током. На планшете №5 моделируется магнитное поле между полюсами и в зазоре явнополюсной электрической машины. На планшетах №3 и №4 при моделировании магнитного поля граничные условия обеспечиваются неточно, поэтому картина поля вблизи проводников, полученная с помощью модели, несколько отличается от реальной.

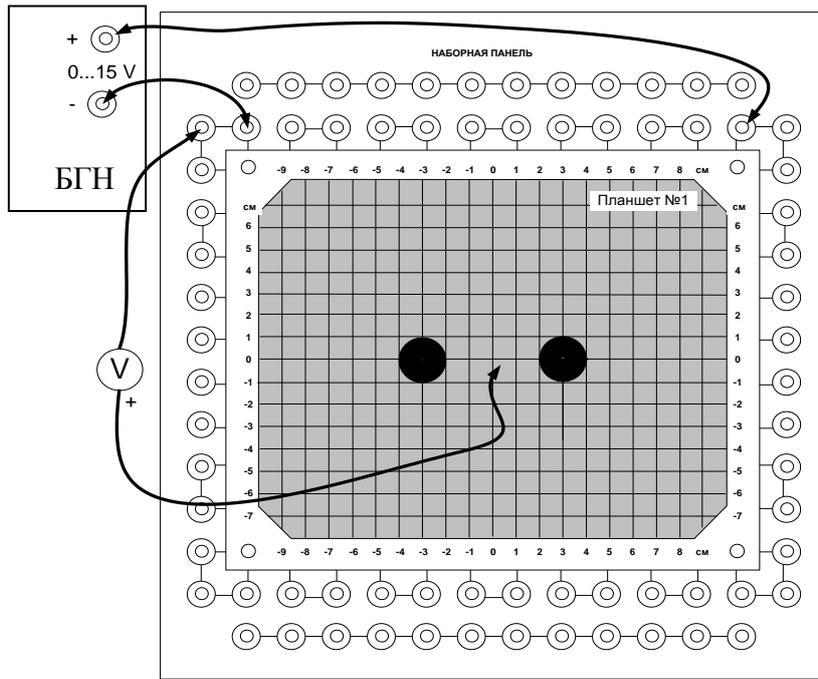


Рис.1.1

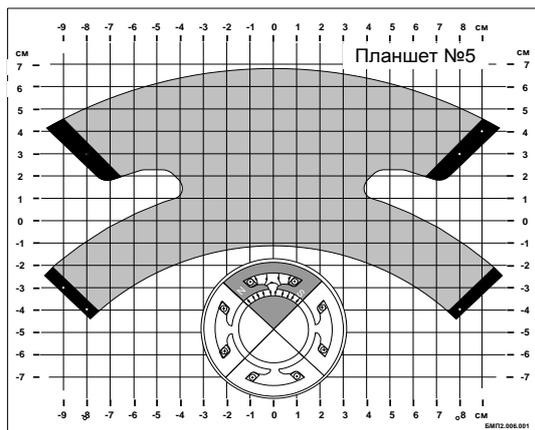
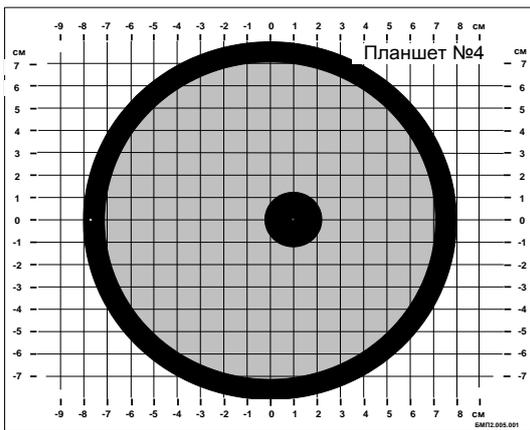
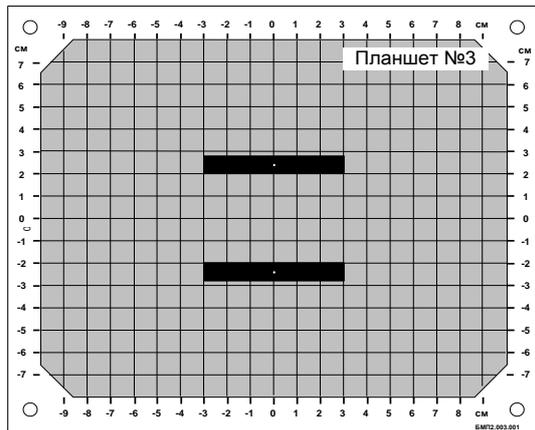
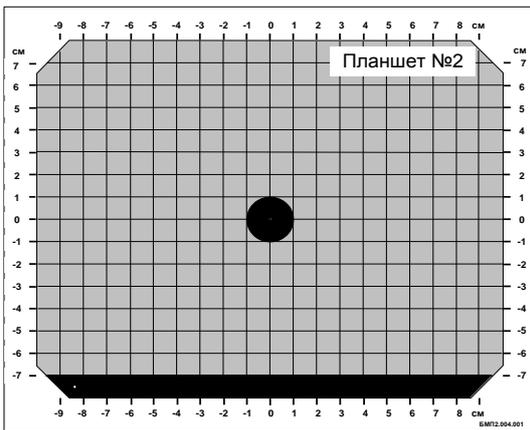


Рис.1.2

Экспериментальная часть

1.1. Моделирование плоскопараллельного электростатического поля

Задание: построить картину силовых линий моделируемого электростатического поля, определить его напряжённость в отдельных точках.

Порядок выполнения работы: установите на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 2, 3 или 4) и подключите питание от генератора постоянных напряжений и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.1.

Приготовьте рисунок расположения электродов с координатной сеткой (см. приложение 1).

Включите выключатель сети блока генераторов напряжений (БГН) и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

Выберите такое напряжение питания $U = 10 \dots 15$ В и шаг изменения потенциала ΔU (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картине поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами ΔU , $2\Delta U$, $3\Delta U$... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

Перемещая зонд из точки с потенциалом ΔU вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), находите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

Примечание: В каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Пользуясь известными правилами графического построения картины поля, по эквипотенциальным линиям электростатического поля постройте силовые линии напряжённости поля.

Вычислите напряжённость электрического поля в двух - трёх точках проводящего листа и покажите направление вектора напряжённости в этих точках на рисунке ($E \cong \Delta U / \Delta l$).

1.2. Моделирование плоскопараллельного магнитного поля

Задание: построить картину силовых линий исследуемого магнитного поля, определить его магнитную индукцию в отдельных точках, приняв какое-нибудь конкретное значение намагничивающего тока.

Порядок выполнения работы: установите на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 3, 4 или 5) и подключите питание от генератора постоянных напряжений и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.1.

Приготовьте рисунок расположения электродов с координатной сеткой (см. приложение 1).

Включите выключатель «Сеть» блока генераторов напряжений (БГН) и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

Выберите такое напряжение питания $U = 3 \dots 15$ В и шаг изменения потенциала ΔU (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картине поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами ΔU , $2\Delta U$, $3\Delta U$... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

Перемещая зонд из точки с потенциалом ΔU вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), находите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

Примечание: В каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Считая снятые эквипотенциальные линии электрического поля магнитными силовыми линиями, постройте линии равного магнитного потенциала, пользуясь известными правилами графического построения картины поля. Примите конкретное значение тока в шинах или МДС катушек и укажите для каждой эквипотенциальной линии значение магнитного потенциала.

Вычислите магнитную индукцию $B = \mu_0 \frac{\Delta U_m}{\Delta l}$ в двух – трёх точках поля и покажите направление вектора магнитной индукции в этих точках на рисунке

Лабораторная работа №2

Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла

Цель работы: измерение и расчет индуктивности вдоль оси цилиндрической и кольцевых катушек.

Краткие сведения из теории: на основе закона Био-Савара-Лапласа можно получить формулу для определения напряжённости магнитного поля на оси кругового витка радиуса R , по которому протекает ток i , (рис.2.1):

$$H = \frac{iR^2}{2r^3} = \frac{i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{i}{2} \frac{R^2}{(\sqrt{R^2 + x^2})^3}$$

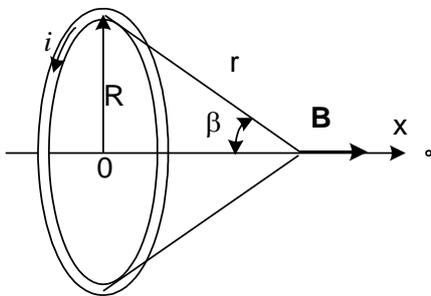


Рис. 2.1

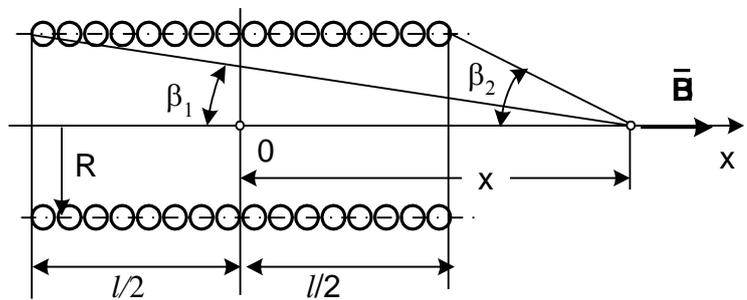


Рис.2.2

Пользуясь этим выражением в [1] выведена также формула для определения напряжённости поля на оси однослойной цилиндрической катушки, имеющей радиус витка R и длину l (рис. 2.2):

$$H = \frac{i}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

Эти формулы с некоторой погрешностью пригодны и для вычисления напряжённости на оси реальных многослойных катушек, если их толщина мала по сравнению с радиусом.

С учётом того, что магнитная индукция $B = \mu_0 H$ и число витков катушки равно w , получим:

$$\text{для кольцевой катушки - } B = \frac{\mu_0 w i R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 w i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{\mu_0 w i}{2} \frac{R^2}{(\sqrt{R^2 + x^2})^3};$$

$$\text{для цилиндрической катушки - } B = \mu_0 \frac{i w}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

В наборе миниблоков этого комплекта имеется миниблок с цилиндрической катушкой и миниблок с двумя одинаковыми соосными кольцевыми катушками, одна из которых может перемещаться относительно другой. Параметры катушек указаны на этикетках миниблоков.

Для измерения магнитной индукции используется датчик Холла с усилителем (миниблок «Тесламетр»). Для измерения магнитной индукции

необходимо подвести к «Тесламетру» питание +15 В, к его выходу подключить вольтметр (предел измерения 200 мВ), ручкой остановки нуля добиться напряжения на выходе, близкого к нулю, и ввести зонд с датчиком Холла внутрь катушки на нужное расстояние от её края. Показание вольтметра на выходе усилителя пропорционально магнитной индукции.

Чувствительность системы «датчик – усилитель» указана на этикетке миниблока. Если требуется изменить или уточнить чувствительность, то необходимо открыть крышку миниблока, ввести зонд в магнитное поле с известной магнитной индукцией и подстроечным резистором установить необходимое напряжение на выходе усилителя. **Непосредственно перед последней операцией обязательно проверить установку нуля!**

Экспериментальная часть

2.1. Исследование магнитного поля на оси цилиндрической катушки

Задание: измерить магнитную индукцию в различных точках на оси цилиндрической катушки и построить график её изменения вдоль оси. Проверить результаты измерения расчётом.

Порядок выполнения работы: установите исследуемую катушку на наборную панель, как показано на рис. 2.3 и подведите к ней питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В блока генераторов напряжений (БГН) через амперметр.

Установите на наборную панель миниблок для измерения магнитной индукции («Тесламетр») и подключите к нему питание +15 В, соединив два нерегулируемых источника постоянного напряжения БГН последовательно (рис. 2.3).

Разомкните цепь питания катушки (выньте из гнезда наборной панели штырёк провода от амперметра) и включите БГН.

При нулевом токе в катушке установите как можно точнее нулевое показание вольтметра на выходе тесламетра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U_{\text{вых}} < 20$ мВ).

Замкните цепь питания катушки и установите максимально допустимый ток 0,2 А регулятором напряжения источника. При меньшем токе погрешность измерения магнитной индукции возрастает из-за слишком слабого магнитного поля.

