

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Проректор-директор ЭНИН

_____ Ю.С. Боровиков
« _ » _____ 2012 г.

**Г.В. Носов, В.А. Колчанова, В.Д. Эськов,
Ф.Ю. Канев, Е.О. Кулешова**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники. Часть 3» для студентов 2 курса ЭНИН, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и для студентов 4 курса ИДО, обучающихся по специальностям 140211 «Электроснабжение», 140205 «Электроэнергетические системы и сети», 140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 621.3.01(076.5)
ББК 31.2Я73
Н845

Носов Г.В.

Н845 Теоретические основы электротехники. Часть 3: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники. Часть 3» для студентов 2 курса ЭНИН, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и для студентов 4 курса ИДО, обучающихся по специальностям 140211 «Электроснабжение», 140205 «Электро-энергетические системы и сети», 140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»/ Г.В. Носов, В.А. Колчанова, В.Д. Эськов, Ф.Ю. Канев, Е.О. Кулешова – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 72 с.

УДК 621.3.01(076.5)
ББК 31.2Я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
электрических сетей и электротехники ЭНИН
« 12 » ноября 2012 г.

Зав. кафедрой ЭСиЭ,
кандидат технических наук _____ *В.И. Полищук*

Председатель учебно-методической
комиссии _____ *В.И. Готман*

Рецензент

Профессор, доктор технических наук
Ю.П. Усов

© Носов Г.В., Колчанова В.А., Эськов В.Д., Канев Ф.Ю., Кулешова Е.О. 2012
© Томский политехнический университет, 2012
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2012

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
Общие правила проведения лабораторных работ	4
Работа 20	
Моделирование плоскопараллельного электростатического поля в проводящих листах	9
Работа 21	
Моделирование плоскопараллельного магнитного поля	15
Работа 22	
Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек.....	21
Работа 23	
Измерение разности магнитных потенциалов.....	25
Работа 24	
Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с использованием датчика Холла.....	30
Работа 25	
Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле	36
Работа 26	
Снятие петли гистерезиса ферромагнетика	40
Работа 27	
Исследование характеристик нелинейного конденсатора с сегнетодиэлектриком.....	46
Работа 28	
Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости в массивных проводниках	52
Список литературы	59
Приложения	60

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для студентов Электротехнического института (ЭЛТИ) и Института дистанционного образования (ИДО) Томского политехнического университета (ТПУ), которые изучают курс «Теоретические основы электротехники. Часть 3» (ТОЭ) и выполняют лабораторные работы по этой дисциплине в разделе «Теория электромагнитного поля».

Типовой комплект лабораторного оборудования «Теория электромагнитного поля» предназначен для проведения лабораторного практикума по одноимённому разделу курса теоретических основ электротехники. Он выполнен в виде дополнительного набора устройств к основному комплекту «Теоретические основы электротехники» и включает в себя следующие компоненты:

- набор планшетов для моделирования электростатических и магнитных полей постоянным током в проводящем листе (5 планшетов с различной конфигурацией электродов);
- набор устройств для моделирования явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в массивных проводниках (4 устройства);
- пояс Роговского для измерения магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов;
- дополнительный набор миниблоков.

ОБЩИЕ ПРАВИЛА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. В лаборатории необходимо соблюдать тишину, чистоту и порядок.
2. Для выполнения работ студенты объединяются в постоянные бригады по 2-3 человека.
3. К предстоящей лабораторной работе студенты готовятся заранее, ознакомившись с описанием работы и рекомендованной литературой. Результаты подготовки записываются в тетрадь протоколов, наличие которой обязательно для каждого студента.
4. В тетрадь протоколов при подготовке необходимо внести: цель работы, основные соотношения, схемы, заготовки таблиц, ответы на вопросы, приведенные в разделах подготовки.
5. По результатам выполненной работы каждым студентом аккуратно оформляется отчёт. В отчёте приводятся: цель работы, электрическая схема, основные соотношения, таблицы с результатами опытов и расчётов, примеры расчётов, графики зависимостей, сопровождаемые пояснениями, анализ полученных результатов и выводы.

6. Преподаватель принимает отчёты по предыдущей работе и проверяет готовность студента к предстоящей работе. **Неподготовленные** студенты, у которых отсутствуют отчёты или подготовка к работе в тетради протоколов, к работе не допускаются.

7. Получив допуск к работе, студенты собирают цепь на закреплённом за ними рабочем месте. Собранная цепь предъявляется на проверку преподавателю.

8. После проверки цепи преподавателем студенты приступают к экспериментам. Результаты наблюдений и вычислений вносятся в таблицы тетради протоколов.

9. По окончании работы протокол предъявляется преподавателю. Только **после подписи** протокола преподавателем, студенты разбирают цепь.

10. На основании протоколов студенты производят обработку результатов наблюдений и оформляют отчёты.

Меры безопасности

Сборка электрических цепей производится проводами с исправной изоляцией при отключённом напряжении.

Включение собранных цепей в работу производится только с разрешения преподавателя.

Касаться руками клемм, открытых токоведущих частей приборов и аппаратов при включённом напряжении запрещается.

Все переключения в электрических цепях и их разборку необходимо производить только при снятом напряжении.

После выполнения работы электрическая цепь должна быть разобрана, рабочее место убрано, дополнительные приборы сданы преподавателю.

Описание лабораторного стенда

Стенд учебного лабораторного комплекса состоит из трех блоков: генераторов напряжений, наборной панели и мультиметров. К стенду прилагаются соединительные провода и набор миниблоков нагрузочных элементов, полупроводниковых приборов и трансформаторов.

Блок генераторов напряжений включает в себя три разновидности источников питания.

Источники синусоидального напряжения промышленной частоты (50 Гц): однофазный генератор (напряжение 24 В, ток до 0,2 А) и трех-

фазный генератор (фазное напряжение 7 В, ток до 0,2 А) с выведенной нейтральной точкой (N).

Генератор напряжений специальной формы. Форма напряжения устанавливается с помощью переключателя “Форма”. Возможно получение синусоидального напряжения, частота которого регулируется в пределах от 200 Гц до 20 кГц или прямоугольных униполярных и биполярных импульсов. Величина действующего значения напряжения изменяется регулятором “Амплитуда”. При этом следует иметь в виду, что при изменении частоты в широких пределах меняется и величина напряжения. Так что для обеспечения одинакового напряжения при разных частотах нужно использовать и регулятор “Амплитуда”.

Три генератора постоянного напряжения 15 В (ток до 0,2 А), из которых один с регулируемым напряжением от 0 до 15 В. С помощью тумблера (переключателя) можно либо подать напряжение от источника на выходные зажимы (верхнее положение), либо отключить его с одновременным замыканием накоротко выходных зажимов (нижнее положение тумблера).

В скобках для каждого из перечисленных источников указан допустимый ток. Если параметры нагрузки таковы, что ток превышает допустимый, на стенде загорается красная лампочка. Работать с горячей лампочкой запрещено, чтобы не вывести из строя источник. Источники включаются в работу и отключаются выключателем “Сеть”.

Наборная панель состоит из штепсельных гнезд и служит для сборки электрических цепей. Гнезда соединены между собой попарно, по четыре и по двенадцать. В них включаются двухполюсные блоки. Поэтому при последовательном соединении элементов достаточно использовать сдвоенные гнезда. А для формирования узлов разветвленных цепей используются объединения по четыре и по двенадцать гнезд.

Блок мультиметров состоит из трех одинаковых многофункциональных измерительных приборов. Они могут быть использованы для измерения активных сопротивлений (гнездо Ω), постоянного и переменного тока до 2 А (гнездо А) или постоянного и переменного напряжения до 600 В (гнездо V - общее с Ω). Гнездо 10 А в лабораторных работах не используется.

В одно из этих гнезд включается штекер одного из проводов, соединяющих прибор наборной панелью. Штекер другого вставляется в гнездо СОМ (*Common* - в переводе “общее”), которое используется при измерении любой величины.

Переключатель рода работ позволяет измерить ту или иную величину с необходимой точностью. Для этого риску переключателя следует

установить напротив необходимого предела измерения в один из пяти секторов (Ω , $V=$, $V\sim$, $A=$, $A\sim$).

Пример 1. Измерение постоянного напряжения до 15 В (например, напряжения источника). Установить риску переключателя рода работ в сектор $V=$ напротив предела 20 В. Соединить гнездо *Com* мультиметра с выводом “–” на лицевой панели генератора, напряжение которого предстоит измерить, а гнездо $V\Omega$ с выводом “+”. Перевести общий выключатель блока мультиметров “Сеть” в положение “вкл”, затем нажать индивидуальный выключатель задействованного мультиметра (красная кнопка). Включить тумблер на лицевой панели генератора. На шкале прибора высвечивается величина измеряемого напряжения. Если бы перед показанием прибора появлялся знак “–”, то это означало бы, что полярность прибора не соответствует полярности напряжения.

Пример 2. Измерение переменного тока до 200 мА. Риск переключателя установить на предел 200 мА в секторе $A\sim$. Подсоединить мультиметр (гнезда *Com* и *A*) к гнездам наборной панели. Включить прибор с помощью клавиши “Сеть” и красной кнопки. Снять со шкалы показание.

При необходимости можно подключать и другие измерительные приборы (фазометр, ваттметр, осциллограф др.) к наборной панели по схеме, приведенной в описании лабораторной работы.

Соединительные провода предназначены для сборки электрической цепи. Используются три вида проводов.

Три пары (красный и черный со специальными наконечниками) проводов служат для надежного подключения мультиметров.

Провода разной длины синего и белого цветов со штекерами на концах используются для соединения источников с наборной панелью, а также для соединения гнезд этой панели между собой при сборке цепи.

Переходники, по виду напоминающие штепсельные вилки с дополнительным контактным гнездом, предназначены для соединения расположенных рядом гнезд панели (иногда с образованием узла с тремя ветвями). Их также целесообразно использовать в тех работах, где на определенных этапах требуется исключить элемент (замкнуть его накоротко). Например, если в начале работы требуется исключить из цепи емкость, то на ее место и включается эта вилка, а когда понадобится емкость, то она и подсоединяется вместо удаленной из панели вилки.

Следует стремиться собирать электрическую цепь «красиво», расчетливо располагая миниблоки на наборной панели, обходясь минимально необходимым количеством проводов.

Набор миниблоков (двухполюсников и четырехполюсников) для сборки пассивной части цепи. В их число входят линейные резисторы, потенциометры, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, ключ, лампа, нелинейный резистор, полупроводниковые приборы.

На миниблоках указывается условное обозначение, номинал нагрузочного элемента и допустимые величины тока, напряжения или мощности, превышать которые при выполнении лабораторной работы недопустимо. Например, все линейные резисторы имеют допустимую мощность 2 Вт. Ниже приводятся краткие сведения о миниблоках (часть в таблицах).

Таблица 1. Линейные резисторы

Номинал (Ом)	10	22	33	47	100	150	220	330	470	680
Количество	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1

Номинал (кОм)	1	2,2	4,7	10	22	33	47	100	1000
Количество	3	1	2	2	1	1	1	2	1

Регулируемые сопротивления (потенциометры) имеют максимальные значения сопротивлений 1 кОм и 10 кОм, а мощность по 1 Вт каждый. Нелинейный резистор рассчитан на напряжение до 18 В и ток до 1 мА.

Таблица 2. Конденсаторы

Номинал (мкФ)	0,01	0,1	0,22	0,47	1	10	100	470	
Количество	1	1	1	1	1	1	1	1	
Напряжение (В)	100	100	63	63	63	63	63	35	
Примечание							Электролитические		

Ключ позволяет осуществить разрыв ветви, в которую он включен последовательно, или замкнуть накоротко узлы, к которым он присоединен параллельно.

Таблица 3. Катушки индуктивности

Номинал (мГн)	10	40	100
Количество	1	1	2
Допустимый ток (мА)	90	65	50

Четыре двухобмоточных трансформатора с одинаковыми двухстержневыми магнитопроводами имеют взаимозаменяемые обмотки с числами витков 100, 300, 900.

Полупроводниковые приборы: терморезисторы (6,8 кОм и 50 Ом), фоторезистор и работающая с ним в паре лампа на 10 В, шесть диодов (100 В, 1 А), стабилитрон (10 В, 5 мА), светодиод (20 мА), варикап, симистор, биполярные транзисторы с *p-n-p* и *n-p-n* переходом, однопереходный и полевой транзисторы, тиристор и микросхема, работающая как усилитель постоянного тока.

РАБОТА 20

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОВОДЯЩИХ ЛИСТАХ

Цель работы. Получить опытным путём картину равного электрического потенциала, построить на ней линии напряженности плоскопараллельного электростатического поля и определить емкость исследуемой системы разноименно заряженных тел.

Пояснения к работе

Любое электростатическое поле характеризуется основными величинами: напряженность поля \vec{E} и потенциал φ . Напряженность электростатического поля – величина векторная, определяемая в каждой точке величиной и направлением. Потенциал является величиной скалярной, значение потенциала определяется в каждой точке поля некоторым числом.

Электростатическое поле определено, если известен закон изменения напряженности поля или потенциала во всех его точках.

Электростатическое поле можно охарактеризовать совокупностью силовых и эквипотенциальных линий. Силовая линия – это мысленно проведенная в поле линия, начинающаяся на положительно заряженном теле и оканчивающаяся на отрицательно заряженном теле. Касательная к ней в любой точке совпадает по направлению с вектором напряженности. Эквипотенциальная поверхность – совокупность точек поля, имеющих одинаковый потенциал. Проекция эквипотенциальной поверхности на секущую плоскость дает эквипотенциальную линию.

Эквипотенциальные и силовые линии пересекаются под прямым углом.

Напряженность и потенциал электростатического поля связаны выражением:

$$\vec{E} = -grad\varphi, \quad (20.1)$$

т.е. напряженность в какой-либо точке поля равна скорости изменения потенциала в этой точке, взятой с обратным знаком.

В электростатике часто встречаются задачи, когда по известным значениям потенциалов (или полных зарядов) и геометрии тел, создающих поле, требуется найти закон изменения напряженности поля или потенциала во всех точках поля. В простых случаях задачи на аналитический расчет решают путем использования теоремы Гаусса в интегральной форме. В более сложных случаях используют уравнение Лапласа, либо интегрируя его непосредственно без вспомогательных приемов, либо используя метод зеркальных изображений (в случае неоднородной среды).

Уравнения Пуассона и Лапласа являются основными дифференциальными уравнениями электростатики. Они вытекают из теоремы Гаусса в дифференциальной форме.

$$\nabla^2\varphi = -\rho_{своб} / \epsilon_a. \quad (20.2)$$

Уравнение (20.2) называют уравнением Пуассона: $\nabla^2 = \text{div grad}$ – оператор Лапласа или лапласиан; φ – потенциал в точке; $\rho_{своб}$ – объемная плотность свободного заряда; ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества.

Свободными называются заряды, которые под воздействием сил поля могут свободно перемещаться в веществе, их перемещение не ограничивается внутримолекулярными силами.

Частный вид уравнения Пуассона, когда $\rho_{своб} = 0$, называют уравнением Лапласа и записывают так:

$$\nabla^2\varphi = 0. \quad (20.3)$$

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 (20.3).

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.

Собранная установка для моделирования с одним из планшетов показана на рис. 20.1. Остальные четыре планшета - на рис. 20.2.

Электрическое поле в проводящих листах создаётся электрическим током, растекающимся по листу между точками подвода и отвода тока.

Так как толщина листа незначительна и одинакова для всего листа, то уже на малом расстоянии от места подвода и отвода тока можно считать, что линии тока по всей толщине листа параллельны поверхности листа. Следовательно, поле можно считать плоскопараллельным.

На листах экспериментальным путём, а в некоторых случаях и по результатам расчёта, можно построить линии равного потенциала и линии тока. Последние совпадают с линиями напряжённости электрического поля, поскольку векторы плотности тока ($\vec{\delta}$) и напряжённости электрического поля (\vec{E}) пропорциональны: $\vec{\delta} = \gamma \vec{E}$, где γ – удельная проводимость среды (1/Ом·м).

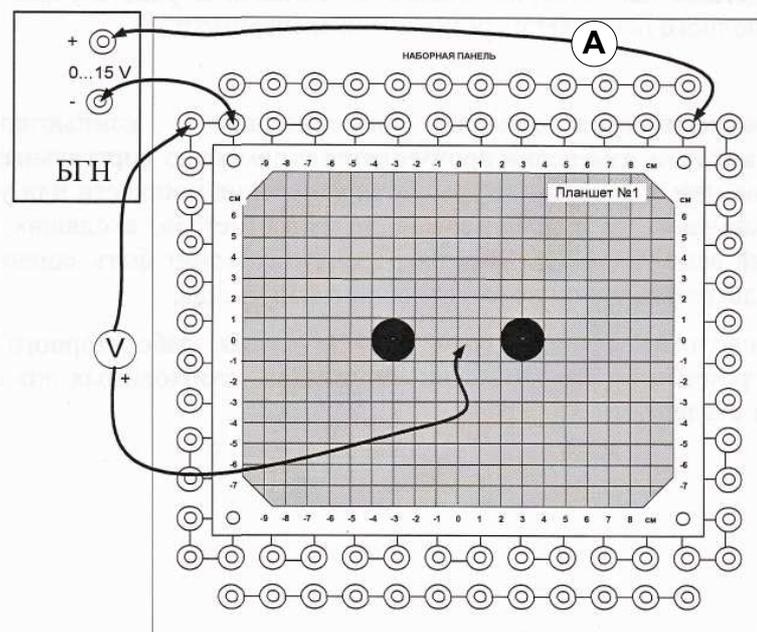


Рис. 20.1

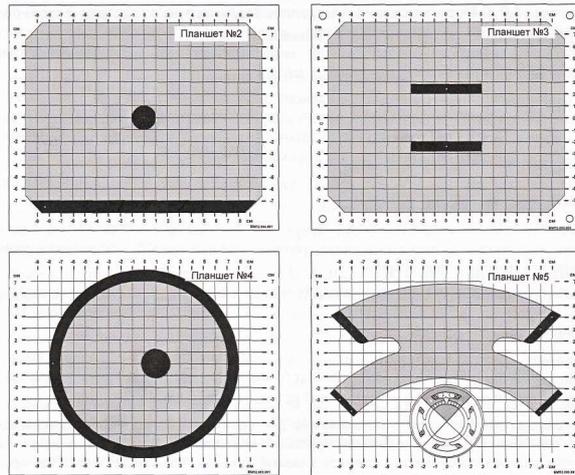


Рис. 20.2

Совокупность линий равного потенциала (эквипотенциалей) и линий напряжённости поля (силовых линий) образует картину поля, ячейка картины поля показана на рис. 20.3.

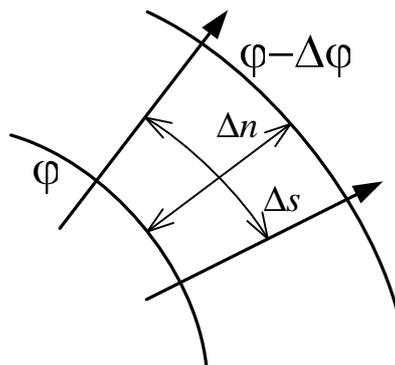


Рис. 20.3

При построении картины плоскопараллельного поля придерживаются следующих правил.

1. Разность потенциалов соседних линий равного потенциала должна быть одинаковой, $\Delta\varphi = const$.
2. Линии напряжённости поля проводятся перпендикулярно эквипотенциалам.
3. Отношение средней длины к средней ширине ячейки поля сохраняют одинаковым, обычно принимая равными: $\Delta s = \Delta n$.

Если картина поля построена с соблюдением этих правил, то в трубках потока вектора напряженности поля (в трубках тока), ограниченных соседними силовыми линиями, будет одинаковый поток вектора напряжённости (ток).

В этом случае по картине поля можно определить среднюю напряжённость поля в пределах ячейки поля

$$E_{cp} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta n}, \quad (20.4)$$

среднюю плотность тока

$$\delta_{cp} = \gamma E_{cp} \quad (20.5)$$

и сопротивление листа r между точками привода и отвода тока.

Поскольку длина ячейки равна ширине, то сопротивление ячейки не зависит от её размеров

$$r_n = \frac{\ell}{\gamma S} = \frac{\Delta n}{\gamma \Delta s d} = \frac{1}{\gamma d}, \quad (20.6)$$

где d – толщина листа.

Сопротивление листа между точками подвода и отвода тока можно выразить через сопротивление ячейки

$$r = r_n \frac{N}{M} = \frac{U}{I}, \quad (20.7)$$

т.е. подсчитав число N последовательных ячеек между крайними линиями равного потенциала в одной трубке тока и число M параллельных трубок в листе или определить по закону Ома, измерив ток I и напряжение U между точками подвода и отвода тока (рис. 20.2).

На основании аналогии между электрическим полем постоянного тока и электростатическим полем находим емкость исследуемой системы разноименно заряженных тел, расположенных в воздухе ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м)

$$C = \frac{\epsilon_0}{\gamma} \cdot \frac{1}{r} = \epsilon_0 \frac{M}{N} d. \quad (20.8)$$

Из формул (20.6–20.8) при заданной толщине листа $d=2 \cdot 10^{-5}$ (м) нетрудно определить удельную проводимость γ материала листов и емкость.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Написать уравнение линии равного потенциала.
2. Написать уравнение линии напряжённости электрического поля.
3. На основании формул (20.6, 20.7) при заданной толщине листа d записать соотношение для расчета удельной проводимости γ материала листов.

Схема электрической цепи

Схема электрической цепи приведена на рис. 20.1. Для питания цепи используется источник постоянного регулируемого напряжения. Для измерения потенциалов и подводимого тока к листу используются вольтметр и амперметр с пределами 20 В и 200 мА соответственно. В табл. 20.1 указаны согласно варианту номер листа (планшета) и устанавливаемое напряжение на зажимах источника.

Таблица 20.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ листа	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
U В	15	12	9	6	9	12	15	12	9	6

Порядок выполнения работы

1. Установить на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1,2, 3 или 4) в соответствии с номером варианта из таблицы 20.1 и собрать схему по рис. 20.1.

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

3. Включить выключатель сети блока генераторов напряжений (БГН) и убедиться, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой - потенциал, равный напряжению источника питания.

4. Установить при помощи вольтметра согласно варианту напряжение источника питания U и измерить величину тока I . Рассчитать шаг изменения потенциала $\Delta\phi=U/6$ (например: 1; 1,5; 2; 2,5; 3 В), так чтобы на картине поля получилось 5 эквипотенциальных линий. Величины U , I , $\Delta\phi$ записать в табл. 20.2.

5. Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найти точки с потенциалами $\Delta\phi$, $2\cdot\Delta\phi$, $3\cdot\Delta\phi$, $4\cdot\Delta\phi$, $5\cdot\Delta\phi$. Найденные точки отметить на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

6. Перемещая зонд из точки с потенциалом $\Delta\phi$ вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), найти точки равного потенциала и отметить их на рисунке. Точки равного потенциала соединить плавной кривой. Аналогично построить 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.

7. Пользуясь известными правилами графического построения картины поля, построить силовые линии напряжённости поля. По картине поля определить число ячеек в трубке N и число трубок M , записать их значения в табл. 20.2.

8. Определить сопротивление r между точками подвода и отвода тока по закону Ома и при толщине листа $d = 0,02 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ по формуле п.3 подготовки рассчитать удельную проводимость материала листа γ . По (20.8) найти емкость C . Величины записать в табл. 20.2.

9. Определить среднюю напряжённость электрического поля по формуле (20.4) в одной из ячеек картины поля и среднюю плотность тока (20.5). Покажите направление вектора напряженности в этой точке на рисунке. Найденные значения записать в табл. 20.2.

Таблица 20.2

U	I	$\Delta\phi$	r	N	M	γ	C	E_{CP}	δ_{CP}
В	мА	В	Ом	–	–	См/м	пФ	В/м	А/м ²

10. Проанализировать полученные результаты и сформулировать общие выводы по работе.

РАБОТА 21

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы. Построить картину исследуемого магнитного поля, определить его магнитную индукцию в отдельных точках для заданного значения намагничивающего тока.

Пояснения к работе

Качественной и количественной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Линии вектора магнитной индукции (силовыми линиями) проводятся так, чтобы вектор магнитной индукции совпадал по направлению с касательной в любой точке силовой линии, а плотность этих линий (число линий, пронизывающих еди-

ничную площадку, нормальную к направлению поля) была пропорциональна величине магнитной индукции в данном месте поля.

При расчетах магнитного поля, применяется также вектор напряженности магнитного поля \vec{H} , определяемый из следующего выражения:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_a},$$

где μ – относительная магнитная проницаемость вещества (безразмерная величина); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная. Произведение $\mu\mu_0 = \mu_a$ называется абсолютной магнитной проницаемостью вещества. Магнитная проницаемость воздуха $\mu_a = \mu_0$.

Основным законом, выражающим связь между величинами, характеризующими постоянное магнитное поле, и электрическими токами, создающими это поле, является закон полного тока:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I.$$

Линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, равен сумме токов, охватываемых этим контуром. Положительное направление токов согласуется с направлением обхода контура интегрирования в соответствии с правилом правого винта.

Каждая точка магнитного поля в областях незанятых током имеет скалярный магнитный потенциал φ_M , удовлетворяющий уравнениям:

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi_M;$$

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

Эти линии скалярного магнитного потенциала перпендикулярны линиям индукции (напряженности) и образуют картину магнитного поля в областях не занятых током ($\vec{\delta} = 0$), например, как на рис. 21.1.

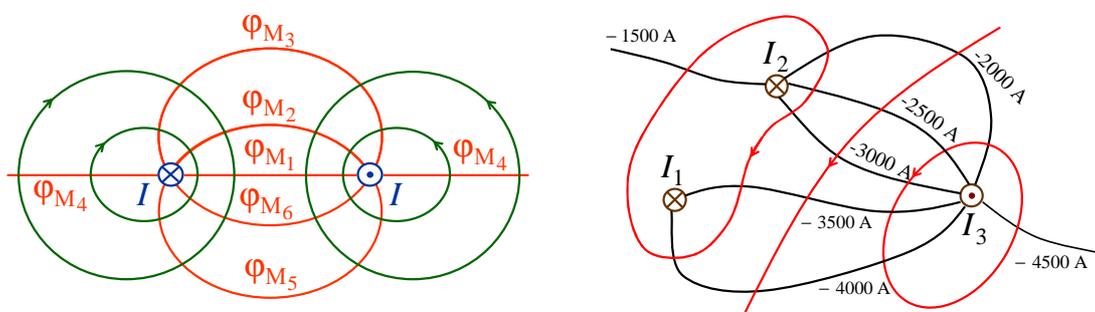


Рис. 21.1

При этом магнитное напряжение между точками 1 и 2

$$U_{M12} = \Phi_{M1} - \Phi_{M2} = \int_1^2 \overline{H} dl, \text{ A}$$

не зависит от пути интегрирования напряженности магнитного поля (если не охватываем ток).

Скалярный магнитный потенциал Φ_M , применяется для определения \overline{H} , U_{M12} и построения линий равного скалярного магнитного потенциала, для которых $\Phi_M = \text{const}$.

По картине магнитного поля можно определить приближенно напряженность магнитного поля в некоторой точке N (рис. 21.2):

$$H \approx |\Delta\Phi_M| / \Delta n = |\Phi_{M2} - \Phi_{M1}| / \Delta n.$$

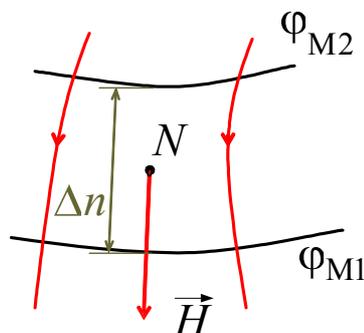


Рис. 21.2

Здесь следует подчеркнуть, что между электростатическим и магнитостатическим полями имеется принципиальное различие. Электрическое поле в проводящей среде соответствует распределению потенциалов в электрической цепи и связано с пространственным распределением свободных зарядов и с распределением токов внутри проводников. Электростатическое поле в диэлектрике имеет своим началом заряды одного знака и концом – заряды другого знака. Магнитное поле связано с наличием токов и соответствует их пространственному распределению. При этом индукционные линии охватывают контуры токов, имея вид замкнутых кривых – без фиксированных начал и концов. Магнитное поле непрерывно; никаких магнитных зарядов, подобных электрическим зарядам, не существует.

Магнитное поле, возникающее в пространстве, окружающем проводники электрической цепи, называют внешним, а внутри проводников – внутренним.

Однако между картинами электростатического и магнитных полей постоянного тока в областях, не занятых током может быть соответствие двух типов.

Первый тип – когда одинаково распределение линейных зарядов в электростатическом поле и линейных токов в магнитном поле. В этом случае картина магнитного поля (сетка поля) подобна картине соответствующего электростатического поля. Отличие состоит лишь в том, что силовым линиям электростатического поля отвечают эквипотенциальные линии магнитного поля, а эквипотенциалам электростатического поля – силовые линии магнитного. В качестве примера на рис. 21.3, а изображена картина электрического поля, образованного уединённым линейным зарядом $+τ$, а на рисунке 21.3, б – картина магнитного поля уединённого проводника с током, направленного «к нам» (для области вне проводника).

Второй тип – когда одинакова форма граничных эквипотенциальных поверхностей в электростатическом и магнитных полях постоянного тока. В этом случае картина поля оказывается совершенно одинаковой. Соответствие второго типа показано на рис. 21.4. На нём изображена картина силовых линий магнитного поля в воздушном промежутке между полюсом и якорем машины постоянного тока. Если допустить, что полюс и якорь машины используются в качестве электродов некоторого конденсатора, то картина электрического поля в воздушном промежутке между электродами соответствовала бы картине магнитного поля – в обоих случаях силовые линии выходили бы из полюса и входили бы в якорь нормально к поверхности полюса и якоря.

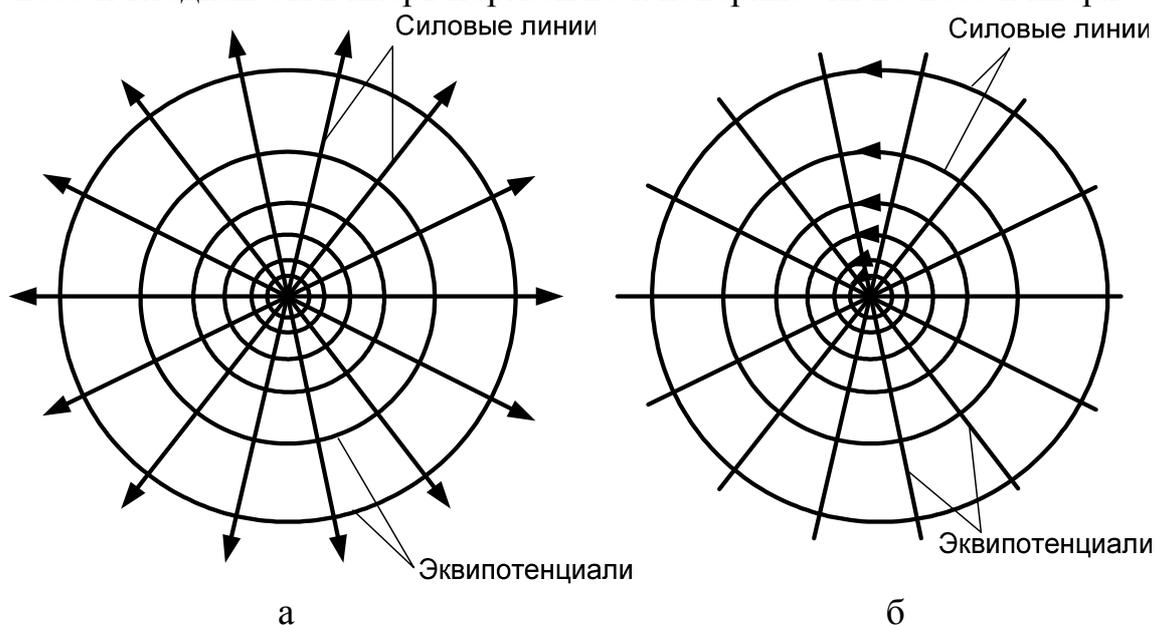


Рис. 21.3

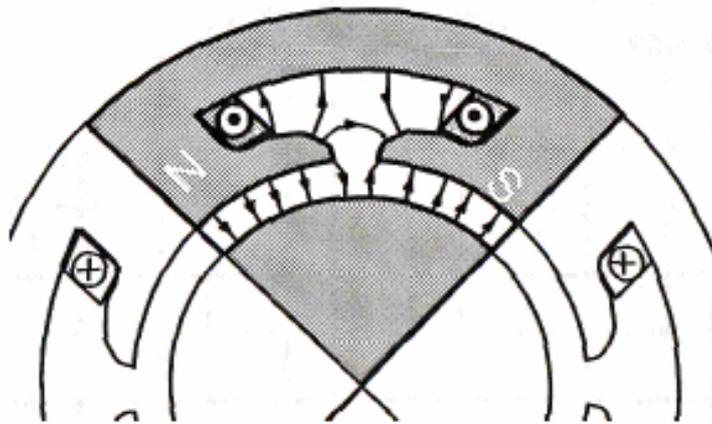


Рис. 21.4

Так как магнитная проницаемость стали много больше магнитной проницаемости воздуха, то магнитные силовые линии практически перпендикулярны поверхности якоря и полюса. Следовательно, их поверхности являются эквипотенциальными. Построение семейства силовых и эквипотенциальных линий производят «на глаз», руководствуясь следующим: силовые линии должны быть перпендикулярны поверхностям полюса и якоря и так расположены по отношению друг к другу, чтобы после проведения эквипотенциальных поверхностей образовывались криволинейные прямоугольники, для которых отношение средней длины к средней ширине было приблизительно одинаково для всех прямоугольников. При этом потоки во всех силовых трубках одинаковы.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Что представляет собой картина магнитного поля в областях незанятых током?
2. Как графически строится картина магнитного поля?
3. Как можно определить напряженность магнитного поля в некоторой точке?
4. Каким линиям магнитного поля соответствуют эквипотенциальные линии электрического поля постоянного тока?