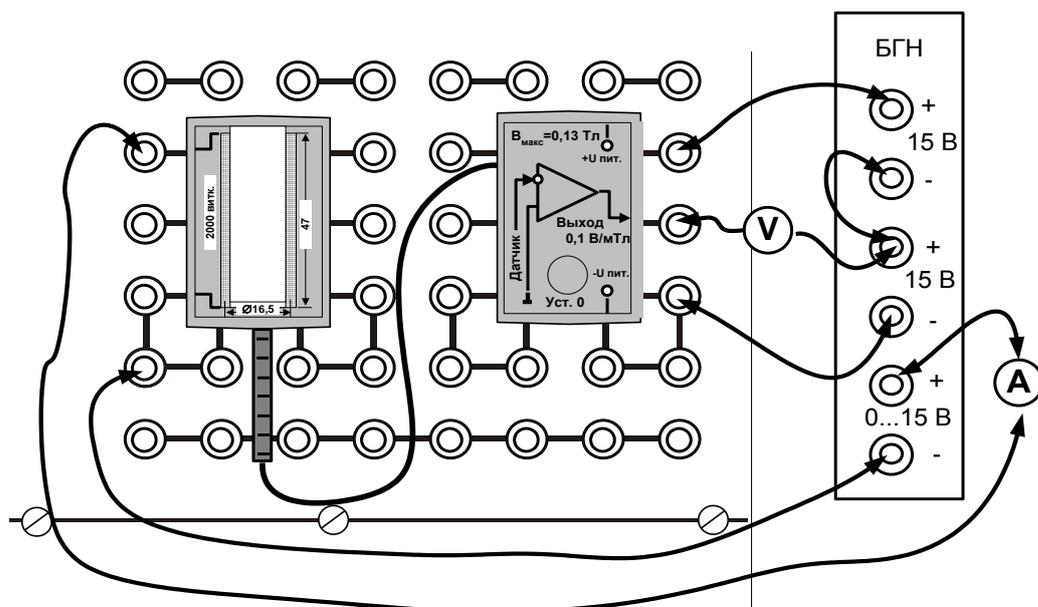


Рис. 2.3

Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушки с шагом 5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в табл. 2.1. Координату $x = 0$ удобно принять в центре катушки. Значение магнитной индукции B [мТл] = $10U_{\text{вых}}$ [В]. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

Постройте график изменения магнитной индукции вдоль оси катушки $B(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы по осям.

Вычислите магнитную индукцию в некоторых характерных точках (в точке симметрии, на краю катушки и т. п.) по формуле для однослойной цилиндрической катушки, приведённой в разделе «Общие сведения».

Нанесите расчётные точки на экспериментальном графике, либо сделайте расчёт всего графика на компьютере, используя, например, программу MathCAD. Тогда удобнее экспериментальные точки нанести на расчётном графике. MathCAD- программа с результатами расчёта и эксперимента приведена в приложении 2.

Таблица 2.1

х, мм	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
U, В											
B, мТл											

2.2. Исследование магнитного поля на оси кольцевых катушек

Задание: измерить магнитную индукцию в различных точках на оси кольцевой катушки, или двух катушек, смещённых по оси относительно друг друга, при их согласном или встречном включении. Построить график

изменения магнитной индукции вдоль оси. Проверить результаты измерения расчётом.

Порядок выполнения работы: установите миниблок «Кольцевые катушки» на наборную панель (рис. 2.4). Если Вы исследуете поле двух катушек, то соедините катушки между собой согласно или встречно и установите поводком заданное расстояние между катушками. Подведите к катушкам питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В БГН через амперметр.

Установите на наборную панель миниблок для измерения магнитной индукции («Тесламетр») и подведите к нему питание +15 В, соединив два нерегулируемых источника постоянного напряжения БГН последовательно.

Разомкните цепь питания катушек (выньте из гнезда наборной панели штырёк провода от амперметра) и включите блок генераторов.

При разомкнутой цепи питания катушек установите как можно точнее нулевое показание вольтметра на выходе тесламетра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U_{\text{вых}} < 20$ мВ).

Замкните цепь питания катушек и установите максимально допустимый ток 0,2 А регулятором напряжения источника. При меньшем токе погрешность измерения магнитной индукции возрастает из-за слишком слабого магнитного поля.

Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушек с шагом 2,5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в табл. 2.3.1. Координату $x = 0$ удобно принять в центре неподвижной кольцевой катушки. Значение магнитной индукции B [мТл] = $10U_{\text{Вых}}$ [В]. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

Постройте график изменения магнитной индукции вдоль оси катушек $B(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы по осям.

Вычислите магнитную индукцию в некоторых характерных точках (в точке симметрии, в центре одной из катушек и т. п.) по формуле для тонкой кольцевой катушки, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории».

Нанесите расчётные точки на экспериментальном графике либо сделайте расчёт всего графика на компьютере, используя, например, программу MathCAD. Тогда удобнее экспериментальные точки нанести на расчётном графике. MathCAD- программа с результатами расчёта и эксперимента приведена в приложении 3.

Таблица 2.3.1

х, мм	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
U, В											
B, мТл											

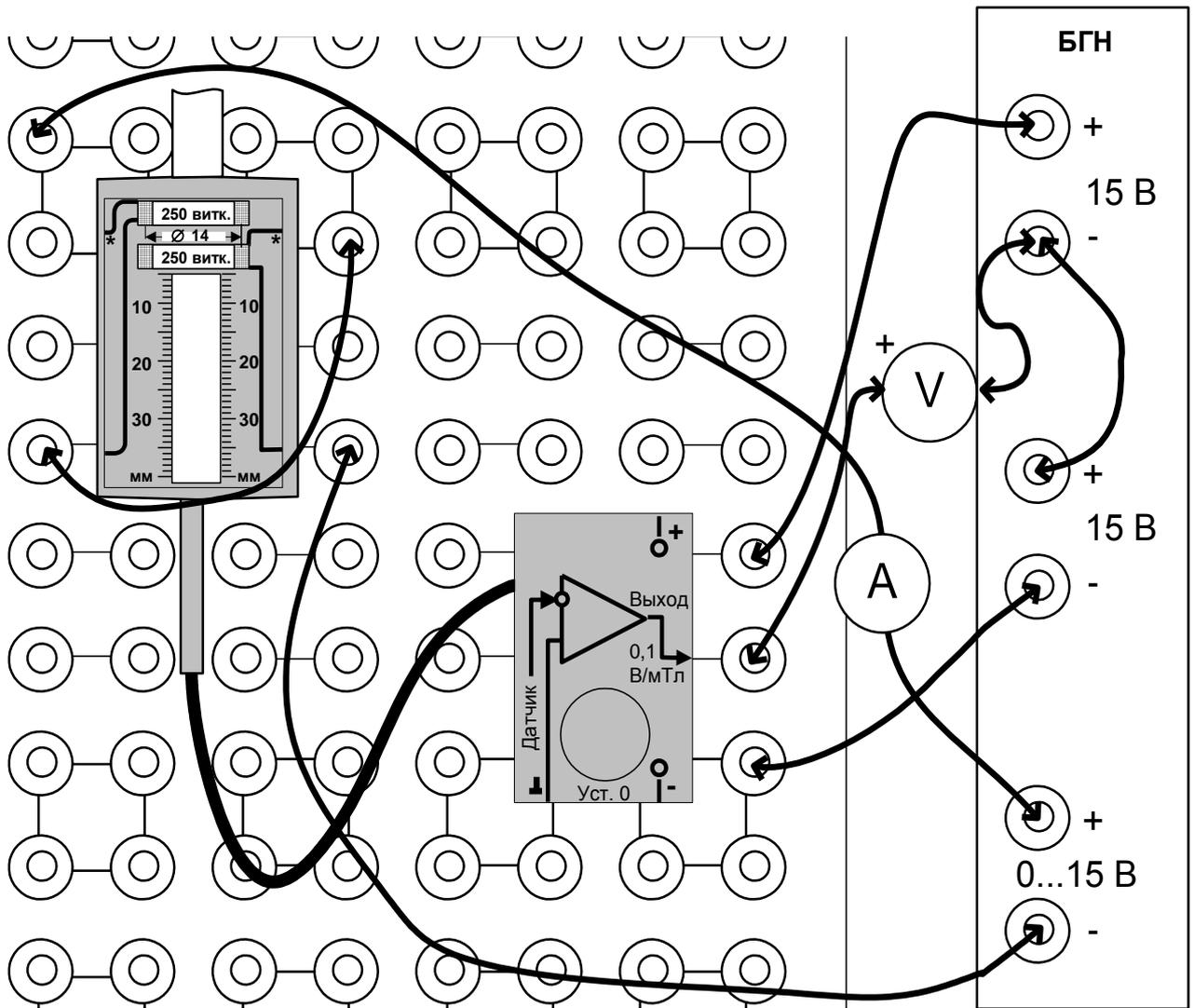


Рис. 2.4

Лабораторная работа №3

Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек

Цель работы: определение опытным и расчетным путем зависимости взаимной индуктивности двух соосных одинаковых катушек от расстояния между ними.

Краткие сведения из теории: опытным путём взаимная индуктивность двух катушек определяется из опыта, принципиальная схема которого изображена на рис. 3.1. Напряжение, индуцируемое во второй катушке изменением тока в первой:

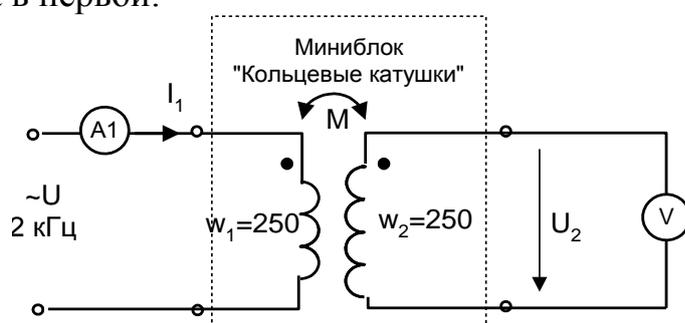


Рис. 3.1

$$U_2 = \omega M I_1,$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного тока

Отсюда:

$$M = U_2 / \omega I_1.$$

Расчетным путем взаимную индуктивность 2х катушек, изображенных на рисунке 3.2 определяем по формуле

$$M = k \cdot l = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 8,497 \omega^2 k d,$$

где: k – коэффициент связности катушек

l – индуктивность одной из катушек;

ω – число витков одной из катушек

d – средний диаметр катушек

значения коэффициента связи k в зависимости от отношения b/a или обратного отношения a/b даны в таблице Приложение 4.

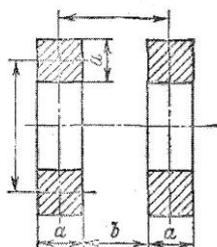


Рис 3.2

Экспериментальная часть

Задание: получить экспериментально зависимость взаимной индуктивности соосных кольцевых катушек от расстояния между ними. Проверить экспериментальные данные расчётом.

Порядок выполнения работы: установите на наборную панель миниблок «Кольцевые катушки» и сделайте все необходимые соединения согласно принципиальной схеме опыта (рис. 3.1)

Установите на генераторе напряжений специальной формы БГН синусоидальное напряжение частотой 2...3 кГц и задайте регулятором амплитуды ток в катушке 150...200 мА. Запишите эти значения и определите круговую частоту:

$$I = \dots\dots\dots\text{А}, \quad f = \dots\dots\dots\text{Гц}, \quad \omega = \dots\dots\dots\text{рад/с}.$$

Изменяя расстояние между катушками b -от минимально возможного 5 мм до 25 мм с шагом 5 мм, запишите в табл. 3.1 значения напряжения взаимной индукции

Таблица 3.1

Опытные данные				
$b, \text{ мм}$	$U_2, \text{ В}$	$M, \text{ мГн}$	k	M
5				
10				
15				
20				
25				

По формуле, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории», вычислите опытные значения взаимной индукции и постройте график $M = f(b)$.

По расчётным формулам, приведённым также в разделе «Краткие сведения из теории», рассчитайте зависимость $M(b)$, занесите результаты в табл. 3.1 и постройте расчётный график (для сравнения с опытным).

Лабораторная работа №4

Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов

Цель работы: проверка закона полного тока

Краткие сведения из теории:

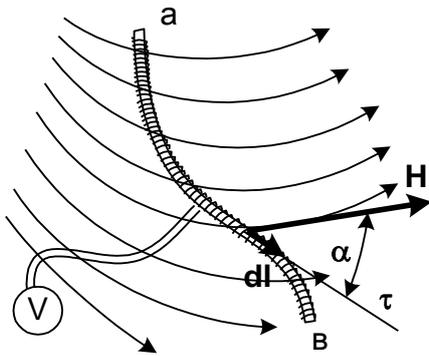


Рис. 4.1

Разностью магнитных потенциалов или магнитным напряжением вдоль некоторого пути «а-в» в магнитном поле (рис. 4.1) называется величина

$$F_{ав} = \int_a^b \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b H \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

В области вне электрических токов, магнитное напряжение не зависит от пути интегрирования, а определяется положением конечных точек этого пути.

Магнитное напряжение вдоль замкнутого контура согласно закону полного тока равно полному току i_w , охватываемому этим контуром:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_w$$

Замкнутый контур может быть разбит на участки, тогда для него: $F = i_w$ или, если участки однородные, то $Hl = i_w$.

Как для измерения магнитодвижущих сил в замкнутом контуре, так и для измерения магнитных напряжений вдоль любого отрезка применяют гибкую ленту из изолирующего материала, равномерно обмотанную изолированным проводом по всей длине, коротко - магнитный пояс или пояс Роговского (рис. 4.1). Поперечное сечение пояса (S) одинаково по всей длине и достаточно мало. Тогда, магнитный поток, сцеплённый с одним витком пояса:

$$\Phi = S\mu_0 H_0 \cos \alpha$$

где α – угол между направлением магнитной силовой линии и продольной осью пояса в данной точке.