Схема электрической цепи

Схема электрической цепи приведена на рис. 20.1. Для питания цепи используется источник постоянного регулируемого напряжения. Для измерения потенциалов и подводимого тока к листу используются вольтметр и амперметр с пределами 20 В и 200 мА соответственно. В табл. 21.1 указаны согласно варианту номер листа (планшета) и устанавливаемое напряжение на зажимах источника.

Таблица 21.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ Планшета	4	3	1	5	3	4	5	1	3	5
U В	15	12	9	6	9	12	15	12	9	6

Порядок выполнения работы

1. Установить на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 3, 4 или 5) в соответствии с номером варианта из таблицы 21.1 и подключить питание от генератора постоянных напряжений и мультиметры в режимах вольтметра и амперметра, как показано на рис. 20.1.

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

3. Включить выключатель «Сеть» блока генераторов напряжений (БГН) и убедиться, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой - потенциал, равный напряжению источника питания.

4. Установить требуемое согласно варианту напряжение питания $U = 6...15$ В и определить шаг изменения потенциала $\Delta\phi = U/6$, чтобы на картине поля получилось 5 эквипотенциальных линий.

5. Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найти точки с потенциалами $\Delta\phi$, $2\cdot\Delta\phi$, $3\cdot\Delta\phi$ и т.д. Найденные точки отметить на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

6. Перемещая зонд из точки с потенциалом $\Delta\phi$ вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), найти точки равного потенциала и отметить их на рисунке. Точки равного потенциала соединить плавной кривой. Аналогично построить 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.

7. Считая снятые эквипотенциальные линии электрического поля магнитными силовыми линиями, построить линии равного скалярного магнитного потенциала, пользуясь известными правилами графического построения картины поля. Принять конкретное значение тока в шинах или МДС катушек, равное показанию амперметра I , и указать для каждой эквипотенциальной линии значение скалярного магнитного потенциала, равного долям показания амперметра, причем скалярный магнитный потенциал эквипотенциальных линий отрицателен и отличается у соседних линий на одну и ту же величину (см. рис. 21.1), т.е. от 0 до $-(m-1)I/m$, причем $\Delta\varphi_M = -I/m$, где m – число построенных линий скалярного магнитного потенциала.

8. Вычислить магнитную индукцию в двух - трёх точках поля и показать направление вектора магнитной индукции в этих точках на рисунке ($B = \mu_0 \frac{|\Delta\varphi_M|}{\Delta n}$).

9. Проанализировать полученные результаты и сформулировать выводы по работе.

РАБОТА 22

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ КАТУШЕК

Цель работы. Исследование зависимости взаимной индуктивности соосных катушек кольцевой формы от расстояния между ними.

Пояснения к работе

Всякий проводник с током создает вокруг себя магнитное поле, интенсивность которого оценивается в каждой точке пространства вектором магнитной индукции \vec{B} .

Магнитный поток сквозь некоторую поверхность S определяется по формуле $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$. Если поток пронизывает катушку с числом витков

w , то вводится понятие потокосцепления: $\psi = w\Phi$.

В системе двух катушек часть Φ_{21} магнитного потока Φ_{11} , созданного током i_1 , обтекающим w_1 витков одной из катушек, может сцеп-

ляться с витками (их число w_2) другой катушки. Если свойства среды не зависят от интенсивности магнитного поля, то потокосцепление взаимной индукции $\Psi_{21} = w_2 \Phi_{21}$ будет пропорционально току i_1 . Коэффициент пропорциональности $M = \frac{\Psi_{21}}{i_1}$ называется взаимной индуктивностью.

Его величина зависит от геометрических размеров катушек, расстояния между ними, количества витков и магнитной проницаемости среды.

Формула взаимной индуктивности двух круговых контуров, лежащих в параллельных плоскостях так, что их центры находятся на одной прямой, перпендикулярной этим плоскостям (среда – воздух) следующая:

$$M = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} f(k). \quad (22.1)$$

Здесь

$$f(k) = \left(\frac{2}{k} - k \right) K - 2 \frac{E}{k}, \quad (22.2)$$

$$k^2 = \frac{4R_1 R_2}{x^2 + (R_1 + R_2)^2}, \quad (22.3)$$

где R_1 и R_2 – радиусы контуров;

x – расстояние между их центрами;

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}}, \quad E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta} \cdot d\beta$$

– полные эллиптические интегралы первого и второго рода, которые нетрудно вычислить (например, в системе *Mathcad*).

Формулу (22.1) для расчетной взаимной индуктивности можно распространить и на систему двух катушек, предполагая, что линейные размеры поперечного сечения катушек малы по сравнению с их радиусами и расстоянием x между ними ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м):

$$M_p = \mu_0 w_1 w_2 \sqrt{R_1 R_2} f(k). \quad (22.4)$$

Разумеется, в этом случае значения R_1 , R_2 , x усредняются.

Для определения $f(k)$ можно воспользоваться кривыми, построенными на рис. 22.1.

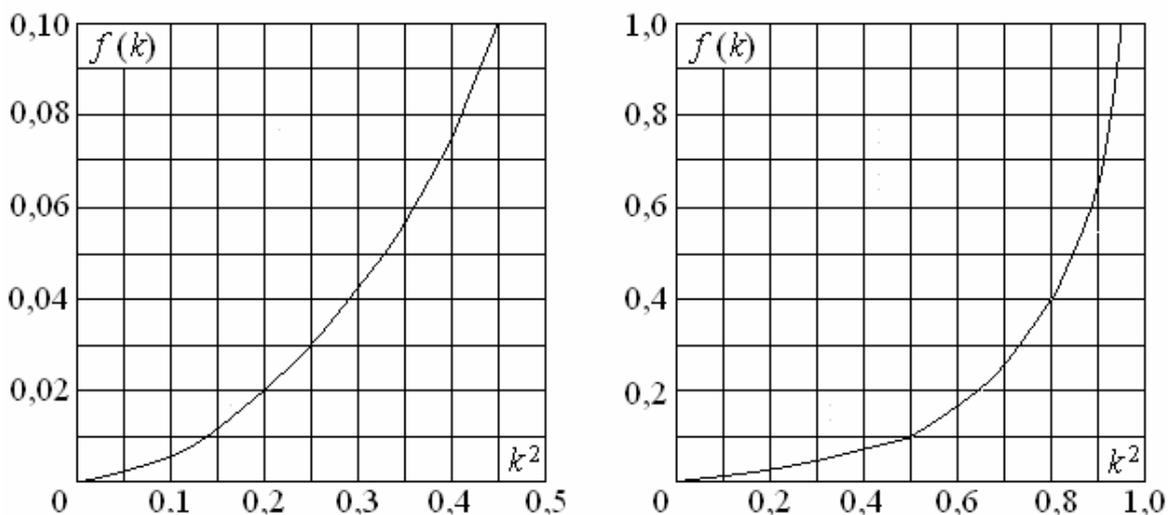


Рис. 22.1

Экспериментально взаимную индуктивность катушек можно определить следующим способом. Следует подать на зажимы одной из катушек синусоидальное напряжение с частотой f , измерить действующее значение тока в ней I_1 и действующее значение напряжения U_2 на зажимах второй катушки. После чего экспериментальную взаимную индуктивность легко найти из соотношения

$$M_{\text{Э}} = \frac{U_2}{\omega I_1}, \quad (22.5)$$

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

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Сформулировать закон электромагнитной индукции.
2. Что такое напряжения само- и взаимоиндукции?
3. Что такое взаимная индуктивность и как ее определить экспериментально?
4. От чего зависит взаимная индуктивность кольцевых соосных катушек?
5. Записать выражение k^2 для катушек с одинаковыми радиусами.

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 22.2. Цепь питается от источника синусоидального напряжения с регулируемой частотой. Значение частоты f и примерное действующее значение тока I_1 в цепи источника, которые следует поддерживать во время работы, приведены в табл. 22.1 (вариант указывает преподаватель).

Таблица 22.1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f	кГц	2	2,2	2,1	2,3	2,4	2,6	2,5	2,7	2,8	3,0
I_1	мА	195	195	190	190	180	180	170	170	160	160

В качестве индуктивно связанных катушек используется мини-блок «Кольцевые катушки», обмотки которых одинаковы: их радиусы $R_1 = R_2 = R = 7 \text{ мм} = 0,007 \text{ м}$, а число витков $w_1 = w_2 = w = 250$.

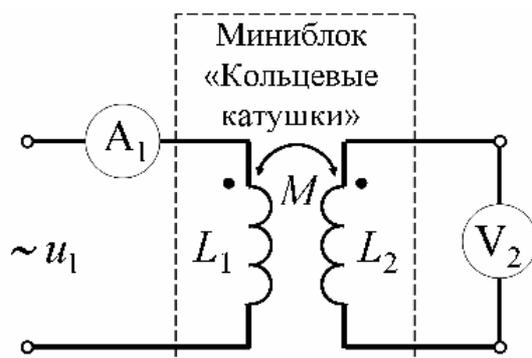


Рис. 22.2

Для измерения действующих значений тока в первой катушке, подключенной к источнику, и напряжения на зажимах второй катушки используются приборы с пределами измерения 200 мА и 2 В. Отсчет расстояния x между катушками следует проводить по нижней кромке подвижной катушки.

Программа работы

1. Установить на наборной панели блок «Кольцевые катушки» и собрать электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 22.2.
2. Установить на генераторе напряжений специальной формы синусоидальное напряжение с частотой f , которая указана в табл. 22.1. Подсчитать угловую частоту ω . С помощью регулятора амплитуды на-

пряжения задать примерное действующее значение тока I_1 . Значения всех этих величин, а также радиусы катушек R_1 и R_2 внести в табл. 22.2.

Таблица 22.2

$f = \dots$ Гц	$\omega = \dots$ рад/с	$I_1 = \dots$ мА	$w_1 = w_2 = 250$	$R_1 = R_2 = 0,007$ м
----------------	------------------------	------------------	-------------------	-----------------------

3. Изменяя расстояние между катушками x от минимально возможного 5 мм до 25 мм с шагом 5 мм, измерить ток I_1 и напряжение U_2 на зажимах второй катушки. По формуле (22.5) подсчитать экспериментальную взаимную индуктивность $M_{\text{Э}}$. Результаты записать в табл. 22.3.

Таблица 22.3

Эксперимент				Расчет		
x , мм	I_1 , мА	U_2 , В	$M_{\text{Э}}$, мГн	k^2	$f(k)$	$M_{\text{р}}$, мГн
5						
10						
15						
20						
25						

4. Для тех же значений x вычислить расчетную взаимную индуктивность $M_{\text{р}}$ по формулам (22.3), (22.4) и графикам рис. 22.1. Результаты расчета также внести в табл. 22.3.

5. По данным табл. 22.3 построить в общих осях графики зависимостей $M_{\text{Э}}(x)$ и $M_{\text{р}}(x)$, полученные в результате эксперимента и расчета.

6. Сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 23

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗНОСТИ МАГНИТНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Цель работы. Научиться измерять магнитодвижущие силы и магнитные напряжения, а также определять число витков катушек с помощью магнитного пояса Роговского.

Пояснения к работе

Магнитным напряжением или разностью скалярных магнитных потенциалов в магнитном поле (рис. 23.1) между точками a и b называется величина

$$u_{\text{м}}^{ab} = \int_a^b \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_a^b H dl \cos \alpha,$$

где \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля в точке, где находится отрезок $d\mathbf{l}$;

α – угол между направлением вектора \mathbf{H} и принятым положительным направлением вектора $d\mathbf{l}$.

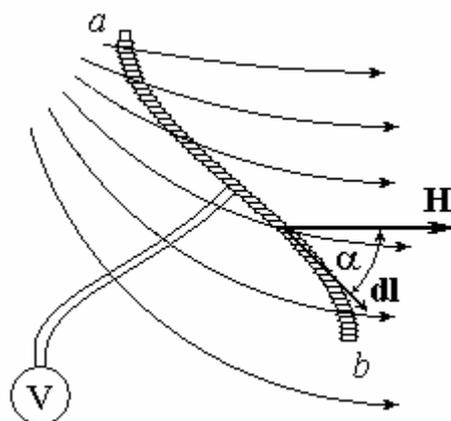


Рис.23.1

В области, где нет электрических токов, величина магнитного напряжения не зависит от пути интегрирования и определяется положением начальной и конечной точек пути интегрирования. Если эти точки совпадают, то магнитное напряжение определяется законом полного тока:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum i.$$

В том случае, когда контур интегрирования охватывает катушку с числом витков w и током i , по аналогии с электродвижущей силой (ЭДС) вводится понятие магнитодвижущей силы (МДС) катушки:

$$F = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = iw.$$

Замкнутый контур l может быть разбит на участки, тогда для него справедливо соотношение для МДС и магнитных напряжений:

$$F = \sum u_M.$$

Магнитные напряжения и МДС могут быть измерены с помощью магнитного пояса Роговского. Он представляет собой гибкую ленту из изолирующего материала, равномерно обмотанную проводом, покрытым изоляцией (рис. 23.1). Поперечное сечение ленты S одинаково по всей длине и достаточно мало, чтобы считать значение и направление вектора напряженности магнитного поля во всех точках этого сечения одинаковыми. В этом случае магнитный поток, пронизывающий один из витков обмотки пояса, можно подсчитать так:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \cong \mu_0 S H \cos \alpha .$$

Если на единицу длины пояса приходится w_0 витков, то полное потокосцепление пояса равно

$$\Psi = \int_a^b \Phi w_0 dl = \int_a^b \mu_0 S w_0 H \cos \alpha dl = \mu_0 S w_0 U_M^{ab} .$$

Отсюда можно найти магнитное напряжение между точками a и b :

$$U_M^{ab} = (\mu_0 S w_0)^{-1} \Psi = K \Psi .$$

Постоянная пояса $K = (\mu_0 S w_0)^{-1}$ зависит только от площади его сечения S и числа витков w_0 на единицу длины.