На единицу длины пояса приходится w_0 витков, поэтому полное потокосцепление пояса:

$$\Psi = \int_a^b \Phi w_0 dl = \int_a^b S\mu_0 H w_0 \cos \alpha dl = \mu_0 S w_0 F_{ав}$$

Отсюда:

$$F_{ав} = \frac{1}{\mu_0 S w_0} \Psi = K \cdot \Psi$$

Постоянная пояса K зависит только от его сечения и числа витков на единицу длины.

Потокосцепление ψ можно измерить тем или иным способом. В случае постоянного магнитного поля обычно измеряют заряд, протекающий через обмотку пояса при включении или выключении тока, создающего поле. Этот заряд пропорционален установившемуся значению потокосцепления. При синусоидальном токе измеряют непосредственно напряжение индуктируемое переменным магнитным потоком в обмотке пояса. Действующее значение этого напряжения:

$$U = 4,44f U_m, \text{ откуда } U_m = U/4,44 f,$$

где U_m – амплитуда потокосцепления.

Отсюда имеем формулу для вычисления амплитуды магнитного напряжения:

$$F_m = \frac{K}{4,44f} U = K'U, \text{ где } K' = \frac{K}{4,44f} = \frac{1}{4,44\mu_0 S w_0 f}.$$

При известной постоянной K или K' , магнитный пояс можно использовать для измерения магнитных напряжений на участках магнитной цепи, магнитодвижущих сил, больших токов без разрыва цепи, определения числа витков катушек.

Экспериментальная часть

Задание: рассчитать и определить экспериментально постоянную пояса K' при синусоидальном токе, определить с помощью пояса число витков катушки, проверить выполнение закона полного тока в различных ситуациях путём измерения намагничивающих сил по замкнутым контурам и на отдельных участках.

Порядок выполнения работы: рассчитайте постоянную пояса при частоте синусоидального тока 1000 Гц, (значения w_0 и S указаны на поясе):

$$K' = \frac{1}{4,44\mu_0 S w_0 f}, \text{ А/В.}$$

Установите катушку $w = 900$ витков на наборную панель, соберите цепь по схеме рис. 4.2, подайте напряжение частотой 1000 Гц, установите максимально возможный ток в катушке и определите постоянную пояса из закона полного тока:

$$K' = \frac{\sqrt{2}Iw}{U}, \text{ А/В.}$$

Сравните полученную величину с расчётным значением.

Замените катушку на такую же с другим числом витков (например, 300 витков), измерьте магнитное напряжение по замкнутому контуру и определите число витков:

$$w = \frac{K'U}{\sqrt{2}I}.$$

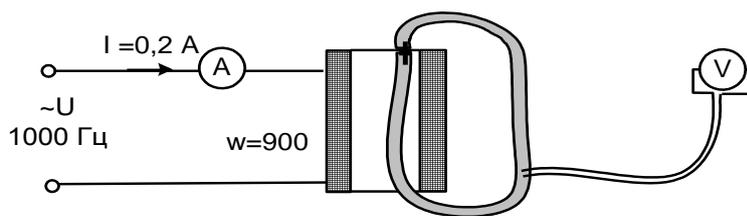


Рис. 4.2

Сравните полученную величину с паспортным значением, указанным на катушке.

Соедините две любые катушки последовательно согласно, установите в них ток 0,2 А, охватите обе катушки магнитным поясом, измерьте сумму магнитных напряжений вдоль замкнутого контура и проверьте выполнение закона полного тока. Результат проверки:

В общем виде:

В цифровом выражении:

$$K'U = \sqrt{2}I(w_1 + w_2).$$

Повторите опыт при встречном включении катушек и также сделайте проверку.

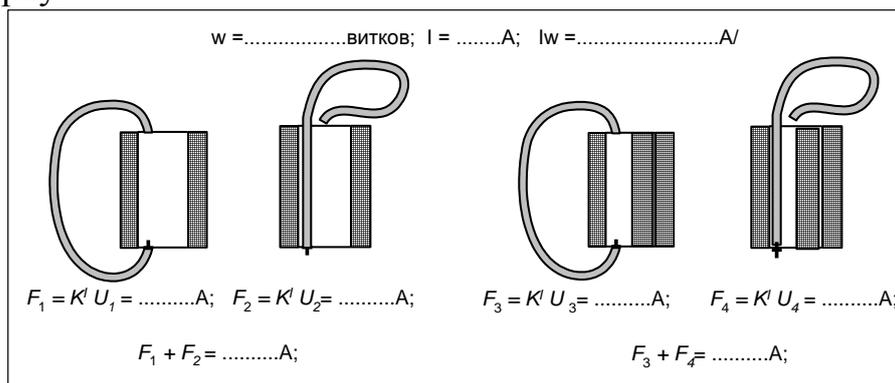


Рис. 4.3

Оставив в цепи одну катушку 900 витков, выясните изменение магнитных напряжений сил на отдельных участках замкнутого контура при внесении в катушку ферромагнитного сердечника (рис. 4.3). Ток во всех опытах поддерживайте неизменным. Скопируйте рис. 4.3 в отчёт, укажите на нём на нём результаты измерений и сделайте расчёты для проверки закона полного тока закону полного тока.

Объясните полученные результаты (увеличение или уменьшение магнитных напряжений на отдельных участках при внесении сердечника, есть ли изменение магнитодвижущей силы по замкнутому контуру и почему?)

Лабораторная работа №5

Исследование поляризационной кривой сегнетоэлектрика

Цель работы: экспериментальное получение на экране осциллографа кулон-вольтовой характеристики нелинейного конденсатора и расчет поляризационной характеристики диэлектрика

Краткие сведения из теории: поляризация диэлектриков - это смещение зарядов внутри его атомов и молекул под действием внешнего электрического поля, а вектор поляризованности P равен количеству заряда, прошедшего в результате поляризации через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению смещения.

В обычных диэлектриках вектор поляризованности P и вектор электрического смещения (вектор электростатической индукции) D пропорциональны напряжённости электрического поля E :

$$D = \epsilon_0 E + \xi E = (\epsilon_0 + \xi) E = \epsilon_a E,$$

где: ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость пустоты;

ξ - абсолютная диэлектрическая восприимчивость;

$\epsilon_a = \epsilon_0 + \xi$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Сегнетоэлектрики - это группа диэлектриков, у которых в некотором интервале температур наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризованность. В отсутствие внешнего поля векторы спонтанной поляризованности отдельных ячеек вещества (доменов) направлены хаотично и суммарная поляризованность равна нулю. При наложении внешнего поля наряду с обычной поляризацией происходит ориентация поляризованных доменов вдоль линий внешнего поля и суммарная поляризованность возрастает очень быстро. Зависимость $P(E)$, в отличие от обычных диэлектриков, становится нелинейной (рис. 5.1). При некотором значении

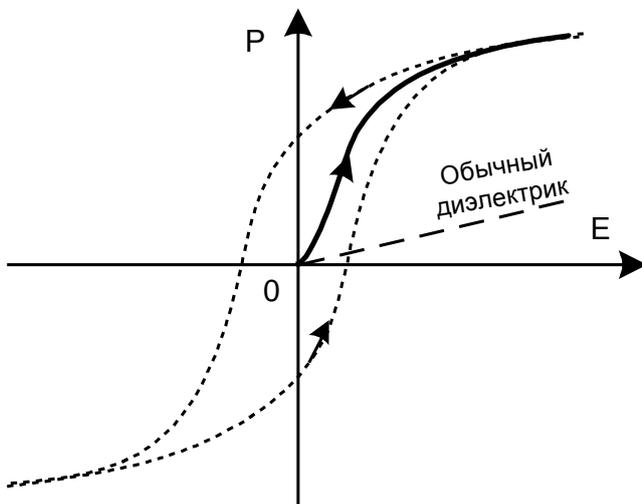


Рис 5 1

напряжённости поля этот процесс завершается и при дальнейшем увеличении поля поляризованность возрастает как в обычном диэлектрике. Это область насыщения сегнетоэлектрика. При уменьшении поля и дальнейшем изменении его направления кривая зависимости $P(E)$ не совпадает с первоначальной и идёт несколько выше, а при циклическом изменении напряженности образует замкнутую кривую, которая называется петлёй гистерезиса сегнетоэлектрика. Ширина петли и, следовательно, потери на поляризацию у различных сегнетоэлектриков существенно отличаются. Сегнетомягкие материалы,

напряжённости поля этот процесс завершается и при дальнейшем увеличении поля поляризованность возрастает как в обычном диэлектрике. Это область насыщения сегнетоэлектрика. При уменьшении поля и дальнейшем изменении его направления кривая зависимости $P(E)$ не совпадает с первоначальной и идёт несколько выше, а при циклическом изменении напряженности образует замкнутую кривую, которая называется петлёй гистерезиса сегнетоэлектрика. Ширина петли и, следовательно, потери на поляризацию у различных сегнетоэлектриков существенно отличаются. Сегнетомягкие материалы,

имеющие очень узкую петлю используются для изготовления малогабаритных конденсаторов большой ёмкости.

Если у обычных диэлектриков абсолютная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_a = (1 \dots 4) \epsilon_0$, то у сегнетоэлектриков она может достигать $10^4 \epsilon_0$.

В данной работе исследуется малогабаритный конденсатор, диэлектриком в котором служит сегнетомягкий материал. Для экспериментального получения зависимости $P(E)$ используется тот факт, что у сегнетоэлектриков $\epsilon_0 E \ll P$ и, следовательно $D \sim P$, т.е. зависимость $P(E)$ практически совпадает с $D(E)$. Последняя же подобна кулон-вольтовой характеристике $q(U)$, так как в конденсаторе, площадь пластин которого S и расстояние между ними d : $q = DS$ и $U = Ed$. Кулон-вольтовая характеристика конденсатора может быть получена на экране виртуального или электронного осциллографа.

Синусоидальное напряжение подаётся через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединённых линейного конденсатора C_1 и нелинейного конденсатора с изоляцией из сегнетоэлектрика C_0 . Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению U_1 :

$$q = C_1 U_1.$$

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 5.2

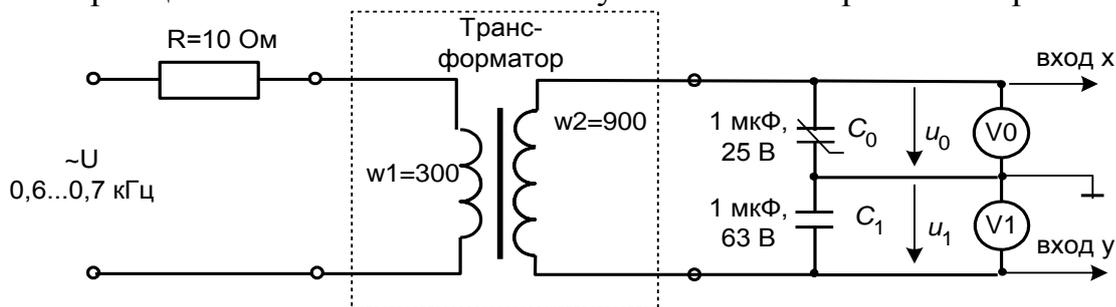


Рис.5.2

Напряжение U_1 подаётся на вертикальный вход электронного или виртуального осциллографа, а U_0 - на горизонтальный. На экране осциллографа появляется зависимость $q(U)$ для нелинейного конденсатора. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику $P(E)$:

$$E = \frac{u_0}{d},$$

где d – толщина диэлектрика.

$$P = D - \epsilon_0 E \cong \frac{C_1 u_1}{S},$$

где S – площадь обкладок конденсатора.

Добавочный резистор $R = 10$ Ом служит для ограничения постоянной составляющей тока, возникающего из за наличия небольшой постоянной составляющей в выходном напряжении генератора.

Экспериментальная часть

Задание: получить на экране виртуального или электронного осциллографа кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора $q(u)$. Рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика $P(E)$, а также зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля $\epsilon(E)$, приняв площадь поверхности обкладки конденсатора $S = 300 \text{ мм}^2$ и толщину изоляции $d = 0,01 \text{ мм}$.

Порядок выполнения работы

Соберите на наборном поле лабораторную установку согласно схеме опыта, изображенной на рис. 5.3 и установите пределы измерения вольтметра $V_0 - 100 \text{ В}$, а вольтметра $V_1 - 20 \text{ В}$.

Предупреждение: Амплитуда напряжения на нелинейном конденсаторе вследствие резонансных явлений на высших гармониках может достигать 100 В . При использовании виртуальных приборов для уменьшения синфазного сигнала на входе коннектора и снижения помех не меняйте местами линейный и нелинейный конденсаторы и соблюдайте полярность подключения коннектора, указанную на схеме. При использовании электронного осциллографа сле-

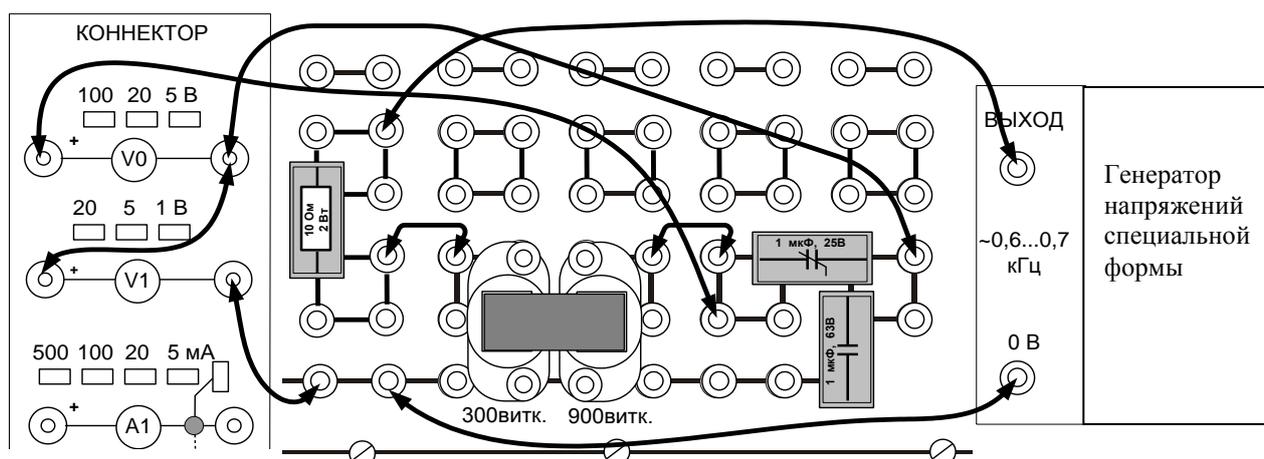


Рис.5.3

дите за правильным подключением общей точки горизонтального и вертикального входов.

Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активизируйте в верхнем окне этого блока прибор V_0 , а в третьем сверху – V_1 и установите род измеряемой величины – «Амплитуда».

Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал V_0 , а к третьему – сигнал V_1 . Установите длительность развёртки 200 мкс/дел .

Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой $0,6...0,7 \text{ кГц}$ максимальной амплитуды.

Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует

изменению напряжения на нелинейном конденсаторе U_0 , кривая зелёного цвета – изменению напряжения на линейном конденсаторе U_1 . При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.

Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтовой характеристики конденсатора. При этом на вход X нужно подать напряжение U_0 (канал 1), а на вход Y – напряжение U_1 (канал 3). Петля гистерезиса данного типа конденсаторов весьма узкая, на осциллографе она наблюдается как одна линия.

Зафиксируйте масштабы осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.

Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в табл. 5.1 амплитуды напряжений на линейном конденсаторе – U_1 и на нелинейном - U_0 .

Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика $P=f(E)$ и зависимость $\epsilon=f(E)$. Выберите масштабы и соответствующие постройте графики.

Таблица 5.1.

$U_0, В$	$U_1, В$	$E, В/м$	$P, Кл/м^2$	$\epsilon = \Delta P / \epsilon_0 \Delta E$	$E_{\text{н0}}, \hat{A} / \hat{i}$
0					
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					

Лабораторная работа №6

Снятие петли гистерезиса ферромагнетика

Цель работы: снятие с помощью осциллографа $\hat{A} = f(H)$

Краткие сведения из теории: зависимость $\hat{A} = f(H)$ - кривая намагничивания ферромагнитного материала при циклическом перемагничивании имеет вид петли. Она может быть снята с помощью осциллографа.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис.6.1

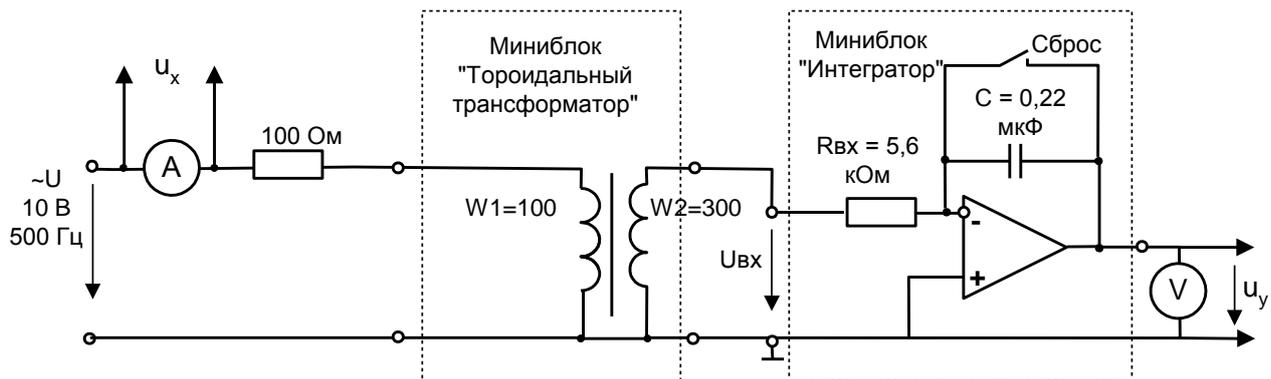


Рис.6.1

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетке миниблока «Тороидальный трансформатор». На сердечнике имеются первичная обмотка 100 витков и вторичная – 300 витков с отпайкой на 100 витков. Первичная обмотка подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. Ко вторичной обмотке – 300 витков подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int u_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{\text{вх}} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{вх}} C} BS,$$

где: $R_{\text{вх}}$ и C – параметры интегратора,
 S – сечение сердечника
 B – магнитная индукция.

Для исключения постоянной составляющей переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Отсюда магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{вх}} C}{w_2 S} u_{\text{вых}}$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = iw/l,$$

где: l – длина средней линии сердечника.

Напряжение U_δ с шунта амперметра подаётся на горизонтальный вход виртуального осциллографа, а напряжение U_y с выхода интегратора - на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе - магнитной индукции, экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость $B(H)$.

Экспериментальная часть

Задание: получить на осциллографе петлю гистерезиса ферромагнетика, снять экспериментально основную кривую намагничивания, рассчитать и построить зависимость относительной магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.

Порядок выполнения работы: соберите лабораторную установку по схеме рис. 6.2 и установите пределы измерения вольтметра V1 - 5 В и амперметра A1 – 100 мА. Переключатель интегратора установите в положение «Сброс».

Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активизируйте в верхнем окне этого блока прибор V1, а в третьем сверху – A3 и установите род измеряемой величины – «Амплитуда».

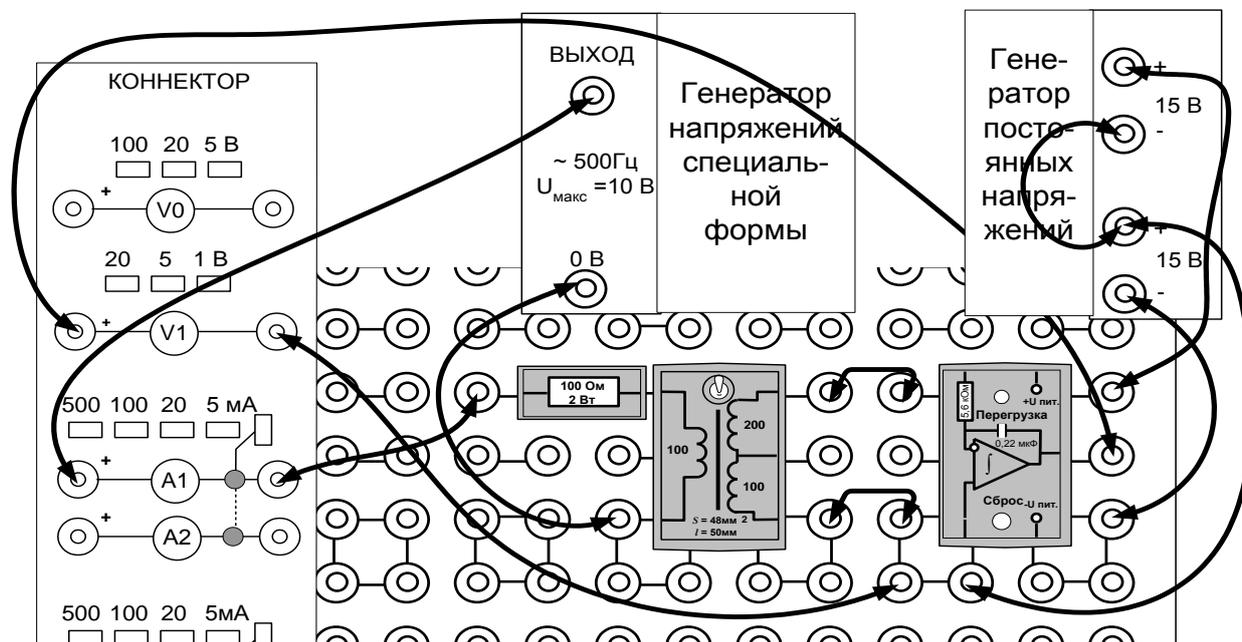


Рис. 6.2.

Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал V1, а к третьему – сигнал A1. Установите длительность развёртки 200 мкс/дел.

Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 500 Гц максимальной амплитуды.

Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует изменению магнитного потока, кривая зелёного цвета – изменению тока. При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.

Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. При необходимости замените токоограничивающий резистор 100 Ом на меньшее значение.

Зафиксируйте масштабы осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.

Запишите в табл. 6.1 исходные значения амплитуды тока и амплитуды выходного напряжения интегратора.

Шаг за шагом уменьшая намагничивающий ток до нуля, снимите зависимость амплитуды выходного напряжения интегратора от амплитуды тока.

По формулам, приведённым в разделе «Краткие сведения из теории» рассчитайте соответствующие значения магнитной индукции, напряжённости магнитного поля и постройте график $B=f(H)$.

Вычислите магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

где: $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума.

Постройте график $B=f(H)$, относя каждое вычисленное значение к среднему значению напряжённости:

$$H_{cp} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

Таблица 6.1

$I_{\text{макс}}, \text{мА}$	$U_{\text{макс}}, \text{мВ}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	μ_r	$H_{\text{ср}}, \text{А/м}$
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					

Лабораторная работа №7

Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле

Цель работы: определение опытным и расчетным путем зависимости электромагнитной силы от тока в катушке.

Краткие сведения из теории: в данной работе измеряется сила притяжения двух подковообразных частей разъемного сердечника трансформатора, когда по его обмоткам, включенным последовательно согласно, протекает постоянный ток.

Эта сила может быть определена по плотности энергии магнитного поля в зазоре между сердечниками:

$$F_{\text{расч}} = 2 \left(S \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) = S \mu_0 \left(\frac{wI}{2\delta} \right)^2,$$

где: $F_{\text{расч}}$ – расчётная сила в Ньютонах;

множитель 2 учитывает две силы, приложенные к двум концам подвижного сердечника;

$S = 16 \times 13 \cdot 10^{-6} = 208 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - поперечное сечение сердечника;

$\mu_0 = 12.56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость воздуха;

H – напряжённость магнитного поля в зазоре;

$w = 1800$ суммарное число витков двух катушек, соединённых последовательно;

I – ток в катушках;

2δ - двойной зазор между подковами сердечника (его величина указана на этикетке миниблока).

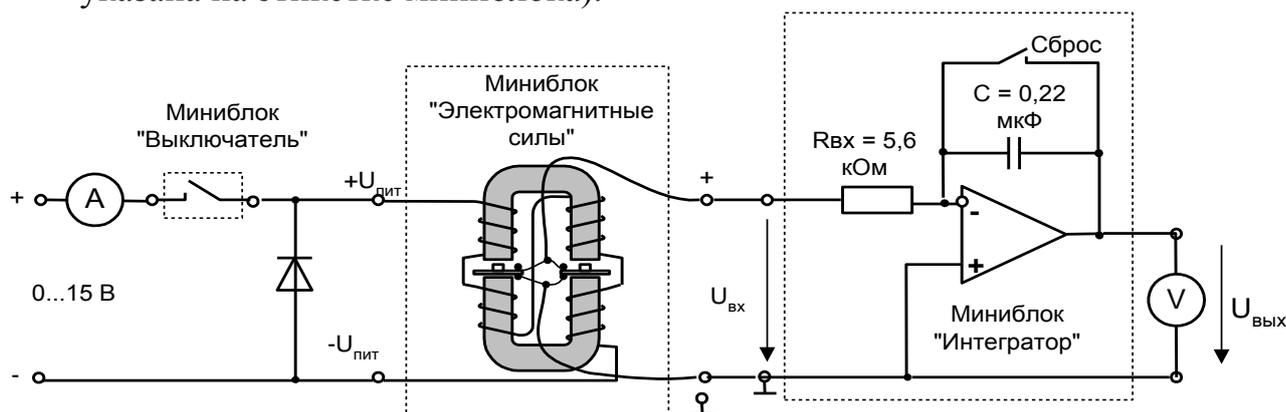


Рис. 7.1

Принципиальная схема установки показана на рис. 7.1. При включении выключателя по катушкам трансформатора начинает протекать постоянный ток, и две половины разъемного сердечника притягиваются друг к другу. При отключении цепи сила притяжения исчезает. Полупроводниковый диод в схеме служит для исключения перенапряжений в схеме при отключении катушки.