Если магнитное поле создается синусоидальным током в катушке, то амплитуду потокосцепления или магнитного напряжения можно определить, измеряя напряжение взаимной индукции, возникающее на зажимах обмотки пояса Роговского. Действующее значение этого напряжения пропорционально амплитуде потокосцепления:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \Psi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Psi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f \Psi_m .$$

Отсюда получаем формулу для вычисления амплитуды магнитного напряжения:

$$U_{mm}^{ab} = K \Psi_m = \frac{K}{4,44 f} U = K' U . \quad (23.1)$$

Здесь постоянная

$$K'_{\text{расч}} = \frac{K}{4,44 f} = \frac{1}{4,44 \mu_0 S w_0 f} . \quad (23.2)$$

Экспериментально эта постоянная может быть определена с помощью закона полного тока, если поясом охватить все витки катушки, число витков которой и ток известны, а значит, известна и амплитуда МДС

$$F_m = w I \sqrt{2} = U_{mm}^{ab} . \quad (23.3)$$

В этом случае

$$K'_{\text{опыт}} = \frac{w I \sqrt{2}}{U} . \quad (23.4)$$

Если одна из постоянных (K или K') определена, то магнитный пояс может быть использован не только для измерения магнитных напряжений на участках магнитной цепи или МДС, но и для определения числа витков катушек или больших токов без разрыва цепи.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Сформулировать закон полного тока.
2. Записать выражения суммарной магнитодвижущей силы двух катушек, соединенных последовательно при их согласном и встречном включении.
3. В каких единицах измеряются магнитные напряжения и МДС?
4. В каких единицах измеряются постоянные K и K' ?
5. От чего зависит постоянная магнитного пояса K ?
6. С помощью закона электромагнитной индукции вывести формулу (23.1).

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 23.2.

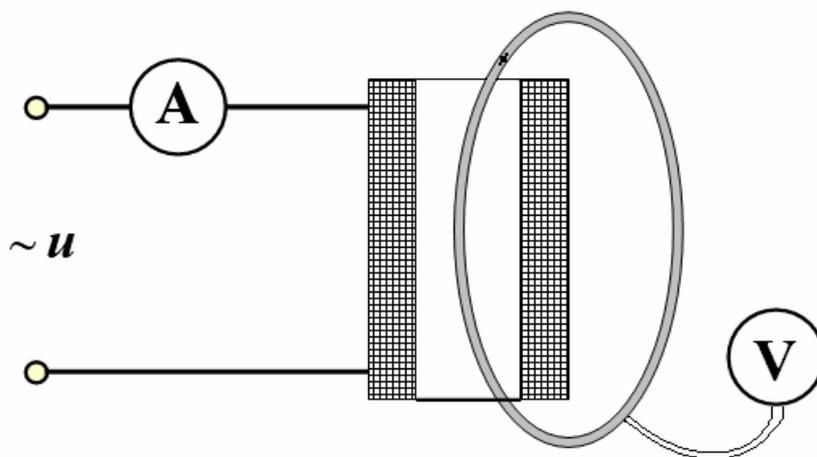


Рис. 23.2

Цепь питается от источника синусоидального напряжения с регулируемой частотой. Значение частоты f в цепи источника, которое следует поддерживать во время работы, приведено в табл. 23.1 (вариант указывает преподаватель). Сечение гибкой ленты, на которой находится обмотка магнитного пояса, имеет площадь $S = 30 \text{ мм}^2$, а на 1 мм длины приходится $w_0 = 8,5$ витков.

Для создания магнитного поля используются катушки из набора миниблоков «Трансформаторы», обмотки которых насчитывают 300 и

900 витков, а ферромагнитный сердечник удален. У вольтметра и амперметра устанавливаются пределы 200 мВ и 200 мА соответственно.

Таблица 23.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
f	кГц	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7

Программа работы

1. Установить катушку с числом витков $w_1 = 900$ и собрать электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 23.2.

2. Установить на генераторе напряжений специальной формы синусоидальное напряжение с частотой f и с помощью регулятора амплитуды напряжения задать максимально возможное действующее значение тока I в катушке (не более 190 мА). Значения этих величин и показание вольтметра, подключенного к обмотке замкнутого пояса Роговского, внести в табл. 23.2.

3. Вычислить постоянную магнитного пояса двумя способами: расчетное значение $K'_{\text{расч}}$ по формуле (23.2) при $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м);, $K'_{\text{опыт}}$ – по результатам измерений из соотношения (23.4) при $w = w_1 = 900$. Сравнить полученные значения и внести их в табл. 23.2.

Таблица 23.2

$S, \text{ м}^2$	$w_0, \text{ в/м}$	$f, \text{ Гц}$	$K'_{\text{расч}}, \text{ См}$	$U, \text{ мВ}$	$I, \text{ мА}$	$K'_{\text{опыт}}, \text{ См}$
$30 \cdot 10^6$	8500					

4. При разомкнутом поясе Роговского, при заданной частоте f и максимально возможном токе (не более 190 мА) для катушки с числом витков $w_1 = 900$ измерить напряжения внутри (U_1) и снаружи (U_2) катушки. Значения тока, напряжений и рассчитанные магнитные напряжения на двух отдельных участках замкнутого магнитного контура внутри ($U_{M1} = K'_{\text{опыт}} U_1$) и снаружи ($U_{M2} = K'_{\text{опыт}} U_2$) катушки записать в табл. 23.3. Проверить выполнение закона полного тока:

$$F_m = \sqrt{2} I w_1 = U_{M1} + U_{M2}.$$

5. Прodelать п. 4 с вставленным в катушку железным сердечником из набора миниблоков.

Таблица 23.3

Катушка $w_1 = 900$	Измерения			Расчет			
	I	U_1	U_2	U_{M1}	U_{M2}	$\sqrt{2}Iw_1$	$U_{M1} + U_{M2}$
	мА	В	В	А	А	А	А
Без сердечника							
С сердечником							

6. Заменить катушку другой с числом витков $w_2=300$ и повторить опыт п.2. Значения тока и напряжения записать в табл. 23.3. Рассчитать число витков w_2 и сравнить найденную величину с паспортным значением.

7. Соединить обе катушки с числами витков $w_1=900$ и $w_2=300$ последовательно и согласно, охватить их замкнутым поясом Роговского. При заданной частоте f установить максимально возможный ток. Значения тока, напряжения и рассчитанное суммарное число витков записать в табл. 23.4.

8. Повторить опыт и расчет при встречном включении катушек.

Таблица 23.4

Объект измерений	I , мА	U , мВ	Расчет
Катушка с числом витков $w_2 = 300$			$w_2 = \frac{K'_{\text{опыт}} U}{I\sqrt{2}} = \dots$
Согласное включение катушек $w_1 = 900$ и $w_2 = 300$			$w_1 + w_2 = \frac{K'_{\text{опыт}} U}{I\sqrt{2}} = \dots$
Встречное включение катушек $w_1 = 900$ и $w_2 = 300$			$w_1 - w_2 = \frac{K'_{\text{опыт}} U}{I\sqrt{2}} = \dots$

8. Сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ КАТУШЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы. Измерение и расчет величины магнитной индукции в различных точках на оси цилиндрической и кольцевых катушек.

Пояснения к работе

На основе закона Био-Савара-Лапласа можно получить формулу для определения напряженности магнитного поля на оси кругового витка радиуса R , по которому протекает ток i (рис. 24.1) :

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

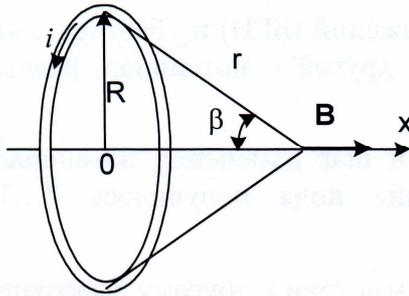


Рис. 24.1

Полученное выражение может быть преобразовано к виду, удобному для вычисления напряженности поля на оси однослойной цилиндрической катушки с радиусом R и длиной l (рис 24.2):

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

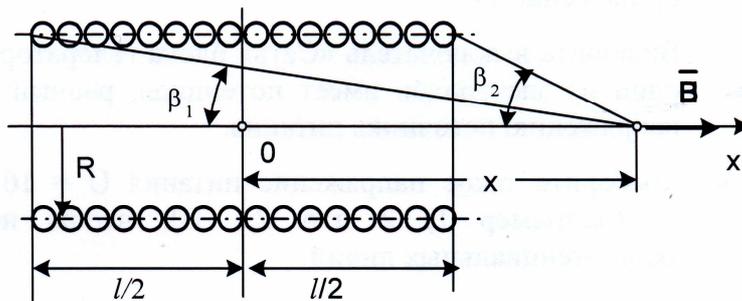


Рис. 24.2

Данное выражение пригодно и для вычисления напряженности магнитного поля на оси многослойных катушек, при условии, что их толщина мала по сравнению с радиусом (нужно помнить, что выражение получено в приближении однослойной катушки, поэтому для реальных катушек в результаты вычислений будет внесена некоторая погрешность).

Учитывая связь между индукцией и напряженностью магнитного поля в воздухе $B = \mu_0 H$, для индукции B на оси катушек получим следующие выражения:

для кольцевой катушки

$$B = \frac{\mu_0 w i R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 w i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{\mu_0 w i}{2} \frac{R^2}{\left(\sqrt{R^2 + x^2}\right)^3}, \quad (24.1)$$

для двух одинаковых соосных кольцевых катушек, расположенных на расстоянии a друг от друга (знак «+» при согласном включении и знак «-» при встречном включении)

$$B = \frac{\mu_0 w i R^2}{2} \left\{ \frac{1}{\left[\sqrt{R^2 + x^2}\right]^3} \pm \frac{1}{\left[\sqrt{R^2 + (x-a)^2}\right]^3} \right\}, \quad (24.2)$$

и для цилиндрической катушки

$$B = \frac{\mu_0 w i}{2l} \left[\frac{x + 0,5l}{\sqrt{R^2 + (x + 0,5l)^2}} - \frac{x - 0,5l}{\sqrt{R^2 + (x - 0,5l)^2}} \right], \quad (24.3)$$

где w – число витков катушек; R – радиусы катушек; l – длина цилиндрической катушки; x – расстояние от центра цилиндрической или неподвижной кольцевой катушки.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Записать и пояснить общую формулу закона Био-Савара-Лапласа.
2. От чего зависит индукция магнитного поля B на оси катушек?
3. Как изменяется индукция магнитного поля B на оси кольцевой катушки с увеличением расстояния x и при отрицательных значениях x ?
4. Как изменяется индукция магнитного поля B на оси двух кольцевых катушек: с увеличением расстояния x и при отрицательных значениях x ; при увеличении расстояния a между катушками при их согласном и встречном включениях?

5. Как изменяется индукция магнитного поля B на оси цилиндрической катушки с увеличением расстояния x и при отрицательных значениях x ?

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 24.3 для кольцевых катушек или на рис. 24.4 для цилиндрической катушки. Цепь питается от источников постоянного напряжения. Напряжение и ток измеряются вольтметром и амперметром с пределами 2 В и 200 мА соответственно. Значение постоянного тока $i=I$ в цепи катушек, расстояние между кольцевыми катушками a и исследуемая схема приведены в табл. 24.1 (вариант указывает преподаватель).

Таблица 24.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I мА	100	190	190	190	90	180	180	180	170	170
a мм	–	10	10	–	–	15	15	–	20	20
Схема на рис.	24.3 од-на кат.	24.3 согл. вкл.	24.3 встр. вкл.	24.4	24.3 од-на кат.	24.3 согл. вкл.	24.3 встр. вкл.	24.4	24.3 согл. вкл.	24.3 встр. вкл.

В комплект, предназначенный для выполнения экспериментального исследования, входит миниблок с двумя кольцевыми соосными катушками (верхняя катушка неподвижна) и миниблок с цилиндрической катушкой. Параметры катушек указаны на миниблоках: радиусы катушек $R = 7 \text{ мм} = 0,007 \text{ м}$, число витков кольцевых катушек $w = 250$, число витков цилиндрической катушки $w = 2000$, длина цилиндрической катушки $l = 47 \text{ мм} = 0,047 \text{ м}$.

Для измерения магнитной индукции используется датчик Холла с усилителем (миниблок «Тесламетр»). При работе к миниблоку «Тесламетр» подводится питание $\pm 15 \text{ В}$, а к его выходу подключается вольтметр с пределом 2 В. Перед выполнением измерений ручкой остановки нуля на выходе датчика устанавливается напряжение близкое к нулю (предел измерений вольтметра переключается на 200 мВ). Непосредственно измерения осуществляются введением зонда датчика внутрь катушки на нужное расстояние. При этом показания вольтметра будут

пропорциональны индукции магнитного поля. Чувствительность системы «датчик-усилитель» указана на миниблоке «Тесламетр».

Программа работы

1. Согласно варианту (табл. 24.1) собрать схему по рис. 24.3 или 24.4. Изменением напряжения регулируемого источника установить требуемое значение тока I . При исследовании магнитного поля одной кольцевой катушки используется верхняя неподвижная катушка. Для двух кольцевых катушек при их согласном или встречном включении устанавливается поводом заданное расстояние между катушками a . На рис. 24.3 показано согласное включение кольцевых катушек.

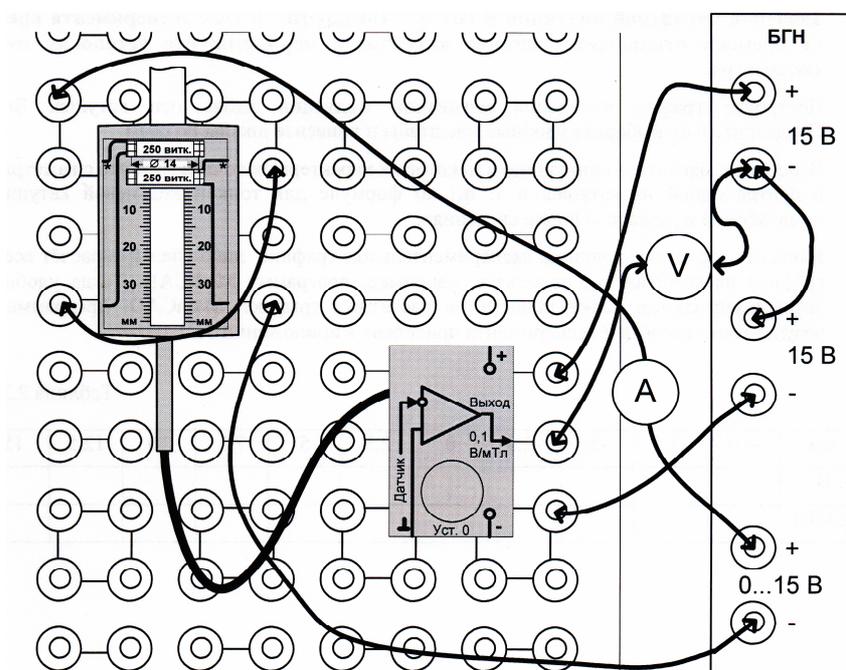


Рис. 24.3

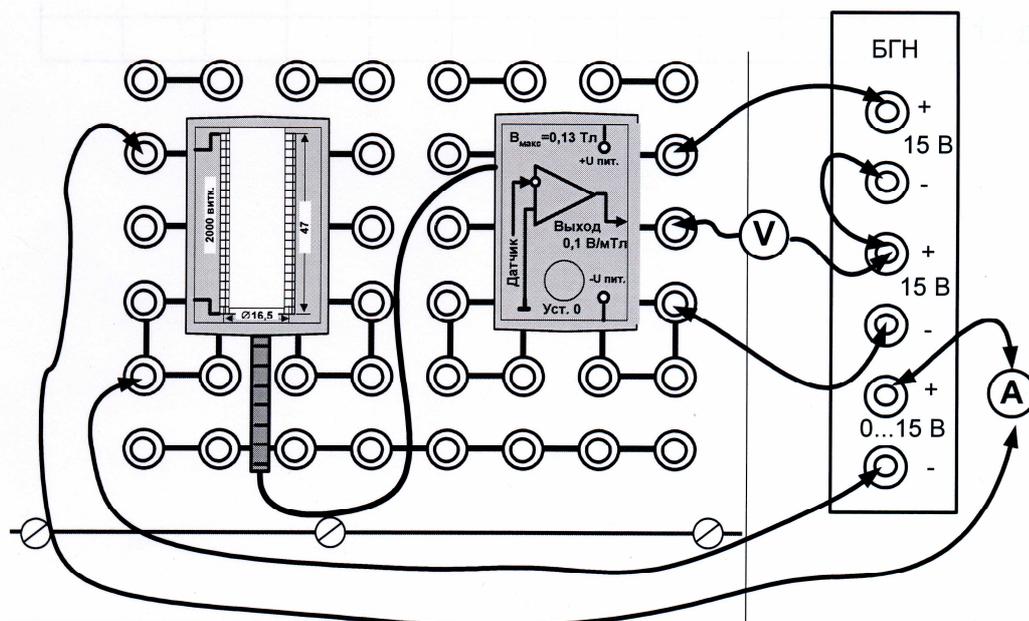


Рис. 24.4

2. Разомкнуть цепь питания катушек (вынуть для этого из гнезда контакт провода от амперметра), установить предел измерения вольтметра 200 мВ и при нулевом токе в катушке ручкой установки нуля установите как можно меньшее показание вольтметра (обычно удается получить напряжение менее 20 мВ).
3. Замкнуть цепь питания катушек, установить предел вольтметра 2 В и определить положение датчика Холла, соответствующее координате $x=0$ и максимальному показанию вольтметра (при исследовании магнитного поля двух кольцевых катушек подвижную нижнюю катушку временно отключить). При этом установить такую полярность у вольтметра, чтобы его максимальное показание было положительно.
4. Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль осей катушек с шагом 5 мм записать координаты x и соответствующие им показания вольтметра U в табл. 24.2. При этом перемещение датчика Холла от положения $x=0$ вниз соответствует $x > 0$, а вверх от $x=0$ соответствует $x < 0$.