Для измерения силы в зазоры между двумя частями сердечника встроены датчики силы. Принцип действия датчика основан на пьезоэлектрическом эффекте. При воздействии силы на его выводах образуются противоположные заряды, пропорциональные силе. Для измерения этого заряда к выходу датчика подключен интегрирующий усилитель. Он интегрирует импульс тока во входной цепи интегратора в процессе изменения силы, воздействующей на датчик. Таким образом, напряжение на выходе интегратора пропорционально заряду на электродах датчика силы. Для установки нулевого напряжения на выходе интегратора служит выключатель «Сброс». После установки нуля переключатель нужно вернуть в исходное положение, и интегратор готов к работе.

Следует иметь в виду, что даже при отсутствии входного сигнала, напряжение на выходе интегратора медленно меняется вследствие дрейфа нуля и интегрирования различных утечек схемы. Поэтому установку нуля необходимо выполнять непосредственно перед каждым измерением, а отсчёт выходного напряжения необходимо выполнять в течение двух – трёх секунд сразу после интегрирования.

Для калибровки системы «датчик – интегратор» используется вес самого подвижного сердечника. Он указан на этикетке сердечника.

Экспериментальная часть

Задание: снять экспериментально зависимость силы притяжения двух частей разъемного сердечника трансформатора от тока в катушке. Проверить эксперимент расчётом.

Порядок выполнения работы: Соберите установку как показано на рис. 7.2. Переключатель интегратора установите на «Сброс», выключатель на входе цепи выключите (положение «вверх»).

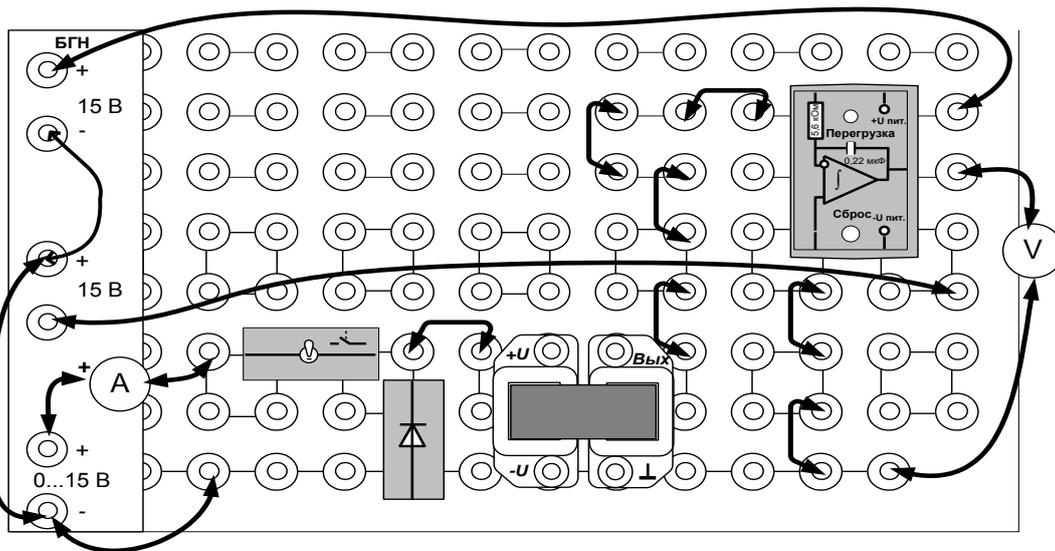


Рис. 7.2

Включите блок генераторов напряжений (БГН), убедитесь, что на выходе интегратора напряжение близко к нулю (< 10 мВ).

Установите предел измерения вольтметра – 2 В постоянного напряжения, переведите переключатель интегратора в нижнее положение и тотчас же выньте верхнюю половину сердечника из катушек. Сразу после этого сделайте отсчёт напряжения на выходе интегратора.

Переключите интегратор в положение «Сброс», убедитесь, что на его выходе установилось нулевое напряжение, верните переключатель в нижнее положение и тотчас же вставьте сердечник в катушки, не нажимая на него и не бросая с большой высоты. Снова сделайте отсчёт выходного напряжения. Оно не должно сильно отличаться от напряжения в предыдущем опыте, но знак напряжения меняется на противоположный.

Для калибровки системы «датчик – интегратор» проделайте предыдущие два опыта 5 раз, записывая результаты отсчёта напряжения в таблицу 7.1. без учёта знака.

Таблица 7.1

$U_{\text{вых}}$, В при снятии сердечника					
$U_{\text{вых}}$, В при установке сердечника					

Отбросьте сильно отличающиеся значения напряжения, а по остальным вычислите среднее значение и постоянную системы «датчик - интегратор»:

$$\square\square\square U_{\text{ср}} = \dots\dots\dots \text{г/В},$$

$$\alpha = 100/U_{\text{п0}} = \dots\dots\dots \text{г/В}.$$

Включите выключатель на входе цепи и установите начальное значение тока в катушке 50 мА, проделайте «Сброс» интегратора, и тотчас выключите ток в катушке. Запомните или запишите показание вольтметра. Проделайте этот опыт несколько раз при включении и выключении тока и запишите в табл. 7.2 среднее или наиболее часто повторяющееся показание вольтметра без учёта знака.

Повторите этот опыт при других значениях тока, указанных в табл.7.2.

По опытным данным определите силу в граммах по формуле: $F_{\text{эксп}} = \alpha U_{\text{вых}}$ и занесите результаты в табл.7.2.

Определите расчётную силу по формуле, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории», переведите её в граммы и также занесите в табл. 7.2. Постройте графики $F_{\text{расч}}=f(I)$ и $F_{\text{эксп}}=f(I)$, сравните их и сделайте выводы.

Таблица 7.2.

$I, \text{мА}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$F_{\text{эксп}}, \text{г}$	$F_{\text{расч}}, \text{г}$
50			
100			
150			
200			

Лабораторная работа №8

Цель работы: исследование распределения тока в массивных проводниках

Краткие сведения из теории: переменный ток распределяется по сечению массивных проводников (шин) неравномерно вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Наибольшая плотность тока наблюдается на поверхности шины и уменьшается к центру поперечного сечения (рис.8.1.а). В двух близко расположенных шинах с противоположным направлением токов, кроме того, происходит вытеснение токов на поверхности шин обращённые друг к другу (рис.8.1б). При одинаковых направлениях токов в двух таких шинах вытеснение токов происходит на внешние поверхности.

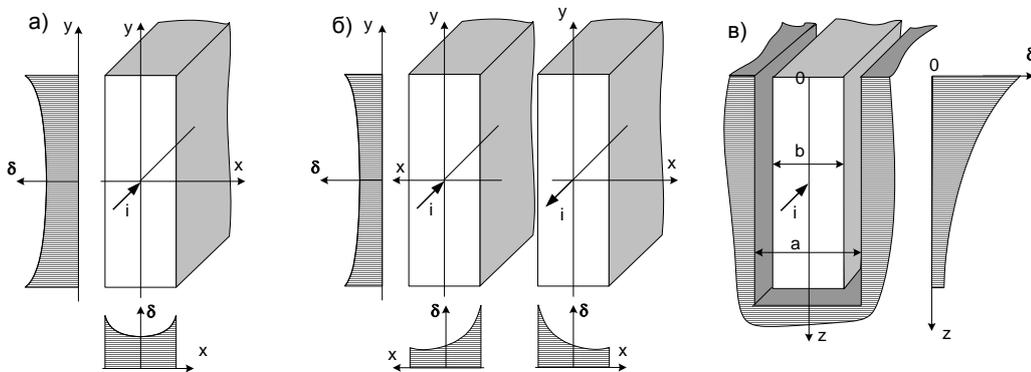


Рис. 8.1

В проводнике, уложенном в ферромагнитный паз ротора или статора электрической машины происходит вытеснение тока на открытую поверхность проводника (рис. 8.1в).

Неравномерное распределение тока по сечению проводников приводит к увеличению их активных сопротивлений, что необходимо учитывать при проектировании электрических машин и токопроводов.

Наиболее простым для математического описания является проводник, уложенный в ферромагнитный паз. При достаточной высоте паза можно пренебречь отражённой электромагнитной волной от его дна. Тогда распределение действующего значения плотности тока по высоте паза (вдоль оси z) может быть описано следующей формулой [1]:

$$\underline{\delta}(z) = \delta(0)e^{-kz} e^{j(45^\circ - kz)},$$

где: $k = \sqrt{\frac{b}{a} \frac{\omega \mu \gamma}{2}}$ - коэффициент затухания и коэффициент фазы;

$$\delta(0) = \frac{\sqrt{2k}}{b} I - \text{действующее значение плотности тока на открытой}$$

поверхности проводника;

где: I – действующее значение тока в проводнике;

ω - круговая частота переменного тока;

μ и γ - магнитная проницаемость и проводимость проводника;

$a = 2$ мм - ширина паза;

$b = 0,35$ мм - толщина проводящей шины.

Согласно этим формулам, плотность тока уменьшается вдоль оси z по экспоненциальному закону (множитель e^{-kz}). Начальная фаза плотности тока на поверхности проводник равна 45° и с увеличением координаты z изменяется по фазе в сторону отставания ($\varphi = 45^\circ - kz$).

Глубина, на которой плотность тока в $e^1 = 2,718$ раз меньше, чем на поверхности проводника, называется глубиной проникновения электромагнитной волны $h = 1/k$. Глубина проникновения уменьшается с увеличением частоты переменного тока, магнитной проницаемости и проводимости проводника.

В данной работе исследуется распределение тока в ленточных медных проводниках толщиной 0.35 мм и шириной 25 мм при их различном взаимном расположении (рис.8.2).

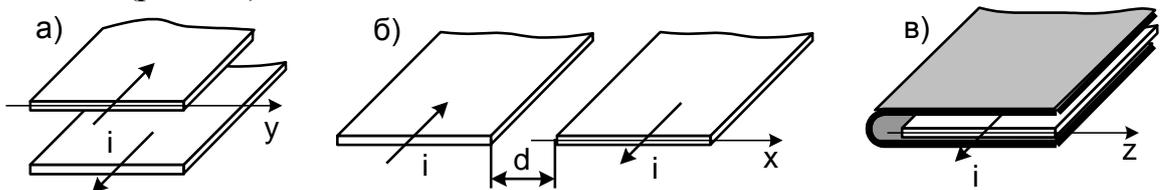


Рис. 8.2

Первый вариант расположения проводников (см. рис. 8.2а) позволяет экспериментально исследовать распределение тока вдоль ширины (ось y) двух близко расположенных прямоугольных шин, показанных на рис. 8.1б.

Во втором случае (рис. 8.2б) опыт может быть выполнен при двух значениях расстояния между шинами: $d = 63$ мм и $d = 3$ мм.

При большом расстоянии между ленточными проводниками, распределение тока в них аналогично распределению тока в одном из горизонтальных слоёв прямоугольной шины, показанной на рис. 8.1а (вдоль оси x). Эффект близости сказывается здесь незначительно.

При малом расстоянии между ленточными проводниками их можно рассматривать как один из горизонтальных слоёв двух близко расположенных шин, показанных на рис. 8.1б. Вдоль горизонтальной оси (оси x) здесь сильно проявляется эффект близости.

В третьем случае (рис. 8.2в.) медная лента охвачена с трёх сторон ферромагнитным экраном и распределение тока в ней примерно такое же, как в проводнике, уложенном в паз электрической машины (рис.8.1в).

Проводящие ленты для каждого из описанных четырёх вариантов смонтированы на стеклотекстолитовых платах и образуют замкнутые контуры. Электрический ток к ним подводится через понижающий трансформатор, вторичной обмоткой которого является сам контур из проводящих лент и соединительных шин (один виток).

Лабораторная установка с одним из вариантов проводящего контура схематично показана на рис. 8.3.

Для её сборки необходимо сначала установить в левой верхней части наборной панели катушку трансформатора 170 витков вместе с нижней U-образной частью разъёмного сердечника, затем надеть на катушку один из исследуемых проводящих контуров и закрепить его над наборной панелью, пользуясь соединительными вилками со средним выводом, как подставками. Подставки необходимы для увеличения расстояния между исследуемыми проводниками и металлической поверхностью наборной панели. Иначе наводимые в ней вихревые токи существенно изменят распределение тока в

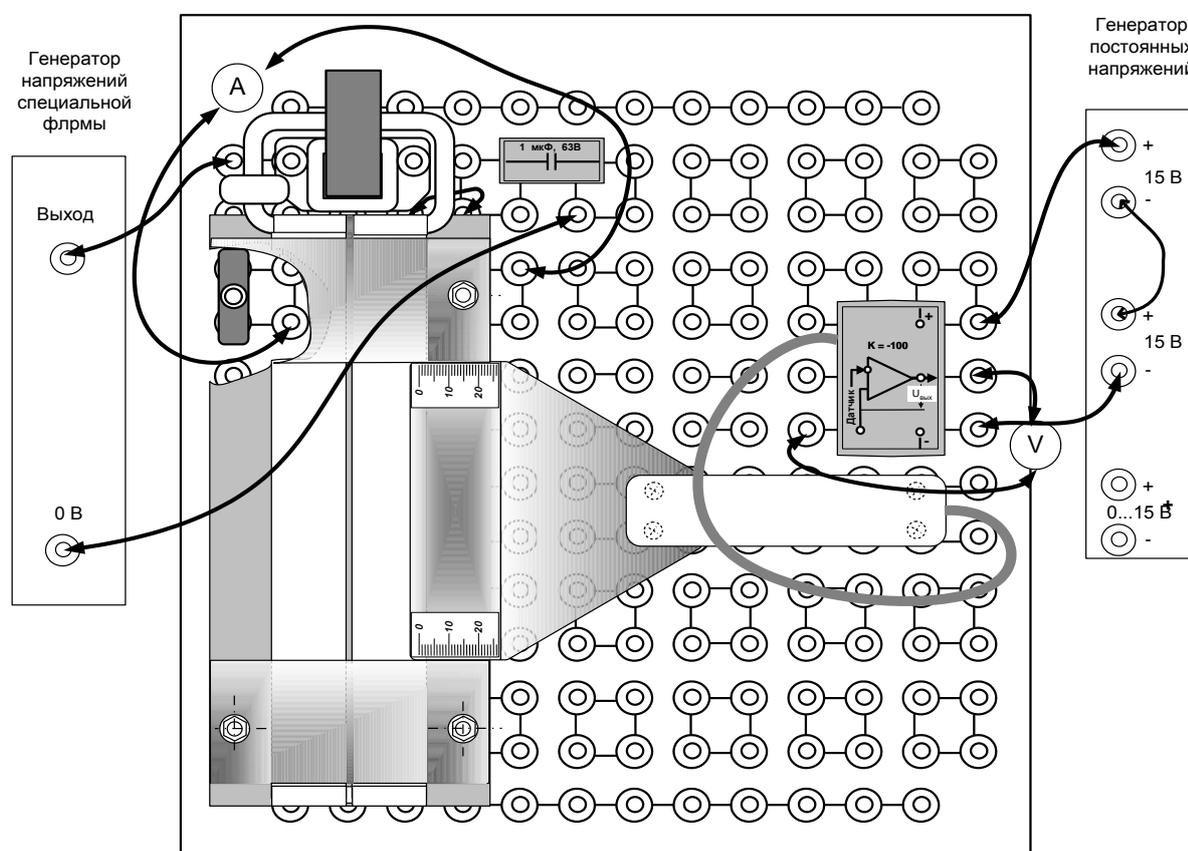


Рис.8.3

исследуемых проводниках.

После этого нужно вставить в катушку вторую половинку разъёмного сердечника и скрепить две половинки сердечника резиновым кольцом.

Для измерения падения напряжения вдоль нити тока в проводящей ленте служит датчик напряжения, также изображённый на рис. 8.3. Он представляет собой пластинку из стеклотекстолита, в которую вмонтированы два миниатюрных контакта. Провода от контактов проходят вдоль нити тока в исследуемом проводнике до середины пластинки, затем они поворачивают на 90° и проходят

вместе сквозь ручку к усилителю напряжения. При прижатии контактов к исследуемой поверхности, соединительные провода датчика оказываются расположенными почти вплотную к этой поверхности. В результате, магнитный поток, сцеплённый с контуром измерительной цепи, оказывается близким к нулю и на вход усилителя подводится активная составляющая напряжения, пропорциональная плотности тока:

$$U = El = \frac{\delta}{\gamma} l$$

где: U – напряжение между контактами датчика,
 E – тангенциальная составляющая напряжённости электрического поля,

l – расстояние между контактами датчика, равное 0,1 м.

$\gamma = 55 \frac{i}{\hat{h} \cdot \hat{i}^2}$ – удельная проводимость медного проводника.

Для измерения тока в исследуемых проводниках используется трансформатор тока с коэффициентом трансформации 100. Он имеет один первичный виток и расположен непосредственно на соединительной шине (рис. 8.3).

Экспериментальная часть

8.1. Исследование распределения тока в массивных проводниках

Задание: Исследовать экспериментально изменение действующего значения и начальной фазы плотности тока по ширине медного ленточного проводника в следующих случаях:

Две ленты с противоположно направленным током расположены параллельно в двух плоскостях одна над другой.

Две ленты с противоположно направленным током расположены параллельно в одной плоскости при расстоянии между лентами 63 мм.

То же при расстоянии между лентами 3 мм.

Порядок выполнения работы: соберите на наборной панели трансформатор с одним из проводящих контуров и установите на ней миниблок - усилитель датчика плотности тока (рис.8.3). Усилитель расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура.

Соберите электрическую цепь согласно принципиальной схеме, изображённой на рис. 8.4. Амперметр и вольтметр, показанные на схеме – виртуальные приборы. Конденсатор служит для компенсации индуктивного сопротивления контура и увеличения тока в нём.

Примечание: Виртуальные приборы можно заменить мультиметрами, но тогда Вы не сможете измерять начальную фазу плотности тока. Начальную фазу в этом случае можно измерять электронным осциллографом с помощью фигуры Лиссажу.

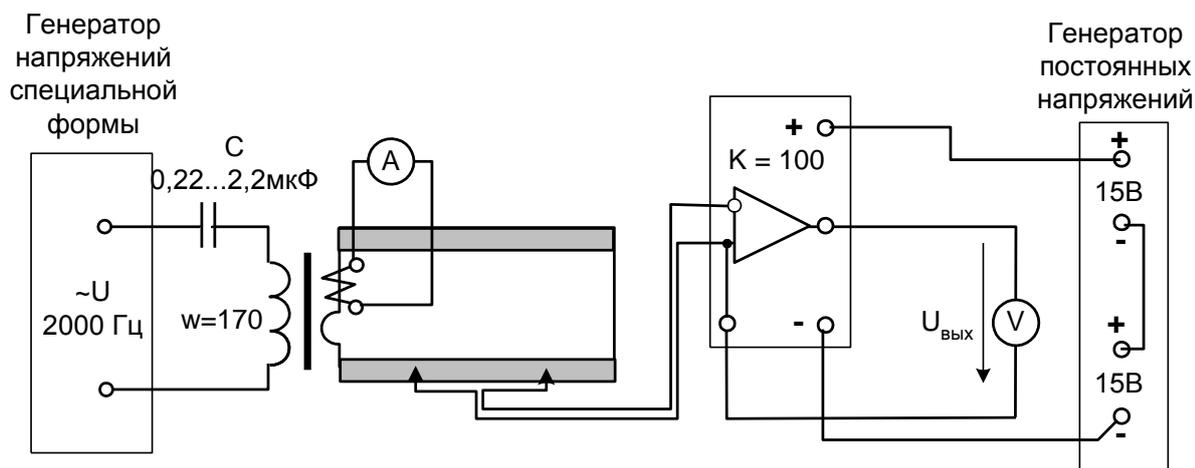


Рис. 8.4

Включите виртуальные приборы для измерения тока напряжения и сдвига фаз между ними.

Установите на источнике переменного тока синусоидальное напряжение частотой 2000...2500 Гц максимальной амплитуды и подберите ёмкость C , при которой ток в контуре наибольший. Для надёжных измерений он должен быть не меньше 25 А. Не забывайте, что ток в контуре в 100 раз больше, чем во вторичной обмотке трансформатора тока. При необходимости, можно увеличить ток подстройкой частоты приложенного напряжения ближе к резонансной. При этом следите за индикатором перегрузки источника.

Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и перемещая его по ширине ленты, убедитесь, что изменяются выходное напряжение усилителя и разность фаз. Если прибор показывает разность фаз больше 90° , поменяйте местами зажимы амперметра на коннекторе или зажимы трансформатора тока.

Измерьте выходное напряжение и разность фаз, перемещая датчик от одного края ленты до другого с шагом 5 мм и запишите результаты в табл. 8.1. Координата x в таблице соответствует расстоянию от края ленточного проводника до контактов датчика.

Рассчитайте плотность тока при каждом значении координаты. С учётом коэффициента усиления напряжения усилителя:

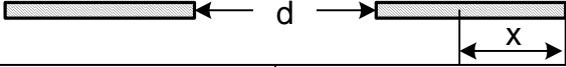
$$\delta = \frac{\gamma U_{\text{вых}}}{100l}$$

Плотность тока получится в А/мм², если в этой формуле γ - в м/(Ом мм²), $U_{\text{вых}}$ - в Вольтах, и $l = 0,1$ м - расстояние между контактами датчика.

Замените установленный контур на другой, затем на третий и повторите все опыты и расчёты.

Постройте график изменения плотности тока и его начальной фазы для исследованных случаев.

Таблица 8.1.

Координата x мм									
				d = 63 мм			d = 3 мм		
	$U_{\text{ВЫХ}}$, В	φ , град.	δ_{\square} , А/мм ²	$U_{\text{ВЫХ}}$, В	φ , град.	δ_{\square} , А/мм ²	$U_{\text{ВЫХ}}$, В	φ , град.	δ_{\square} , А/мм ²
0									
5									
10									
15									
20									
25									

8.2. Исследование распределения тока по сечению проводника, уложенного в ферромагнитный паз

Задание: Исследовать экспериментально изменение действующего значения и начальной фазы плотности тока по ширине медного ленточного проводника, помещённого в ферромагнитный экран (модель паза электрической машины). Проверить результаты эксперимента расчётом

Порядок выполнения работы: соберите на наборной панели трансформатор с моделью паза электрической машины.

Соберите электрическую цепь согласно схеме, изображённой на рис. 8.5. Усилитель расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура. Амперметр и вольтметр, показанные на схеме – виртуальные приборы.

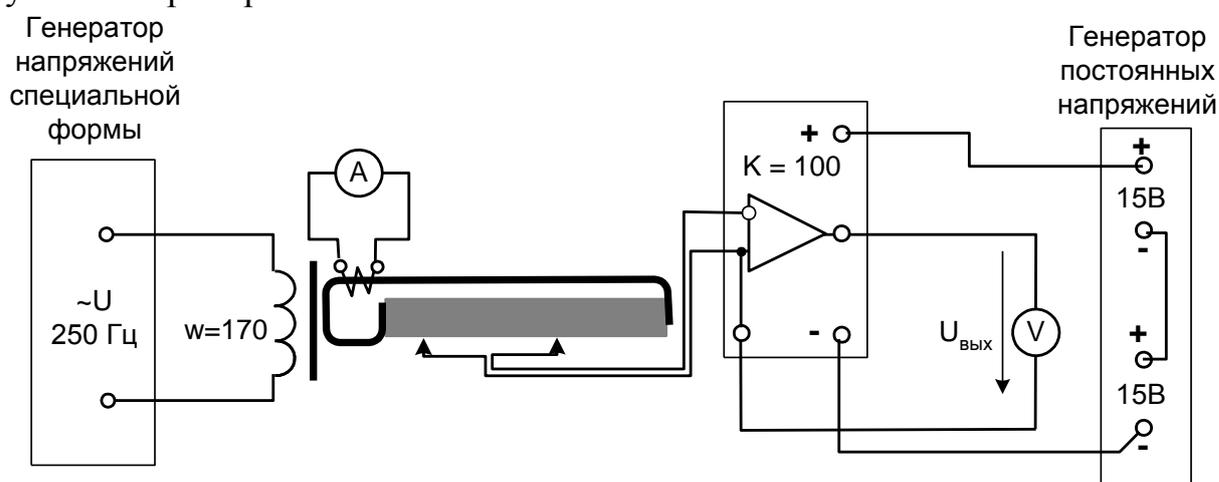


Рис. 8.5

Примечание: Виртуальные приборы можно заменить мультиметрами, но тогда Вы не сможете измерять начальную фазу плотности тока. Начальную фазу в этом случае можно измерять электронным осциллографом с помощью фигуры Лиссажу.

Включите виртуальные приборы для измерения тока, напряжения и сдвига фаз между ними.

Установите на источнике переменного тока синусоидальное напряжение частотой 250 Гц максимальной амплитуды

Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и вводя его внутрь «паза», убедитесь, что изменяются выходное напряжение усилителя и разность фаз. Если прибор показывает разность фаз больше 90° , поменяйте местами зажимы амперметра на коннекторе или зажимы трансформатора тока.

Измерьте выходное напряжение и разность фаз, перемещая датчик от открытого края «паза» до максимальной глубины с шагом 5 мм и запишите результаты в табл. 8.2. Координата z в таблице соответствует расстоянию от открытой стороны паза до контактов датчика.

Рассчитайте плотность тока при каждом значении координаты. С учётом коэффициента усиления напряжения усилителя:

$$\delta = \frac{\gamma U_{\text{вых}}}{100l}$$

Плотность тока получится в А/мм², если в этой формуле γ - в м/(Ом мм²), $U_{\text{вых}}$ - в вольтах, и $l = 0,1$ м - расстояние между контактами датчика.

Замените установленный контур на другой контур, затем на третий и повторите все опыты и расчёты.

Постройте график изменения плотности тока и его начальной фазы для исследованных случаев.