Таблица 24.2

x , мм	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
U , В									
B_z , мТл									
B_p , мТл									

5. Рассчитать для всех координат x экспериментальные значения магнитной индукции в милитеслах (мТл) как

$$B_{\text{э}} = 10U,$$

причем показания вольтметра U подставляются в эту формулу в вольтах.

6. По соответствующей формуле (24.1–24.3) для всех координат x вычислить расчетные значения магнитной индукции $B_{\text{р}}$ в милитеслах (мТл). Результаты внести в табл. 24.2.
7. По данным табл. 24.2 построить в одних осях графики зависимости экспериментальной и расчетной магнитной индукции от координаты x .
8. Сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 25

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы. Исследование зависимости электромагнитной силы от величины создающего её постоянного тока.

Пояснения к работе

В данной работе измеряется сила притяжения двух подковообразных частей разъемного сердечника электромагнита, когда по его обмоткам, включенным последовательно и согласно, протекает постоянный ток. Расчетное значение этой силы в ньютонах (Н) может быть определено по плотности энергии магнитного поля в двойном зазоре между сердечниками:

$$F_{\text{р}} = 2 \left(S \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) = \mu_0 S \left(\frac{Iw}{2\delta} \right)^2, \quad (25.1)$$

где $S = 208 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения сердечника;

$w = 1800$ – суммарное число витков двух катушек электромагнита;

H , А/м – напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита;

I , А – постоянный ток в катушках электромагнита;

$2\delta = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – двойной зазор между двумя половинами сердечника.

Принципиальная схема установки показана на рис. 25.1. При включении выключателя по обмоткам электромагнита начинает протекать постоянный ток и две половины разъемного сердечника притягиваются

друг к другу. При отключении цепи сила притяжения исчезает. Полупроводниковый диод служит для исключения перенапряжений в схеме при отключении катушки.

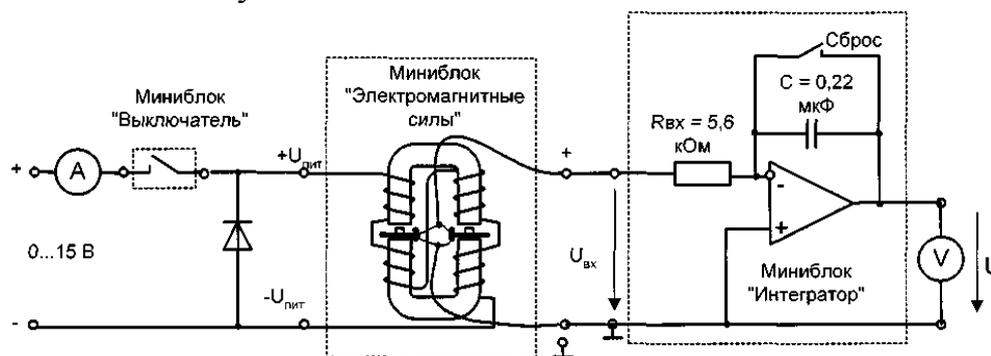


Рис. 25.1

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Чему равна энергия равномерного магнитного поля в зазоре между сердечниками электромагнита?
2. Чему равна напряженность равномерного магнитного поля в зазоре между сердечниками электромагнита?
3. Записать и пояснить закон Ампера.
4. Как определяются силы, действующие в равномерном магнитном поле на прямолинейный проводник с током и на сердечник электромагнита?
5. Вывести формулу (25.1).

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 25.2. Цепь питается от источников постоянного напряжения. Для измерения постоянного тока и напряжения используются амперметр и вольтметр с пределами 200 мА и 2 В соответственно. Величины токов, при которых измеряются силы, приведены в табл. 25.1 (вариант указывает преподаватель). 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.

Таблица 25.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I, \text{ mA}$	25	30	40	48	60	35	45	52	62	82
	50	55	65	70	80	72	92	77	82	97
	75	90	95	85	125	102	135	97	110	112
	100	115	120	105	150	132	155	117	140	127

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 переключатель «Сброс». После установки нуля переключатель нужно вернуть в исходное положение и интегратор готов к работе.

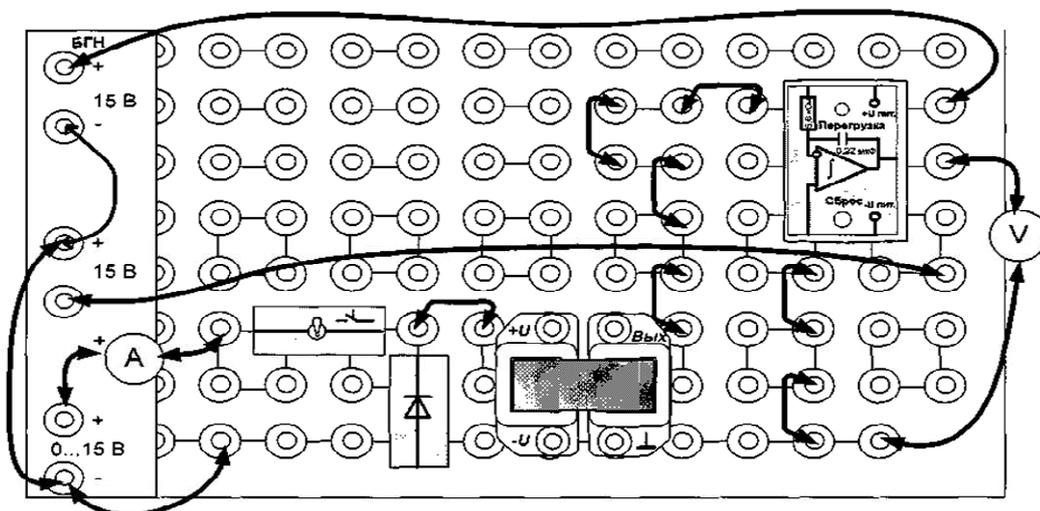


Рис. 25.2

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 отсчет выходного напряжения необходимо выполнять в течение 2–3 секунд сразу после интегрирования. Для калибровки системы «датчик–интегратор» используется вес самого подвижного сердечника, который указан на этикетке сердечника. Во всех измерениях показания вольтметра брать по модулю.

Программа работы

1. Собрать электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 25.2. Переключатель интегратора установите на «Сброс», а выключатель на входе цепи выключите (ток в обмотках электромагнита будет равен нулю).
2. Включить блок источников постоянных напряжений и убедиться, что на выходе интегратора напряжение близко к нулю (меньше 10 мВ).
3. Установить предел измерений вольтметра 2 В, перевести переключатель интегратора в нижнее положение и тотчас же вынуть верхнюю половину сердечника из катушек. Сразу после этого записать показание вольтметра в табл. 25.2.
4. Переключить интегратор в положение «Сброс». Убедиться, что на его выходе установилось нулевое напряжение. Вернуть переключатель интегратора в нижнее положение и тотчас же вставить сердечник в катушки, не нажимая на него и бросая с большой высоты. Сразу после этого записать модуль показания вольтметра в табл. 25.2. Модуль этого показания не должен сильно отличаться от напряжения в предыдущем опыте, хотя знак этого напряжения противоположно.
5. Повторить опыты по п. 3 и 4 ещё четыре раза, записывая результаты в табл. 25.2.
6. По данным табл. 25.2, отбросив сильно отличающиеся напряжения, рассчитать среднее напряжение U_{CP} и постоянную системы «датчик–интегратор» $\alpha = 100/U_{\text{CP}}$, Г/В (размерность грамм силы на вольт). Результаты внести в табл. 25.2.
- 7.

Таблица 25.2

$U, \text{ В}$ при снятии сердечника					
$U, \text{ В}$ при установке сердечника					
$U_{\text{CP}} = \dots\dots \text{ В}$		$\alpha = \dots\dots \text{ Г/В}$			

7. Включить выключатель на входе цепи и установить регулировкой напряжения источника согласно табл. 25.1 требуемую величину тока I . Провести «Сброс» интегратора и тотчас же после перевода переключателя интегратора в нижнее положение записать показа-

ние вольтметра. Сразу после этого выключателем выключить ток в катушке и записать показание вольтметра. Прodelать этот опыт несколько раз при включении и выключении тока, записать в табл. 25.3 среднее показание вольтметра U без учета знака.

8. Повторить опыты по п. 7 при других значениях тока I , взятых из табл. 25.1.
9. По полученным напряжениям U из табл. 25.3 определить экспериментальные значения силы в граммах по формуле $F_{\text{Э}} = \alpha U$ и записать их в табл. 25.3.
10. При тех же значениях токов по формуле (25.1) вычислить расчетную силу $F_{\text{Р}}$ в граммах (в одном ньютоне 100 грамм силы) и её значения записать в табл. 25.3.

Таблица 25.3

I , мА				
U , В				
$F_{\text{Э}}$, Г				
$F_{\text{Р}}$, Г				

11. По результатам п. 9 и 10 в одних осях построить зависимости величины силы от тока: $F_{\text{Э}}(I)$ и $F_{\text{Р}}(I)$.
12. Сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 26

СНЯТИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы. Получить на осциллографе петлю гистерезиса ферромагнетика, снять экспериментально основную кривую намагничивания, рассчитать и построить зависимости относительной магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.

Пояснения к работе

Магнитные свойства тела определяются микроскопическими электрическими токами внутри вещества, так как имеется орбитальное движение электронов в атомах и наличие у электрона собственного магнитного момента, имеющего квантовую природу. Если направления этих токов неупорядочены, порождаемые ими магнитные поля компенсируют друг друга, то есть тело будет не намагничено. Во внешнем магнитном

поле происходит упорядочение этих токов, вследствие чего в веществе и возникает «собственное» магнитное поле (намагниченность).

Вещества, в которых все элементарные токи ориентированы так, что их магнитные поля противоположно направлены во внешнем магнитном поле, называются *диамагнитными* (медь, серебро, вода). В других веществах (алюминий, натрий, воздух, кислород) элементарные токи ориентированы так, что их магнитные поля совпадают с внешним магнитным полем. Но внутреннее магнитное поле этих веществ мало, поэтому усиление внешнего магнитного поля слабое. Такие вещества называются *парамагнитными*. В веществах (железо, кобальт, никель и их сплавы) внутреннее магнитное поле представляется областями спонтанного намагничивания – доменами, которые ориентируются в направлении силовых линий магнитной индукции внешнего поля и усиливают его в сотни и тысячи раз. Эти вещества называются *ферромагнитными*.

Магнитная индукция у ферромагнитных материалов B имеет нелинейную зависимость от напряженности H магнитного поля. Зависимость $B(H)$ – кривая намагничивания ферромагнитного материала при циклическом перемагничивании имеет вид петли. Она может быть снята с помощью осциллографа.

Рассмотрим процесс намагничивания ферромагнитного вещества. В начальный момент, когда сердечник не намагничен, при монотонном увеличении напряженности внешнего поля индукция растет сначала быстро вследствие того, что элементарные токи ориентируются так, что их магнитные потоки добавляются к внешнему потоку. При больших значениях индукции скорость ее возрастания уменьшается и при некотором значении B происходит полная ориентация всех элементарных магнитиков, т. е. наступает магнитное насыщение сердечника. Кривая OD_1 получающаяся при условии, что вещество предварительно было размагничено, называется *начальной кривой намагничивания* (рис. 26.1, а).

При уменьшении напряженности H магнитного поля уменьшение магнитной индукции будет отставать, т.е. кривая $B=f(H)$ при убывающей напряженности поля располагается выше начальной кривой намагничивания. При уменьшении величины H до нуля наблюдается остаточная намагниченность и соответствующая ей *остаточная индукция*. Чтобы индукция стала равной нулю, напряженность поля должна принять отрицательное значение, называемое коэрцитивной (задерживающей) силой. Если довести H до отрицательного значения $-H_m$, по абсолютной величине равного наибольшему положительному значению, то индукция примет отрицательное значение, соответствующее точке C_1 . Вновь увеличивая напряженность до $+H_m$, получаем ветвь C_1D_2 . Таким образом, значение индукции при заданном значении напряженности по-

ля зависит от истории процесса намагничивания. Это явление называется явлением *магнитного гистерезиса* – от греческого «*hysteresis*» – отставание следствия от его причины. Только после достаточного числа (примерно десяти) перемагничивания получаем симметричную гистерезисную петлю (*CD*), изображенную на рис. 26.1, *а* штриховой линией. На рис. 26.1, *б* изображено семейство симметричных гистерезисных петель, полученных при различных значениях H_m . Кривая $B=f(H)$, проходящая через вершины симметричных гистерезисных петель, называется *основной кривой намагничивания* и является вполне определенной для данного сорта материала.

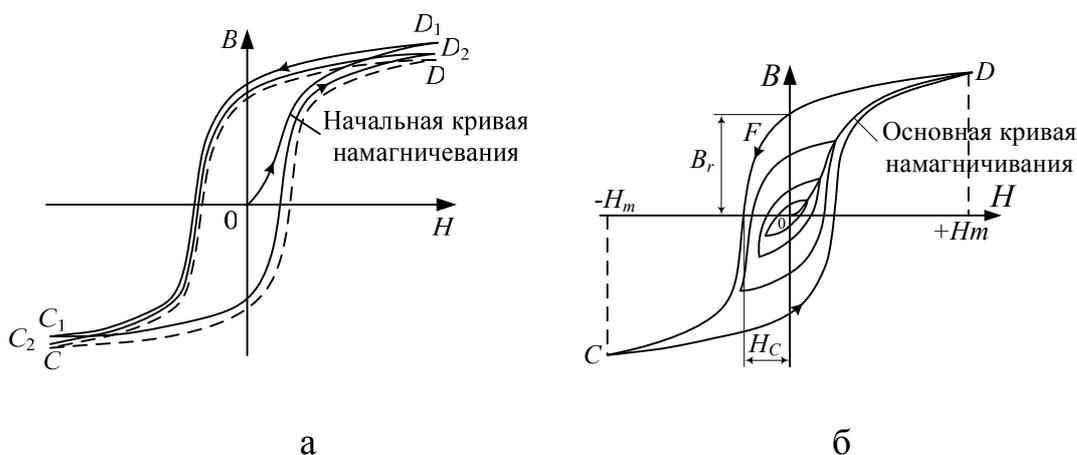


Рис. 26.1

Коэрцитивная сила и форма петли гистерезиса характеризуют свойство ферромагнетика сохранять остаточное намагничивание и определяют использование ферромагнетиков для различных целей. Ферромагнетики с широкой петлей гистерезиса называются *жесткими магнитными материалами* (углеродистые, вольфрамовые, хромовые, алюминий-никелевые и другие стали). Они обладают большой коэрцитивной силой и используются для создания постоянных магнитов различной формы (полосовых, подковообразных, магнитных стрелок). К *мягким магнитным материалам*, обладающим малой коэрцитивной силой и узкой петлей гистерезиса, относятся железо, сплавы железа с никелем. Эти материалы используются для изготовления сердечников трансформаторов, генераторов и других устройств, в ходе работы которых происходит перемагничивание в переменных магнитных петлях. Перемагничивание ферромагнетика связано с поворотом областей самопроизвольного намагничивания.

При этом происходит интенсивное движение частиц вещества, сердечник нагревается, происходит потеря энергии от гистерезиса. Ве-

личина потерь энергии от гистерезиса пропорциональна площади, ограниченной петлей гистерезиса.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Объясните физическую сущность магнитного гистерезиса.
2. Почему при перемагничивании ферромагнитные материалы нагреваются?
3. Что такое кривая начального намагничивания и основная кривая намагничивания?
4. В чем состоит различие магнитных свойств магнитотвердых и магнитомягких материалов?
5. Назовите области применения магнитотвердых и магнитомягких материалов.

Схема электрической цепи

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 26.2.

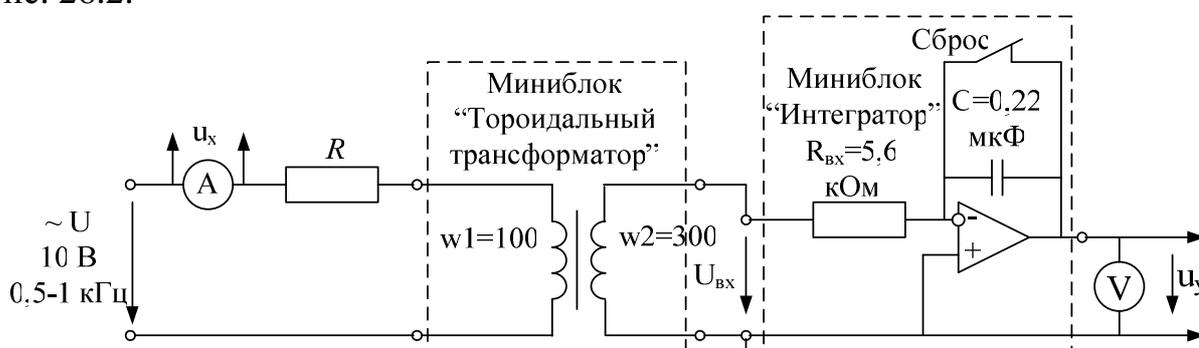


Рис.26.2

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 с $w_1 = 100$ витками и вторичная обмотка с $w_2 = 300$ витками и отпайкой на 100 витков. Первичная обмотка подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К вто-

ричной обмотке 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; $S=48 \text{ мм}^2$ – сечение сердечника; B – магнитная индукция.

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

Отсюда магнитная индукция в сердечнике: $B = \frac{\Phi}{S} = \sqrt{2} \frac{R_{\text{вх}} C}{w_2 S} U_{\text{вых}}.$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = \sqrt{2} \cdot I w_1 / l,$$

где $l=50 \text{ мм}$ – длина средней линии сердечника.

Напряжение u_x с шунта амперметра подаётся на горизонтальный вход (канал X) осциллографа, а напряжение u_y с выхода интегратора – на вертикальный вход (канал Y). Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе – магнитной индукции на экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость $B(H)$. В табл. 26.1 указаны согласно варианту устанавливаемое входное сопротивление и частота источника регулируемого синусоидального напряжения.

Таблица 26.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R , Ом	100	100	100	100	100	47	47	47	47	47
f , кГц	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	0,5	0,6	0,7	0,8

Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторную установку по схеме рис. 26.3 и установить пределы измерения вольтметра – 20 В и амперметра – 200 мА. Переключатель интегратора установить в положение «Сброс».

2. Включить осциллограф, подключить к первому каналу X сигнал с шунта амперметра u_x , а ко второму каналу Y – сигнал с выхода интегратора u_y . Установить длительность развёртки 200 мкс/дел.

3. Включить блок генераторов напряжений, установить на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал максимальной амплитуды и с частотой согласно варианту.

4. Убедиться, что на осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов. При необходимости сместить изображение по горизонтали, в центр экрана.

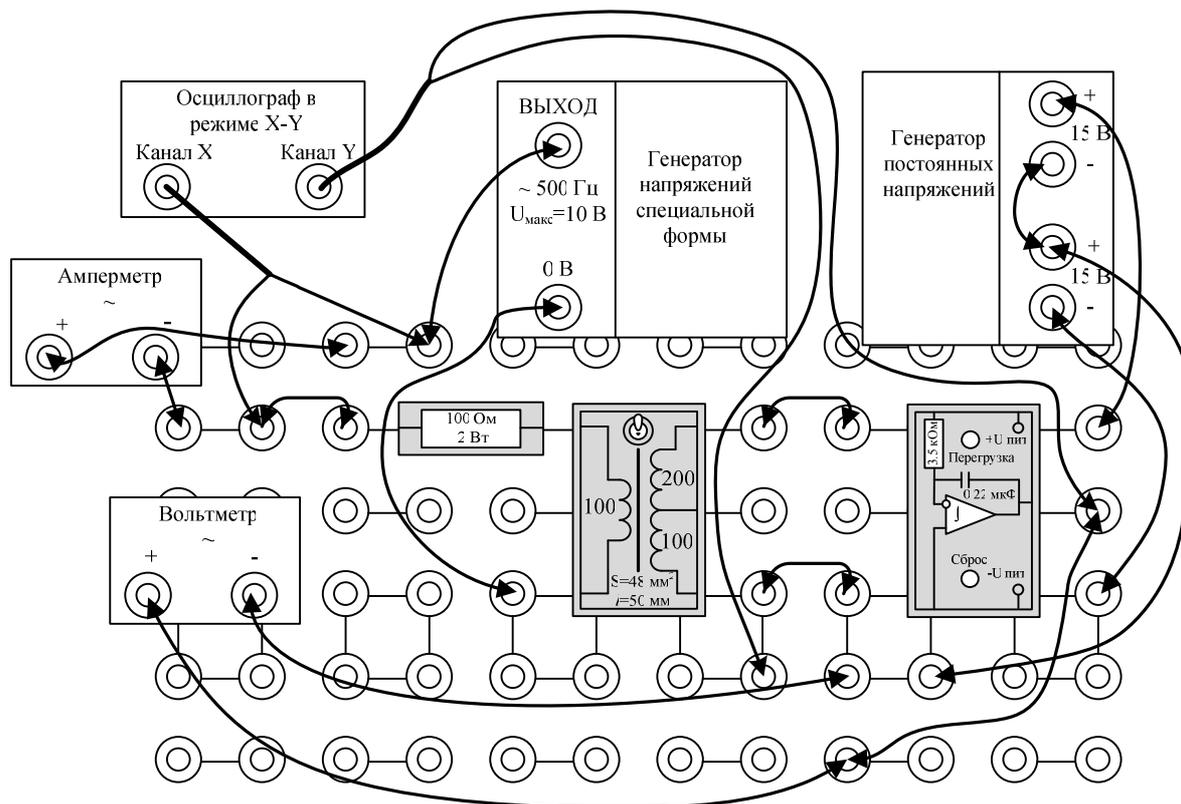


Рис. 26.3

5. Включить режим X-Y осциллографа и убедиться, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. При необходимости заменить токоограничивающий резистор 100 Ом или 47 Ом на меньшее значение так, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. Срисовать петлю гистерезиса.

6. Шаг за шагом, уменьшая намагничивающий ток до нуля, снять зависимость выходного напряжения интегратора от тока. По показаниям приборов записать в табл. 26.2 значения тока и выходного напряжения интегратора.

7. По формулам, приведённым в разделе «Схема электрической цепи», рассчитать и записать в табл. 26.2 соответствующие значения

РАБОТА 27

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО КОНДЕНСАТОРА С СЕГНЕТОДИЭЛЕКТРИКОМ

Цель работы. Получить на экране 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 $\epsilon_r(E)$.

Пояснения к работе

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 :

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E + \alpha \cdot E = \epsilon_a E,$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

α – абсолютная диэлектрическая восприимчивость;

$\epsilon_a = \epsilon_0 + \alpha$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Для большинства конденсаторов, применяемых на практике диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора не зависит от напряженности электрического поля, а значит, и емкость C конденсатора не зависит от напряжения на конденсаторе. Зависимость заряда q такого конденсатора от напряжения u выражается прямой линией (рис. 27.1). Говорят, что такой конденсатор имеет *линейную характеристику* $q = f(u) = Cu$.

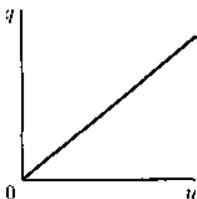


Рис. 27.1

Для нелинейных конденсаторов (*варикондов*) зависимость q от u нелинейна.

Пространство между обкладками вариконда заполняют сегнетоэлектриком. *Сегнетоэлектрики* (сегнетодиэлектрики) – это группа диэлектриков, у которых в некотором интервале температур наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризованность. Для сегнетоэлектриков величина диэлектрической проницаемости сильно зависит от напряженности электрического поля. При некоторых значениях напряженности поля относительная диэлектрическая проницаемость этих веществ достигает весьма больших значений.

Наименование «сегнетоэлектрики» связано с наименованием вещества сегнетова соль, для которого впервые были обнаружены указанные свойства.

Существование сегнетоэлектриков имеет принципиальное значение. Их свойства в группе диэлектриков в значительной степени аналогичны свойствам ферромагнитных веществ. Это дает основание дать физическое объяснение свойств сегнетоэлектриков, сходное с объяснением свойств ферромагнитных веществ. При отсутствии 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. 27.2).

При некотором значении 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. Это так называемое явление *диэлектрического гистерезиса*. При циклическом изменении напряженности образует замкнутую кривую, которая называется *петлей гистерезиса сегнетоэлектрика*.

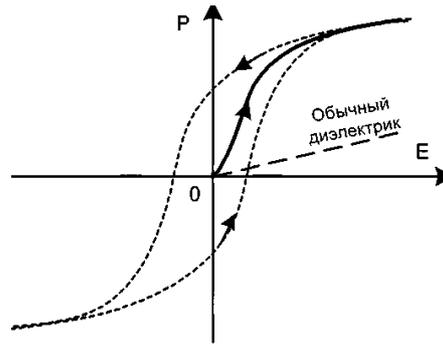


Рис. 27.2

Ширина петли и, следовательно, потери на поляризацию у различных сегнетоэлектриков существенно отличаются. Наличие этих довольно значительных потерь затрудняет использование их при переменных полях, особенно при высоких частотах. Кроме потерь на гистерезис в варикондах есть еще потери, обусловленные тем, что проводимость сегнетоэлектрика не равна нулю, а также вязкостью процессов поляризации.

Конденсаторы с нелинейной характеристикой находят применение в устройствах автоматического управления и усилителях мощности. Сегнетомягкие материалы, имеющие очень узкую петлю используются для изготовления малогабаритных конденсаторов большой ёмкости. Если у обычных диэлектриков абсолютная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_a = (1...4)\epsilon_0$, то у сегнетоэлектриков она может достигать $10^4 \cdot \epsilon_0$.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Что такое поляризация диэлектриков?
2. Какие вещества называются сегнетоэлектриками?
3. Объясните физическую сущность электрического гистерезиса.
4. С чем связаны потери в варикондах?
5. Назовите области применения нелинейных конденсаторов.

Схема электрической цепи

В данной работе исследуется малогабаритный конденсатор, диэлектриком в котором служит сегнетомягкий материал. Для экспериментального получения зависимости $P(E)$ используется тот факт, что у

сегнетоэлектриков $\varepsilon_0 E \ll P$ и, следовательно, $D \cong P$, т.е. зависимость $P(E)$ практически совпадает с $D(E)$. Зависимость $D(E)$ 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 электронного осциллографа.

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 27.3.

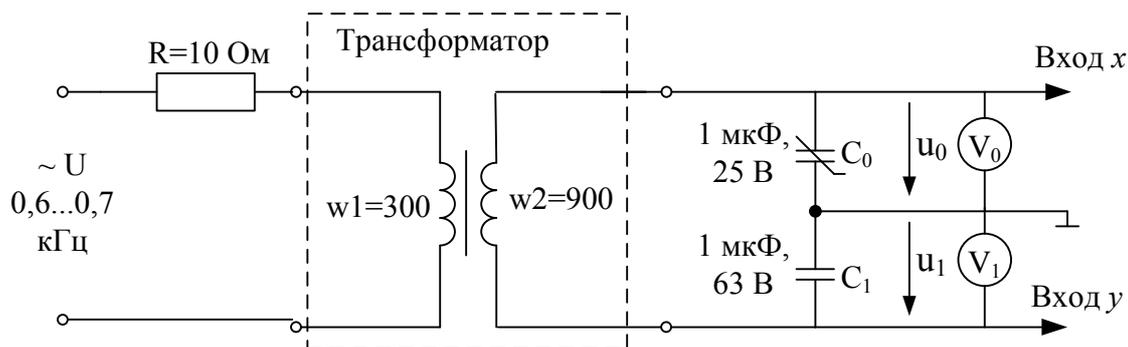


Рис. 27.3

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 :

$$q = C_1 u_1.$$

Напряжение u_1 подаётся на вертикальный вход электронного 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.

$$P = D - \varepsilon_0 E \cong \frac{C_1 u_1}{S},$$

где S – площадь обкладок конденсатора.

Площадь поверхности обкладки конденсатора $S = 300 \text{ мм}^2$, толщина изоляции $d = 0,01 \text{ мм}$ и добавочный резистор $R = 10 \text{ Ом}$, который служит для ограничения постоянной составляющей тока, возникающего

из-за наличия небольшой постоянной составляющей в выходном напряжении генератора. Питание цепи осуществляется от источника синусоидального напряжения с регулируемой частотой. Величина сопротивления R добавочного резистора и устанавливаемая частота f источника приведены согласно варианту в табл. 27.1.

Таблица 27.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R , Ом	10	10	10	10	10	22	22	22	22	22
f , кГц	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8

Порядок выполнения работы

1. Собрать на наборном поле лабораторную установку согласно схеме опыта, изображенной на рис. 27.4 и установить пределы измерения вольтметра $V_0 - 200$ В, а вольтметра $V_1 - 20$ В.

Предупреждение. Амплитуда напряжения на нелинейном конденсаторе вследствие резонансных явлений на высших гармониках может достигать 100 В. Не меняйте местами линейный и нелинейный конденсаторы и соблюдайте полярность подключения вольтметров, указанную на схеме. При использовании электронного осциллографа следите за правильным подключением общей точки горизонтального и вертикального входов.

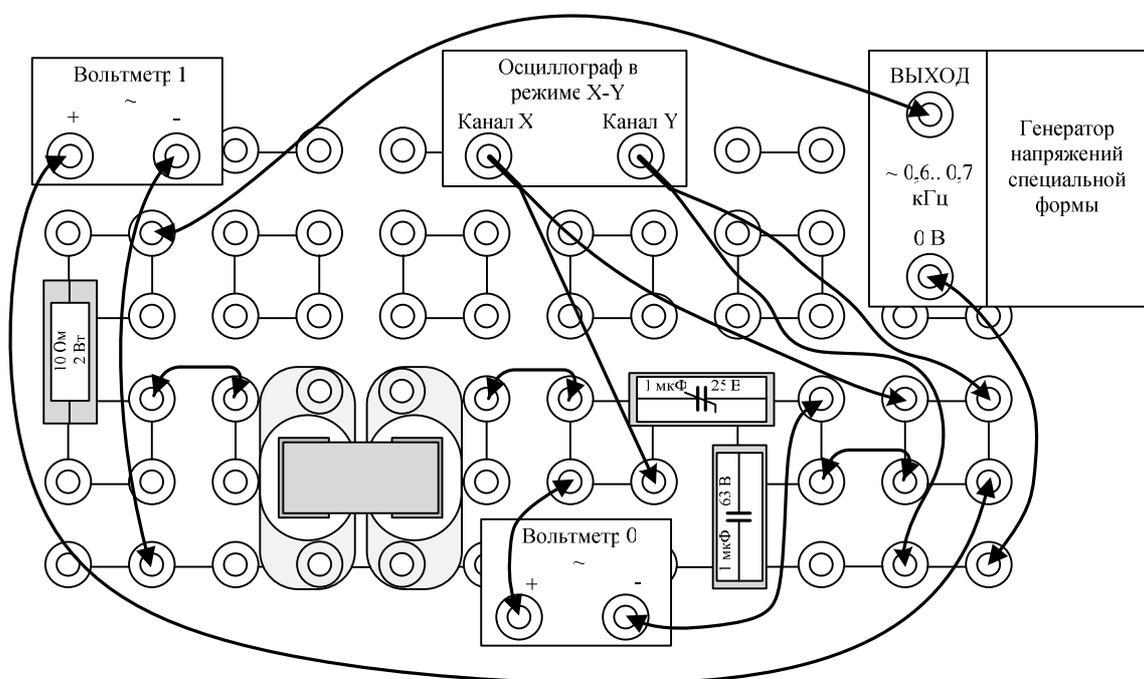


Рис. 27.4

2. Включить осциллограф, подключить к его первому каналу сигнал V_0 , а ко второму – сигнал V_1 . Установить необходимую длительность развёртки.