Приняв $a = 2$ мм. $b = 0,35$ мм и $\gamma = 55 \frac{1}{\hat{I} \cdot \hat{I}^2}$, вычислите:

$$k = \sqrt{\frac{b \omega \mu \gamma}{a^2}}, 1/\text{мм} - \text{коэффициент затухания и коэффициент фазы};$$

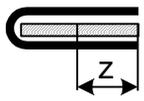
$\delta(0) = \frac{\sqrt{2}k}{b} I$, А/мм² - действующее значение плотности тока на открытой поверхности проводника;

Поделайте расчёт изменения плотности тока и его начальной фазы от координаты по формулам:

$$\underline{\delta}(z) = \delta(0)e^{-kz} \quad \text{и} \quad \varphi = 45^\circ - kz \frac{180}{\pi}$$

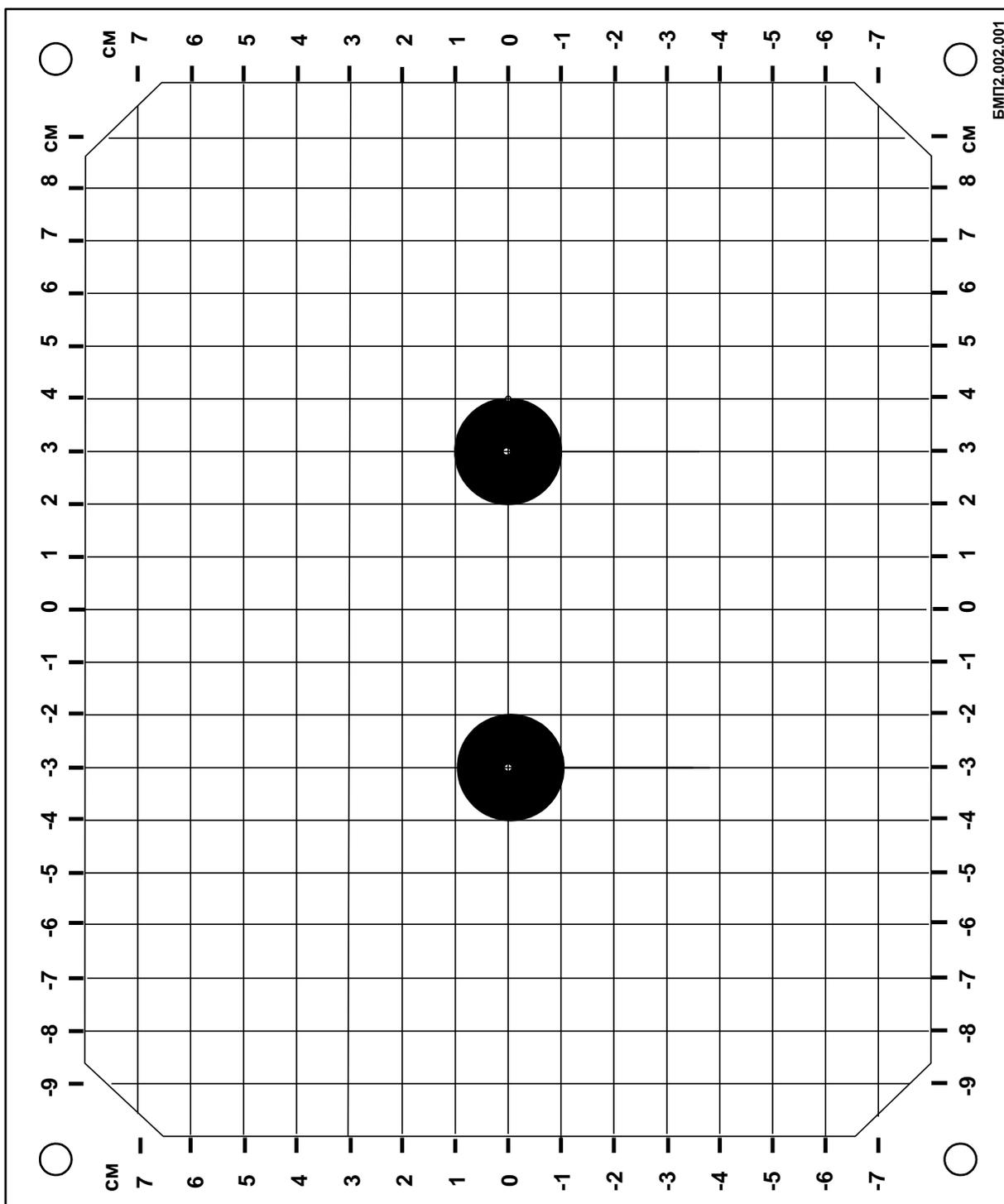
Результаты запишите в ту же табл. 8.2, постройте расчётные графики для сравнения с экспериментальными.

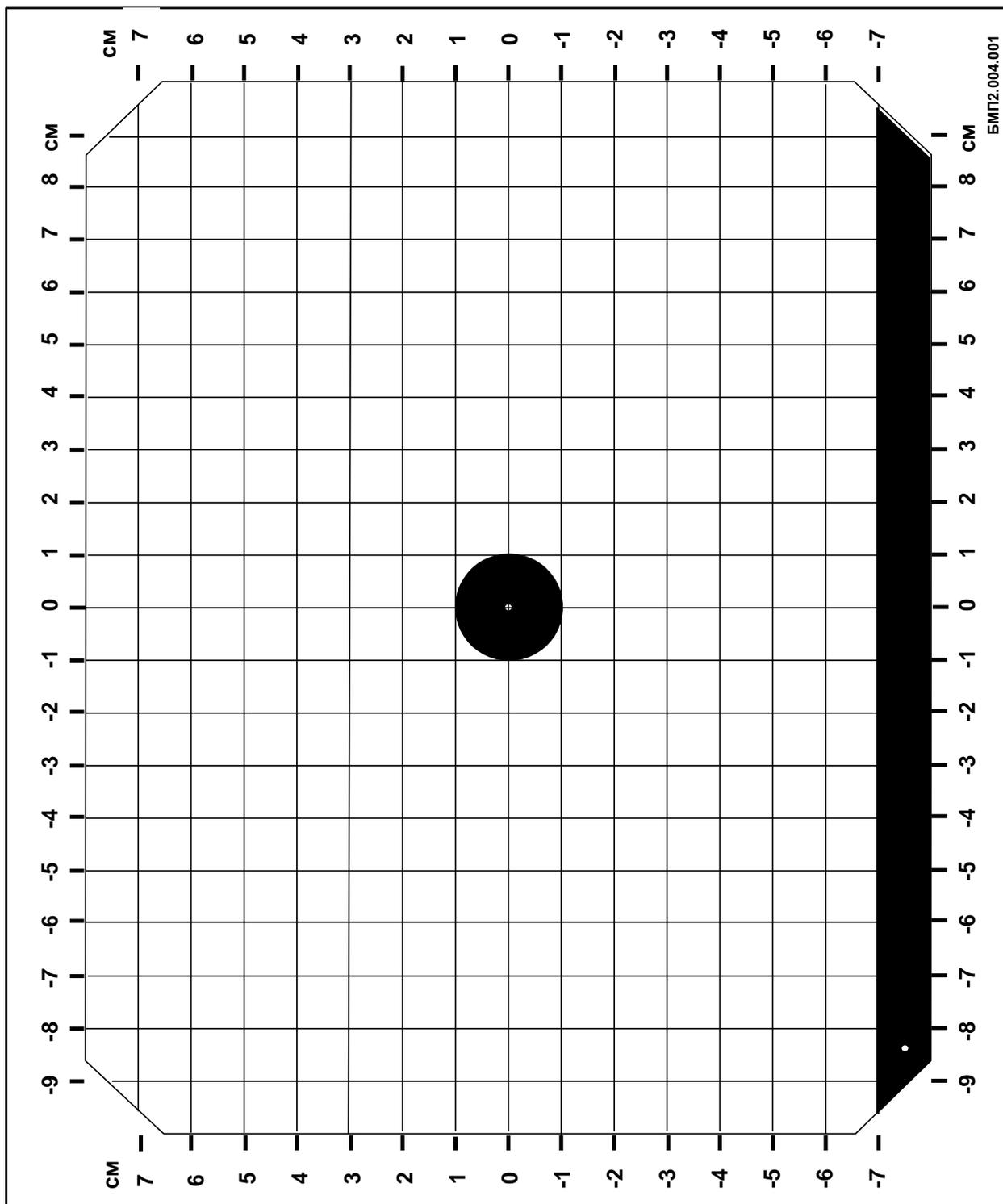
Таблица 8.2

	Экспериментальные данные:			Расчётные данные:		
	$f = \dots\dots\dots \text{Гц};$ $I = \dots\dots\dots \text{А}$			$k = \dots\dots\dots 1/\text{мм};$ $\delta_0 = \dots\dots\dots \text{А}/\text{мм}^2.$		
z, мм	U _{вых} , В	φ, град.	δ, А/мм ²	kz, 1/мм	δ, А/мм ²	φ, град.
0						
5						
10						
15						
20						

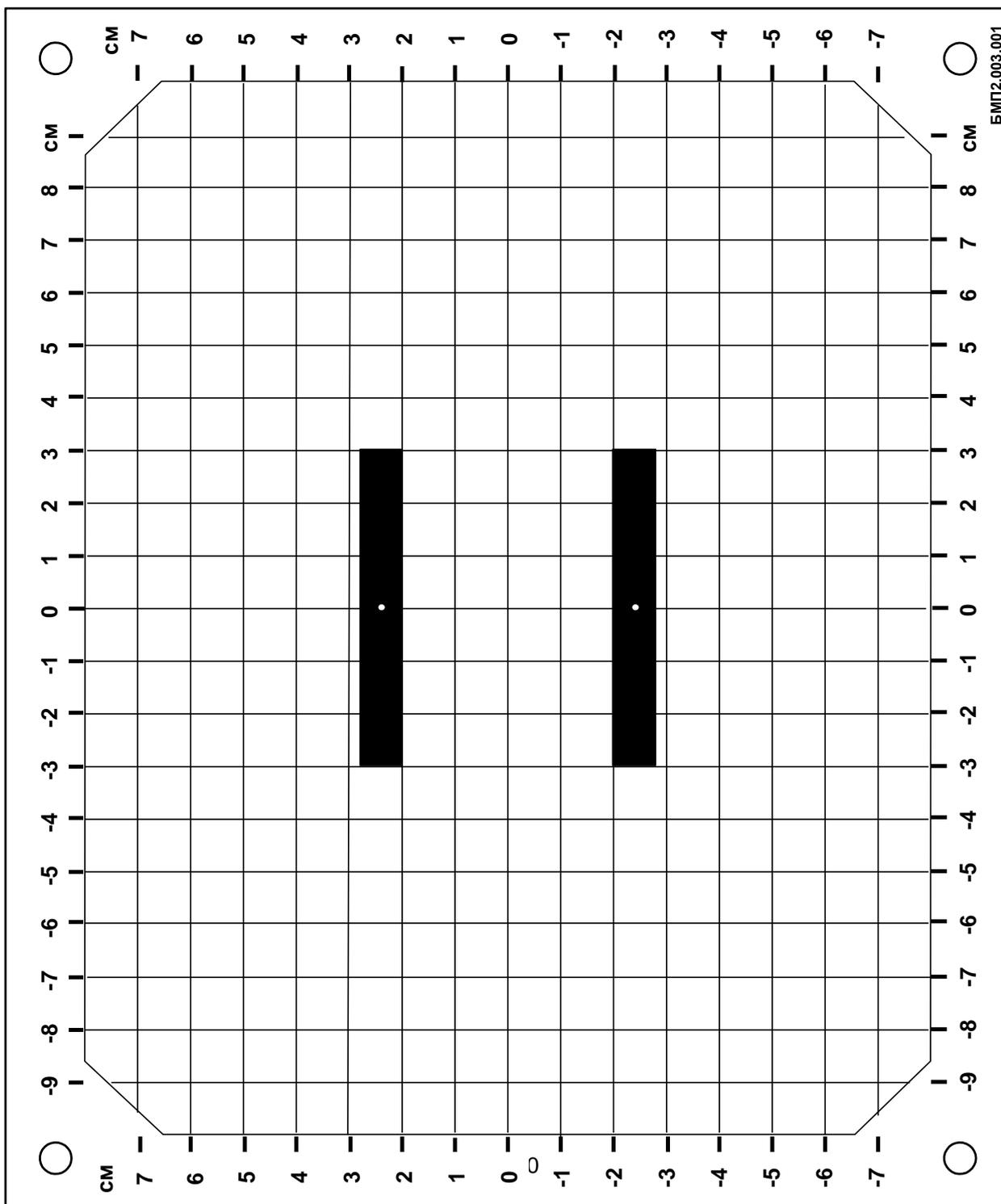
Координатные сетки для оформления отчётов по моделированию полей