3. Включить блок генераторов напряжений и установить на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал максимальной амплитуды и с частотой согласно варианту.

4. Убедитесь, что на осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов напряжений. При необходимости сместить изображение по горизонтали, в центр экрана.

Таблица 27.2

U_0	U_1	$E = U_0/d$,	$P = C_1 U_1/S$,	$\varepsilon_r = \Delta P / (\varepsilon_0 \Delta E)$	E_{cp}
В	В	В/м	Кл/м ²	–	В/м

5. Включить режим X-Y осциллографа и убедиться, 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 2). Петля гистерезиса данного типа конденсаторов весьма узкая, на осциллографе она наблюдается как одна линия.

6. Уменьшая синусоидальное напряжение до нуля шаг за шагом записать в табл. 27.2 по показаниям вольтметров напряжения на линейном конденсаторе – U_1 и на нелинейном – U_0 .

7. Рассчитать и внести в табл. 27.2 поляризованность P , относительную диэлектрическую проницаемость ε_r при $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и среднюю напряженность:

$$E_{cp} = \frac{E_{n+1} + E_n}{2}.$$

Выбрать масштабы и построить графики $P(E)$ и $\varepsilon_r(E_{cp})$.

8. По максимальным значениям напряжений $U_0 = U_{0m}$ и $U_1 = U_{1m}$ из табл. 27.2 рассчитать для срисованной петли кулон-вольтной характеристики $q(u)$ масштабы напряжения

$$m_u = \frac{U_{0m}}{x_m} \text{ (В/мм)}$$

и заряда

$$m_q = \frac{C_1 U_{1m}}{y_m} \text{ (Кл/мм)},$$

где x_m, y_m – расстояния (в мм) от центра петли гистерезиса до проекций её вершины соответственно на горизонтальной и вертикальной осях.

9. Сделать выводы по работе.

РАБОТА 28

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ В МАССИВНЫХ ПРОВОДНИКАХ

Цель работы. Экспериментально исследовать изменение действующего значения плотности тока по ширине медного ленточного проводника.

Пояснения к работе

Переменный синусоидальный 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. 28.1, а). В двух близко расположенных шинах с противоположным направлением токов, кроме того, происходит вытеснение токов на поверхности шин, обращенных друг к другу (рис. 28.1, б). При одинаковых направлениях токов в двух таких шинах вытеснение токов происходит на внешние поверхности. В проводнике, уложенном в ферромагнитный паз ротора или статора электрической машины, происходит вытеснение тока на открытую поверхность проводника (рис. 28.1, в).

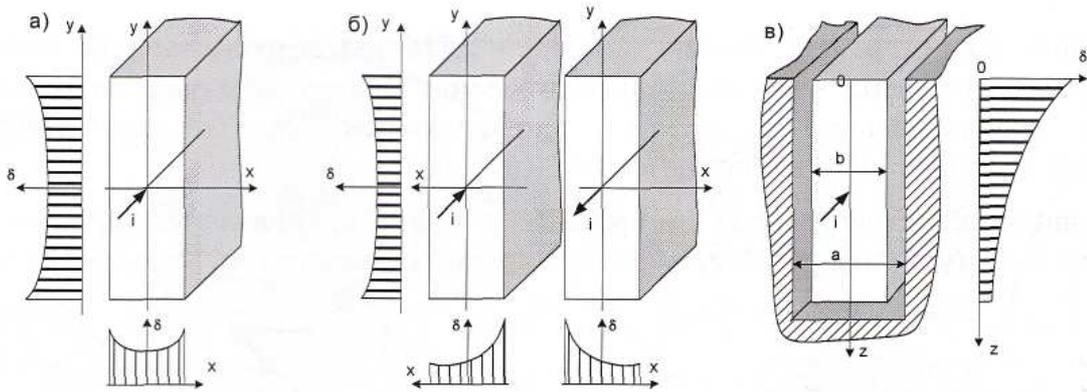


Рис. 28.1

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 отраженной электромагнитной волной от его дна, тогда распределение комплекса действующего значения плотности тока по высоте паза (вдоль оси z) может быть описано следующей формулой:

$$\underline{\delta} = \delta(0) \cdot e^{-kz} \cdot e^{j(0,25\pi - kz)},$$

где $k = \sqrt{\frac{\mu\gamma\omega}{2} \cdot \frac{b}{a}}$, $1/\text{м}$ – коэффициент затухания;

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

I – действующее значение синусоидального тока в проводнике;

ω – угловая частота тока;

μ и γ – магнитная проницаемость и проводимость проводника;

a и b – ширина паза и толщина проводящей шины (рис. 28.1, в).

Таким образом, плотность тока по высоте паза изменяется по величине и фазе. Глубина, на которой плотность тока в $e = 2,718$ раз меньше, чем на поверхности проводника, называется глубиной проникновения в проводник электромагнитной волны: $\Delta = 1/k$. Глубина проникновения уменьшается с увеличением частоты 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. 28.2).

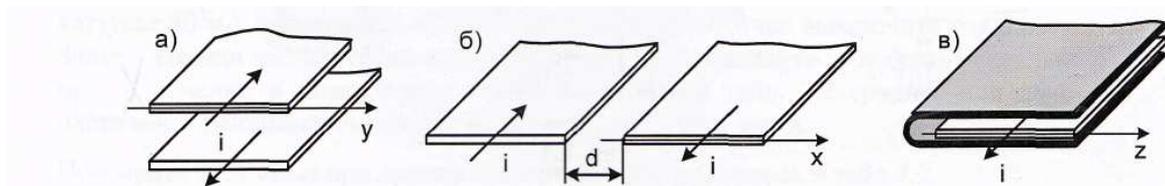


Рис. 28.2

Первый вариант расположения проводников (рис. 28.2, а) позволяет экспериментально исследовать распределение тока вдоль ширины (ось y) двух близко расположенных прямоугольных шин, показанных на рис. 28.1, б.

Во втором случае (рис. 28.2, б) опыт может быть выполнен при двух значениях расстояния между шинами: $d = 63$ мм и $d = 3$ мм. При большом расстоянии между ленточными проводниками, когда эффект близости сказывается незначительно, распределение тока в них аналогично распределению тока в одной прямоугольной шине вдоль оси x , показанной на рис. 28.1, а. При малом расстоянии между ленточными проводниками, когда сильно проявляется эффект близости, распределение тока в них аналогично распределению тока в двух прямоугольных шинах вдоль оси x , показанных на рис. 28.1, б.

В третьем случае (рис. 28.2, в) медная лента охвачена с трех сторон ферромагнитным экраном и распределение тока в ней примерно такое же, как в проводнике, уложенном в паз электрической машины (рис. 28.1, в).

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Как проявляется поверхностный эффект в массивных проводниках?
2. Как проявляется эффект близости в массивных проводниках?
3. Как проявляется поверхностный эффект в массивном проводнике, уложенном в ферромагнитный паз?
4. К чему приводит неравномерное распределение тока в проводниках?
5. Что называется глубиной проникновения в проводник электромагнитной волны? Чему она равна и от чего она зависит?

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 28.3. Ленточные медные проводники запитываются от источника синусоидального напряжения с регулируемой частотой и амплитудой. Для измерения действующих значений тока и напряжения используются амперметр и вольтметр с пределами 2 А и 2 В соответственно. Частота источника f и схема расположения проводников, указанных на рис. 28.2, приведены в табл. 28.1 (вариант указывает преподаватель).

Таблица 28.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , кГц	2	2	2	0,25	2,5	2,5	2,5	0,27	2,2	0,3
Схема рис. 28.2	а	б $d=63\text{мм}$	б $d=3\text{мм}$	в	а	б $d=63\text{мм}$	б $d=3\text{мм}$	в	а	в

Ленточные медные проводники 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).

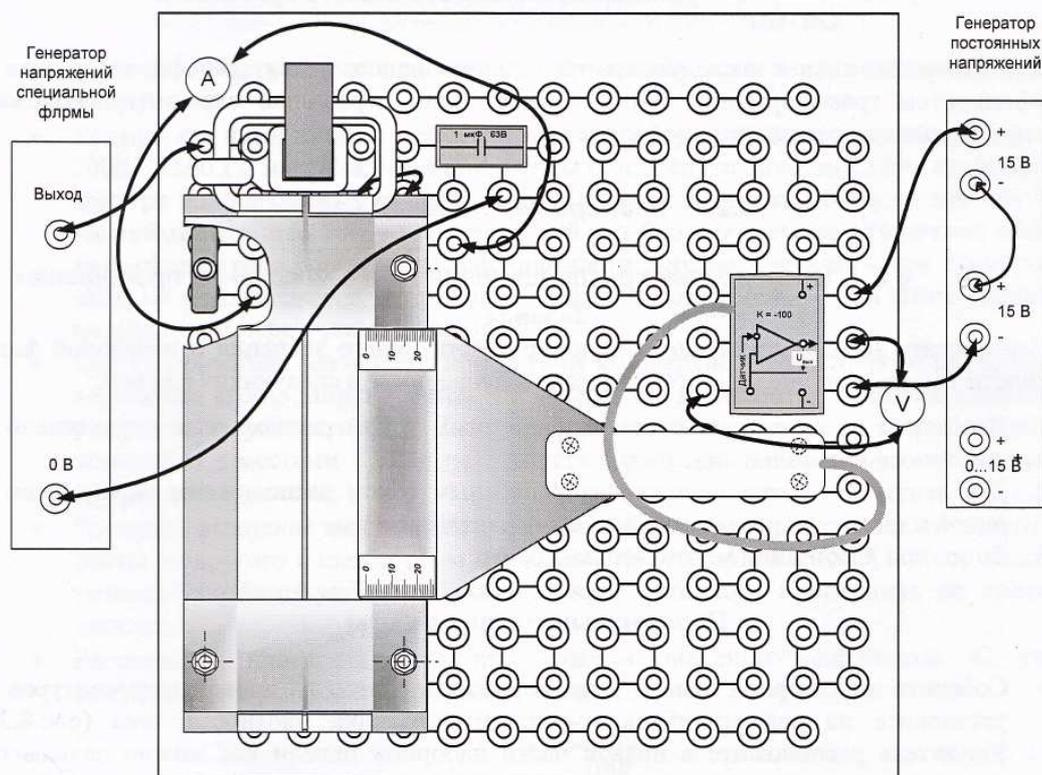


Рис. 28.3

Для сборки схемы рис. 28.3 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 на наборной панели, 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 токов в исследуемых проводниках. После этого нужно вставить в катушку вторую половину разъёмного сердечника и закрепить две половины сердечника резиновым кольцом.

Для измерения падения напряжения вдоль нити тока в проводящей ленте служит датчик напряжения, изображенный на рис. 28.3. Он представляет собой пластину из стеклотекстолита, в которую вмонтированы два миниатюрных контакта. Провода от контактов проходят вдоль нити тока в исследуемом проводнике до середины пластины, затем они поворачиваются 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, сцепленный с контуром измерительной цепи, оказывается близким к нулю и на вход усилителя подводится активная составляющая напряжения, пропорциональная плотности тока:

$$U = E \cdot l = \frac{\delta}{\gamma} \cdot I ,$$

где U – напряжение между контактами датчика;

E – тангенциальная составляющая напряженности электрического поля;

$l = 0,1$ м – расстояние между контактами датчика;

$\gamma = 55$ м/Ом·мм² – удельная проводимость медного проводника.

Для измерения тока в исследуемых проводниках используется трансформатор тока с коэффициентом трансформации 100. Он имеет один виток и расположен непосредственно на соединительной шине. Для проводников по схеме рис. 28.2, а и б используется цепь, приведенная на рис. 28.4, где конденсатор емкостью $C = 0,22 \dots 2,2$ мкФ подбирается для обеспечения тока в шинах близкого к 10..25 А (показание амперметра близко к 0,1..0,25 А). Для проводника по схеме рис. 28.2, в используется цепь, указанная на рис. 28.5.

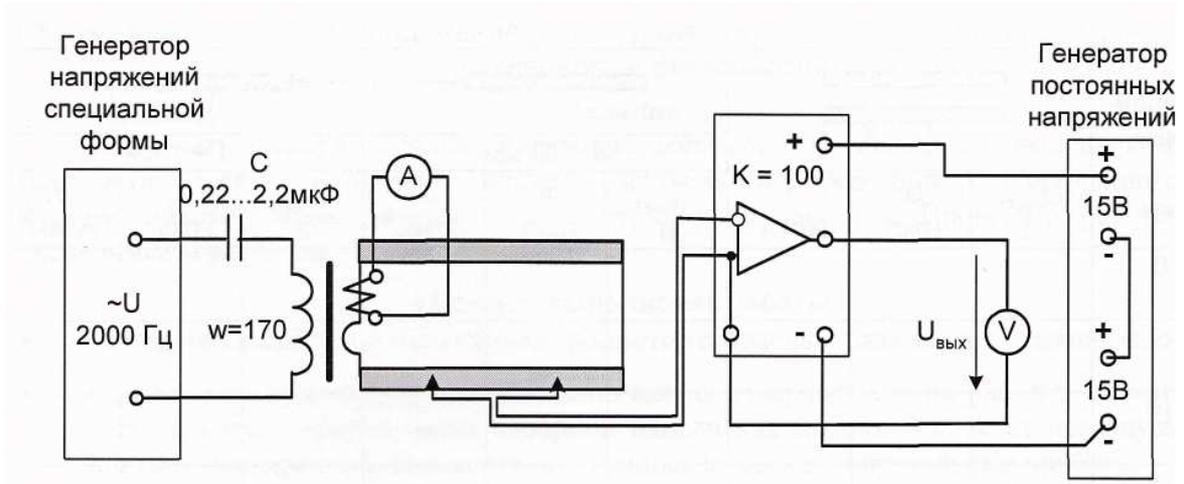


Рис. 28.4

Программа работы

1. Согласно варианту (табл. 28.1) собрать цепь по рис. 28.4 или рис. 28.5. При этом усилитель напряжения расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура (рис. 28.3). Установите необходимую частоту f источника синусоидального напряжения (табл. 28.1), регулятором амплитуды этого источника и подбором величины емкости C в цепи рис. 28.4 установите максимальное показание амперметра близкое к $0,1..0,25$ А, что соответствует току I в шинах близкому к $10..25$ А (следить за индикатором перегрузки источника синусоидального напряжения). Записать значения тока I и частоты f в табл. 28.2.

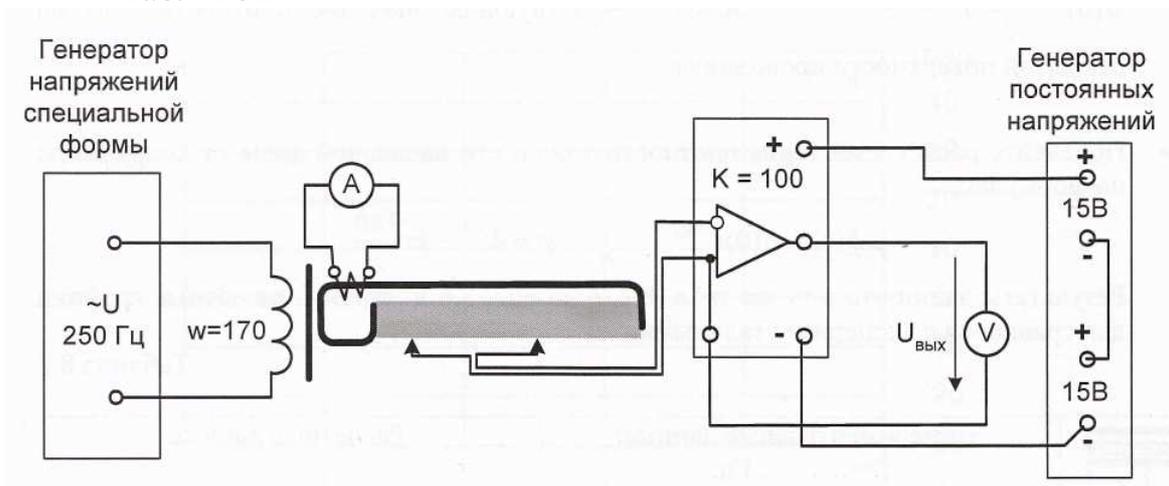


Рис. 28.5

Таблица 28.2

	$f = \dots\dots \text{Гц}$			$I = \dots\dots \text{А}$		
x, y, z мм	0	5	10	15	20	25
$U, \text{В}$						
$\delta, \text{А/мм}^2$						
	$\delta_{\text{CP}} = \dots\dots \text{А/мм}^2$			$I_{\text{P}} = \dots\dots \text{А}$		

- Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и перемещая его от одного края до другого с шагом 5 мм записать показания вольтметра U в табл. 28.2.
- Рассчитать и записать в табл. 28.2 для каждого значения координаты плотность тока, которая с учетом коэффициента усиления находится по формуле:

$$\delta = \frac{\gamma U}{100l} = 5,5 \cdot U, \text{ А/мм}^2.$$

- По результатам табл. 28.2 построить график зависимости плотности тока от изменяющейся координаты.
- Рассчитать среднее значение плотности тока δ_{CP} в А/мм^2 и определить расчетный ток в шинах: $I_{\text{P}} = 0,35 \cdot (10..25) \cdot \delta_{\text{CP}}$. Сравнить это значение с током I в табл. 28.2. Записать величины δ_{CP} и I_{P} в табл. 28.2.
- Сделать общие выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Том 3. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.
2. Гладкова Л.Ф., Гришкевич А.Е., Морозов С.И. Электричество и магнетизм. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 111 с.
3. Петров Ю.В., Соболевский А.С., Матюшина Л.И. Электромагнетизм. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – 73 с.
4. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. Справочное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высшая школа, 1985. – 263 с.
6. Теоретические основы электротехники. Том 2 / под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 383 с.
7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1966. – 268 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Амплитуда — максимальное значение смещения или изменения переменной величины при колебательном или волновом движении.