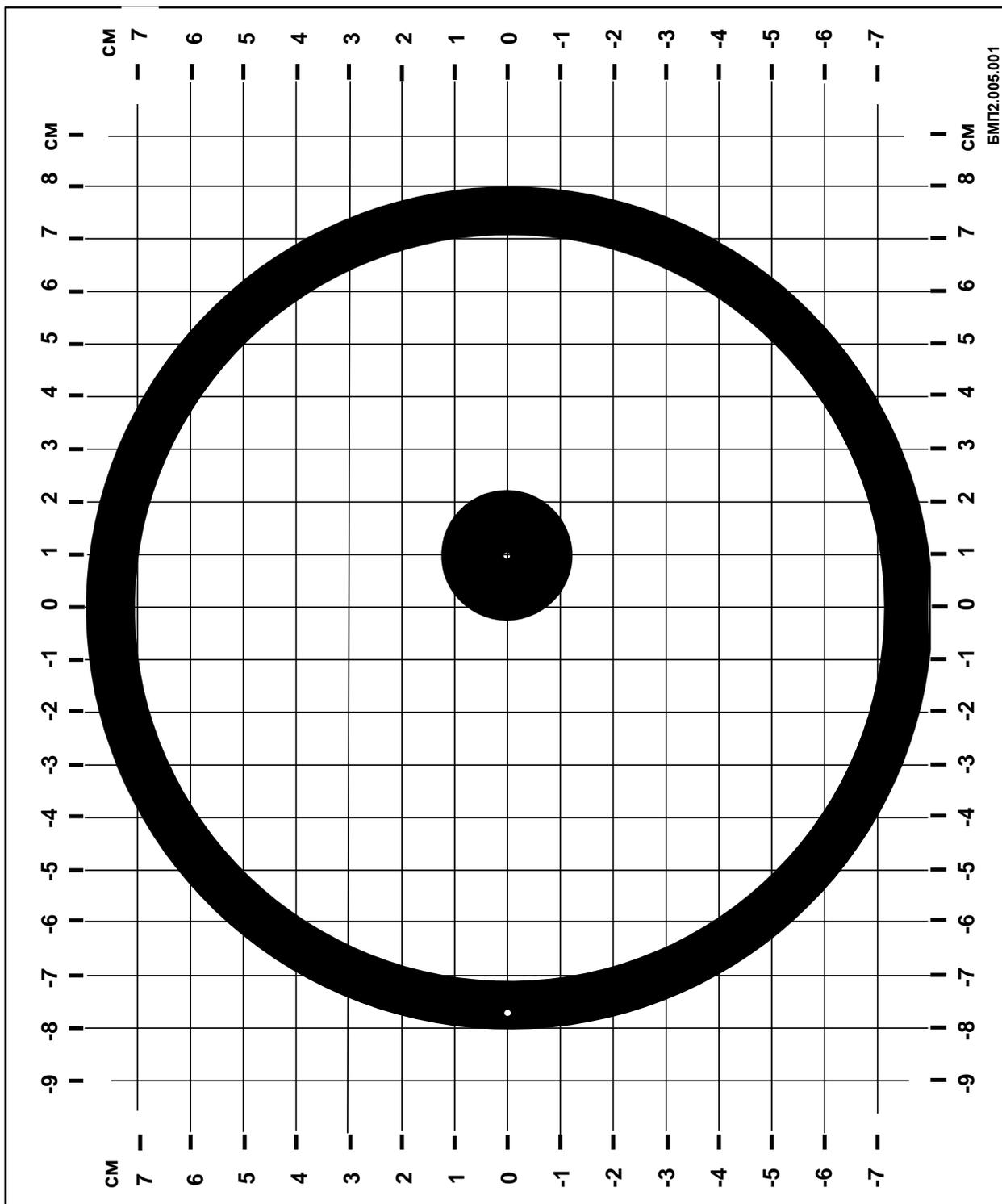
Планшет № 1

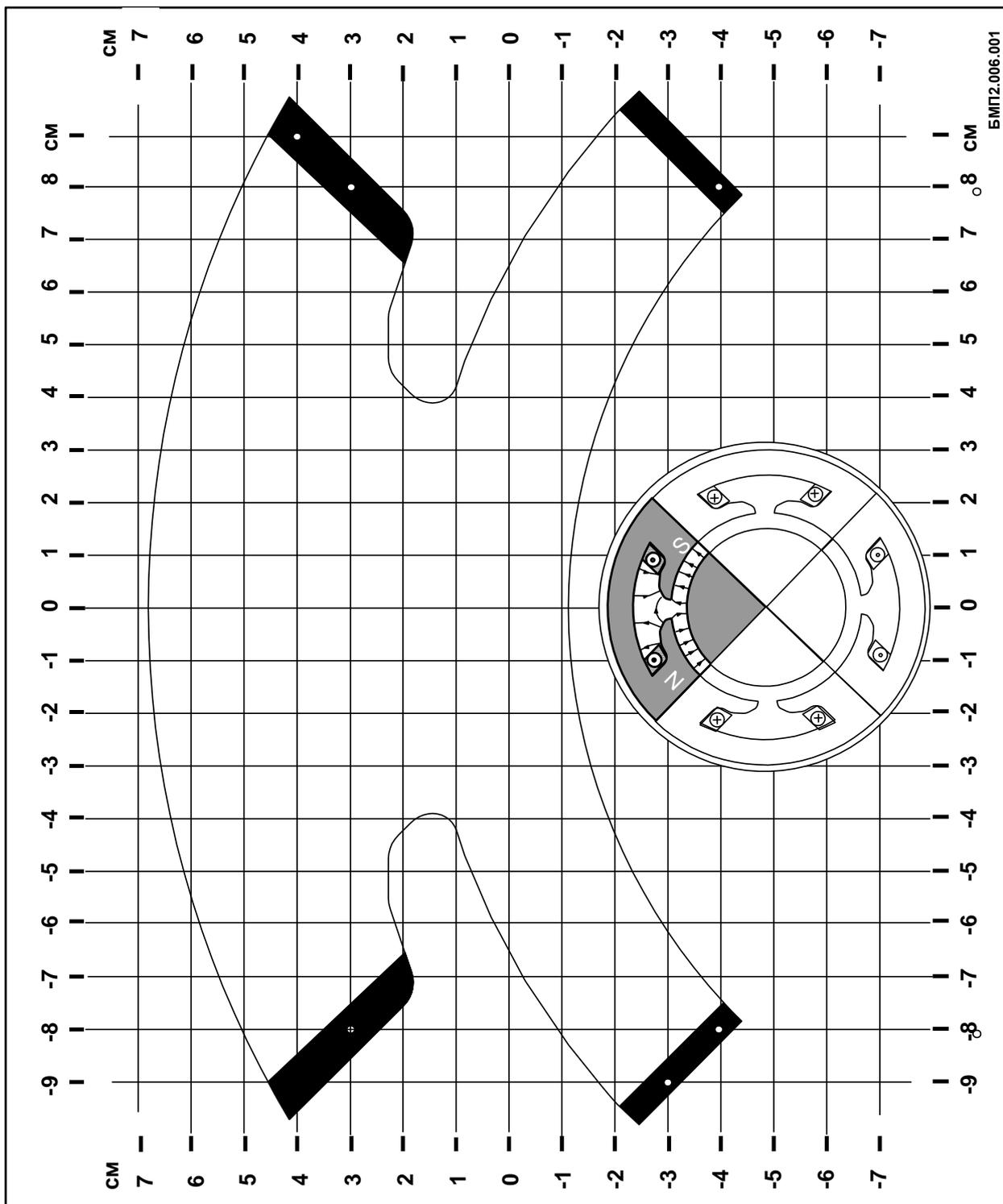




БМП2.004.001







БМП2.006.001

Приложение 2:

Исследование магнитного поля на оси цилиндрической катушки

Экспериментальные данные при $I = 0,2 \text{ A}$, $w = 2000$:

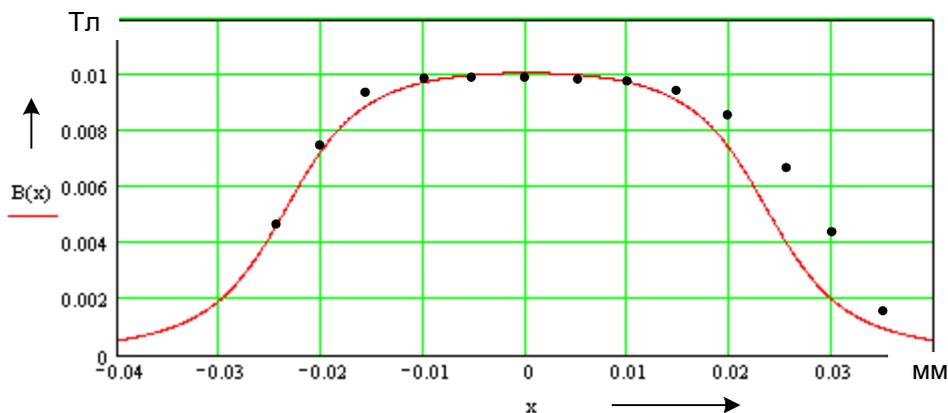
X, мм	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
U, В	0,45	0,74	0,92	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,95	0,86	0,66	0,35	0,17
B, мТл	4,5	7,4	9,2	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7	9,5	8,6	6,6	3,5	1,7

Расчёт магнитной индукции на оси катушки с помощью программы MathCAD:

Точками на графике нанесены экспериментальные данные.

$$w := 2000 \quad i := 0.2 \quad R := 0.00825 \quad l := 0.047 \quad \mu_0 := 12.56 \cdot 10^{-7}$$

$$B(x) := \frac{(i \cdot w \cdot \mu_0)}{2 \cdot l} \cdot \left[\frac{x + \frac{1}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(x + \frac{1}{2}\right)^2}} - \frac{x - \frac{1}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(x - \frac{1}{2}\right)^2}} \right]$$



Исследование магнитного поля на оси кольцевых катушек

Условия эксперимента:

Соединение катушек - последовательное согласное.

Число витков - $w_1=w_2=250$.

Ток в катушках - $I=0,2$ А.

Расстояние между центрами катушек равно радиусу катушек - $x_0=8,25$ мм.

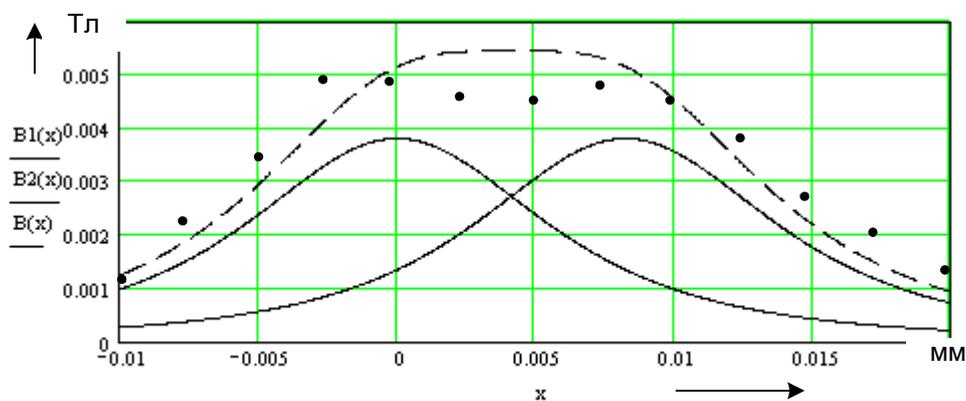
Экспериментальные данные:

X, мм	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
U, В	0,11	0,22	0,33	0,49	0,48	0,44	0,43	0,48	0,46	0,38	0,27	0,20	0,13
B, мТл	1,1	2,2	3,3	4,9	4,8	4,4	4,3	4,8	4,6	3,8	2,7	2,0	1,3

Расчёт магнитной индукции на оси катушки с помощью программы MathCAD:

$$w := 250 \quad i := 0.2 \quad R := 0.00825 \quad x_0 := 0.00825 \quad \mu_0 := 12.56 \cdot 10^{-7}$$

$$B_1(x) := \frac{(\mu_0 \cdot w \cdot i \cdot R^2)}{2 \cdot (\sqrt{R^2 + x^2})^3} \quad B_2(x) := B_1(x - x_0) \quad B(x) := B_1(x) + B_2(x)$$



На графике построены сплошными линиями графики магнитной индукции от каждой катушки в отдельности и пунктирной линией – суммарный график. Точками нанесены экспериментальные данные.

Приложение 4:

Таблица зависимости коэффициента связи 2х катушек от расстояния между ними.

<i>b/a</i>	<i>k</i>	<i>b/a</i>	<i>k</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>
0,0	0,5036	0,5	0,3032	1,0	0,19263	0,5	0,08807
0,1	4525	0,6	2758	0,9	17525	0,4	06263
0,2	4077	0,7	2514	0,8	15616	0,3	03770
0,3	3685	0,8	2296	0,7	13526	0,2	01630
0,4	3340	0,9	2101	0,6	11249	0,1	00299
0,5	0,3032	1,0	0,1926	0,5	0,08807	0,0	0,000

Список литературы

1. Нейман Л.Р., Демирчан К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1966. – 268с.
2. Гладкова Л.Ф., Гришкевич А.Е., Морозов С.И. и др. Электричество и магнетизм, Учебное пособие к выполнению лабораторных работ по курсу физики. - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 111с.
3. Петров Ю.В., Соболевский А.С., Матюшина Л.Н. Электромагнетизм, Учебное пособие для выполнения лабораторных работ по курсу «Общая физика». – Челябинск. Изд. ЮУрГУ, 2000 – 73с.

Для заметок

Для заметок

Для заметок

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
Часть 3

Методические указания
к выполнению лабораторных работ по курсу
для студентов специальности
140211.65 Электроснабжение

Автор-составитель: ст. преподаватель Калина Р.А.
Ассистент Палий В.А.

Усл. печ. л. 2,6. Тираж ____ экз.