Бегущая волна — волновое возмущение, перемещающееся вдоль некоторого направления во времени t и некотором пространстве Z .

Взаимная индукция — явление, когда ЭДС индукции наводится в цепи вследствие изменения магнитного потока, создаваемого током в соседней цепи.

Волна — это явление распространения в пространстве с течением времени возмущения физической величины.

Волновое сопротивление — отношение амплитуды напряжения бегущей волны к амплитуде силы тока бегущей волны в линии, по которой распространяется электромагнитная волна, волновое сопротивление однозначно зависит от таких параметров линии, как емкость, индуктивность и сопротивление на единицу длины.

Волновое сопротивление среды — отношение амплитуд электрического и магнитного полей электромагнитных волн, распространяющихся в среде.

Гладкая функция — это функция, имеющая непрерывную производную на всем множестве определения.

Градиент (от лат. *gradiens*, род. падеж *gradientis* — шагающий) — характеристика, показывающая направление наискорейшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой.

Граничные условия — это условия, которым подчиняется поле на границе раздела сред с разными электромагнитными свойствами.

Дивергенция (от лат. *divergere* — обнаруживать расхождение) — дифференциальный оператор, преобразующий векторное поле в скалярное, который определяет (для каждой точки), «насколько расходятся входящее и исходящее из малой окрестности данной точки поле» (точнее — насколько расходятся входящий и исходящий поток).

Длина волны — расстояние между двумя ближайшими точками волны, находящимися в одинаковой фазе колебания.

Емкость — характеристика проводника, показывающая способность проводника накапливать электрический заряд.

Заземлитель — провод с металлическим проводником, зарытым в землю.

Закон полного тока – линейный интеграл напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура равен полному току (сумма токов проводимости, переноса и смещения), охватываемому этим контуром:

$$\oint_l \overline{H} dl = i_{\text{полн}} = \sum i_k .$$

Закон электромагнитной индукции – ЭДС, индуцируемая в контуре, равна скорости изменения пронизывающего контур магнитного потока, взятой с обратным знаком:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} .$$

Заряд (заряд тела) – скалярная величина, равная алгебраической сумме элементарных электрических зарядов электронов и протонов в этом теле.

Картина поля – совокупность силовых и эквипотенциальных линий.

Колебания — повторяющийся в той или иной степени во времени процесс изменения состояний системы. Например, при колебаниях маятника повторяются отклонения его в ту и другую сторону от вертикального положения; при колебаниях в электрическом колебательном контуре повторяются величина и направление тока, текущего через катушку.

Коэффициент отражения напряжения (от конца линии)– это отношение отраженной волны к прямой волне напряжения в конце линии.

Коэффициент отражения тока – отношение отраженной волны тока к прямой волне тока.

Лапласиан (оператор Лапласа) — дифференциальный оператор, действующий в линейном пространстве гладких функций и обозначаемый символом Δ . Оператор Лапласа часто записывается следующим образом ∇^2 , то есть скалярное произведение оператора набла на себя. Это также показывает, что оператор Лапласа эквивалентен последовательному взятию операций градиента и дивергенции:

$$\Delta = \nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \text{div grad} .$$

Линия равного потенциала (эквипотенциальная линия) – линия, перемещение по которой не связано с изменением потенциала.

Магнитная индукция — векторная величина, показывающая, с какой силой магнитное поле действует на движущийся заряд.

Магнитное поле — составляющая электромагнитного поля, появляющаяся при наличии изменяющегося во времени электрического поля. Кроме того, магнитное поле может создаваться током заряженных частиц, либо магнитными моментами электронов в атомах (постоянные магниты).

Магнитный поток — поток вектора магнитной индукции сквозь некоторую конечную поверхность S определяется как интеграл по поверхности:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS}.$$

Магнитная проницаемость — физическая величина, характеризующая связь между магнитной индукцией B и магнитным полем H в веществе. Обозначается μ .

Метрическая система — общее название международной десятичной системы единиц, основанной на использовании метра и грамма. На протяжении двух последних веков существовали различные варианты метрической системы, различающиеся выбором основных единиц. В настоящее время международное признание получила система СИ. При некоторых различиях в деталях, элементы системы одинаковы во всем мире. Метрические единицы широко используются по всему миру.

Намагниченность вещества — равна пределу отношения магнитного момента некоторого объема вещества к этому объему, когда последний стремится к нулю.

Напряженность электростатического поля — векторная характеристика поля равная отношению силы, действующей на пробный заряд q , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда.

Напряжённость магнитного поля — векторная величина, равная разности вектора магнитной индукции B и вектора намагниченности J .

Однородная линия — линия, параметры которой распределены равномерно вдоль цепи, в такой линии сечение проводов, их взаимное расположение и характеристики среды не изменяются по длине линии.

Оператор, действующий над пространствами функций — это правило, согласно которому одна функция преобразуется в другую.

Оператор набла (оператор Гамильтона) — векторный дифференциальный оператор, обозначаемый символом ∇ (набла). Под этим оператором

подразумевается вектор с компонентами $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$

в x, y, z — пространстве.

Относительная диэлектрическая проницаемость — показывает, во сколько раз абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества ϵ_a больше, чем электрическая постоянная ϵ_0 , характеризующая электрические свойства вакуума.

Плоскопараллельное поле — поле, картина которого повторяется во всех плоскостях, перпендикулярных какой-либо одной оси декартовой

системы координат, т.е. в плоскопараллельном поле картина поля не зависит от какой-либо одной координаты декартовой системы.

Плоскомеридианное поле – поле, картина которого повторяется во всех меридианных плоскостях, т.е. картина поля не зависит от координаты α цилиндрической или сферической системы координат. Примерами плоскомеридианного поля можно назвать поле, образованное внесением металлического шара в равномерное до внесения поле и поле диполя.

Плотность тока – векторная величина, направленная по напряженности электрического поля и имеющая смысл силы тока, протекающего через единицу площади.

Поляризация – упорядоченное изменение расположения связанных зарядов в теле, вызванное электрическим полем.

Потенциал – работа, совершаемая силами электрического поля для переноса единицы положительного заряда из рассматриваемой точки в точку, потенциал которой принят равным нулю.

Потенциал электростатического поля — скалярная характеристика поля, характеризующая потенциальную энергию поля, которой обладает единичный заряд, помещённый в данную точку поля.

Потенциальное (или безвихревое) векторное поле – это векторное поле, которое можно представить как градиент некоторой скалярной функции координат (потенциала). Необходимым и достаточным условием потенциальности векторного поля в трёхмерном пространстве является равенство нулю ротора поля.

Равномерное поле – поле, в котором напряженность одинакова во всех точках поля, т.е. величина ее не зависит от координат точки.

Размерность - показывает, как единица измерения физической величины выражается через единицы, которые приняты за основные.

Ротор – векторный оператор векторного поля, показывает насколько и в каком направлении закручено поле в каждой точке.

СГС (сантиметр-грамм-секунда) — система единиц измерения, которая широко использовалась до принятия международной системы единиц (СИ) и продолжает использоваться в физике и астрономии.

СИ (*SI*, фр. *Système International d'Unités*) — международная система единиц, современный вариант метрической системы.

Свободные заряды – заряды, которые под воздействием сил поля могут свободно перемещаться в веществе, их перемещение не ограничивается внутримолекулярными силами.

Связанные заряды – электрические заряды, входящие в состав вещества и удерживаемые в определенных положениях внутримолекулярными

силами. Такие заряды «связаны» с данным веществом, и не отделимы от него.

Сила Лоренца – сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле.

Силовая линия – это мысленно проведенная в поле линия, начинающаяся на положительно заряженном теле и оканчивающаяся на отрицательно заряженном теле. Проводится она таким образом, что касательная к ней в любой точке ее дает направление напряженности поля в этой точке.

Силовое поле – это векторное поле в трёхмерном пространстве, которое в каждой точке пространства сопоставляет вектор силы, действующей на пробную частицу.

Скорость (от англ. *velocity* или фр. *vitesse*) — векторная величина, характеризующая быстроту перемещения и направление движения материальной точки в пространстве относительно выбранной системы отсчёта.

Сопротивление – мера способности тел препятствовать прохождению через них электрического тока.

Сопротивление заземления – сопротивление, которое встречает ток, проходящий в землю через заземлитель.

Стоячая волна – колебания в распределенных колебательных системах с характерным расположением чередующихся максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) амплитуды. Практически такая волна возникает при отражениях от преград и неоднородностей в результате наложения отражённой волны на прямую. Стоячая волна является частным случаем бегущей волны с нулевой фазовой скоростью.

Удельная проводимость – свойство среды, характеризующее ее способность проводить электрический ток.

Фазовая скорость — скорость перемещения фазы волны в пространстве вдоль заданного направления.

Электродвижущая сила (ЭДС) – физическая величина, вызывающая перемещение зарядов по некоторому пути и численно равная линейному интегралу напряженности электрического поля вдоль этого пути.

Эквипотенциальная поверхность – совокупность точек электростатического поля, имеющих один и тот же потенциал.

Электродинамика - раздел физики, изучающий электромагнитное излучение, свойства электромагнитного поля и его взаимодействие с электрическими зарядами, связь электрических и магнитных явлений, электрический ток.

Электрический заряд - количественная характеристика, показывающая степень возможного участия тела в электромагнитных взаимодействиях.

Электромагнитная индукция — возникновение электродвижущей силы (ЭДС) в проводнике, находящемся в изменяющемся магнитном поле или благодаря движению проводника относительно неподвижного магнитного поля.

Электромагнитное излучение (электромагнитные волны) — распространяющееся в пространстве возмущение электрических и магнитных полей.

Электростатическое поле – поле, созданное неподвижными заряженными телами.

Энергия поля – равна работе внешних сил, затраченной на перенос зарядов из бесконечности (где $\varphi = 0$) в точки поля, в которых они будут находиться.

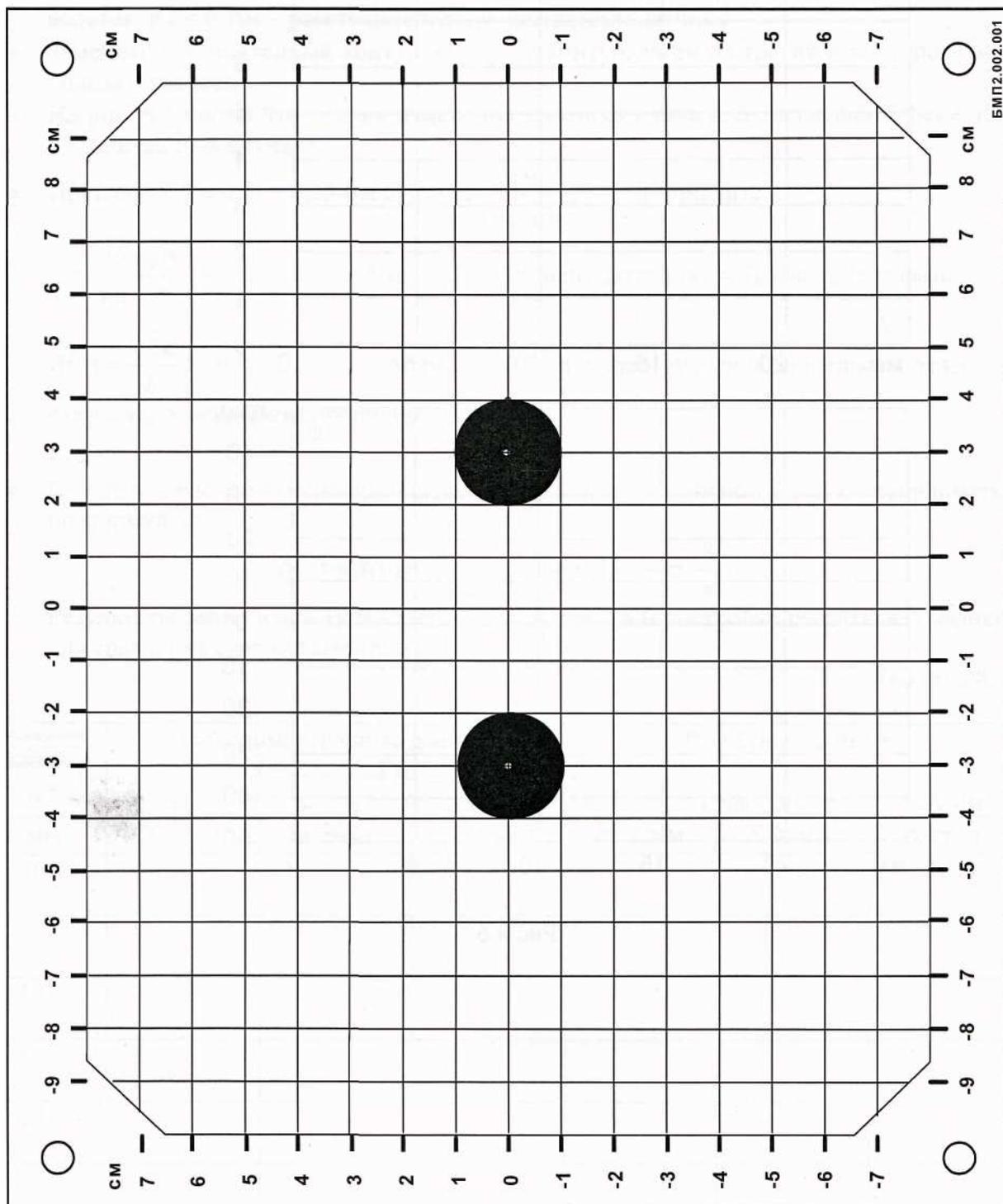
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ИХ РАЗМЕРНОСТИ

Магнитная индукция	<i>B</i>	Тл	Тесла
Электрическая индукция	<i>D</i>	Кл/м ²	Кулон на метр в квадрате
Напряженность электрического поля	<i>E</i>	В/м	Вольт на метр
Напряженность магнитного поля	<i>H</i>	А/м	Ампер на метр
Намагниченность	<i>J</i>	А/м	Ампер на метр
Волновое сопротивление	<i>Z_в</i>	Ом	Ом
Коэффициент фазы	β	рад/км	Радян на километр
Коэффициент ослабления/затухания	α	Нп/км	Непер на километр
Коэффициент распространения	γ	1/км	Единица на километр
Вектор Пойнтинга	<i>P</i>	Вт/м ²	Ватт на метр в квадрате
Объемная плотность заряда	ρ	Кл/м ³	Кулон на метр в кубе
Удельная электрическая проводимость	$\sigma = \gamma$	См/м	Сименс на метр
Линейная плотность заряда	τ	Кл/м	Кулон на метр
Потенциал скалярный магнитный	φ_m	А	Ампер
Магнитный поток	<i>Φ</i>	Вб	Вебер

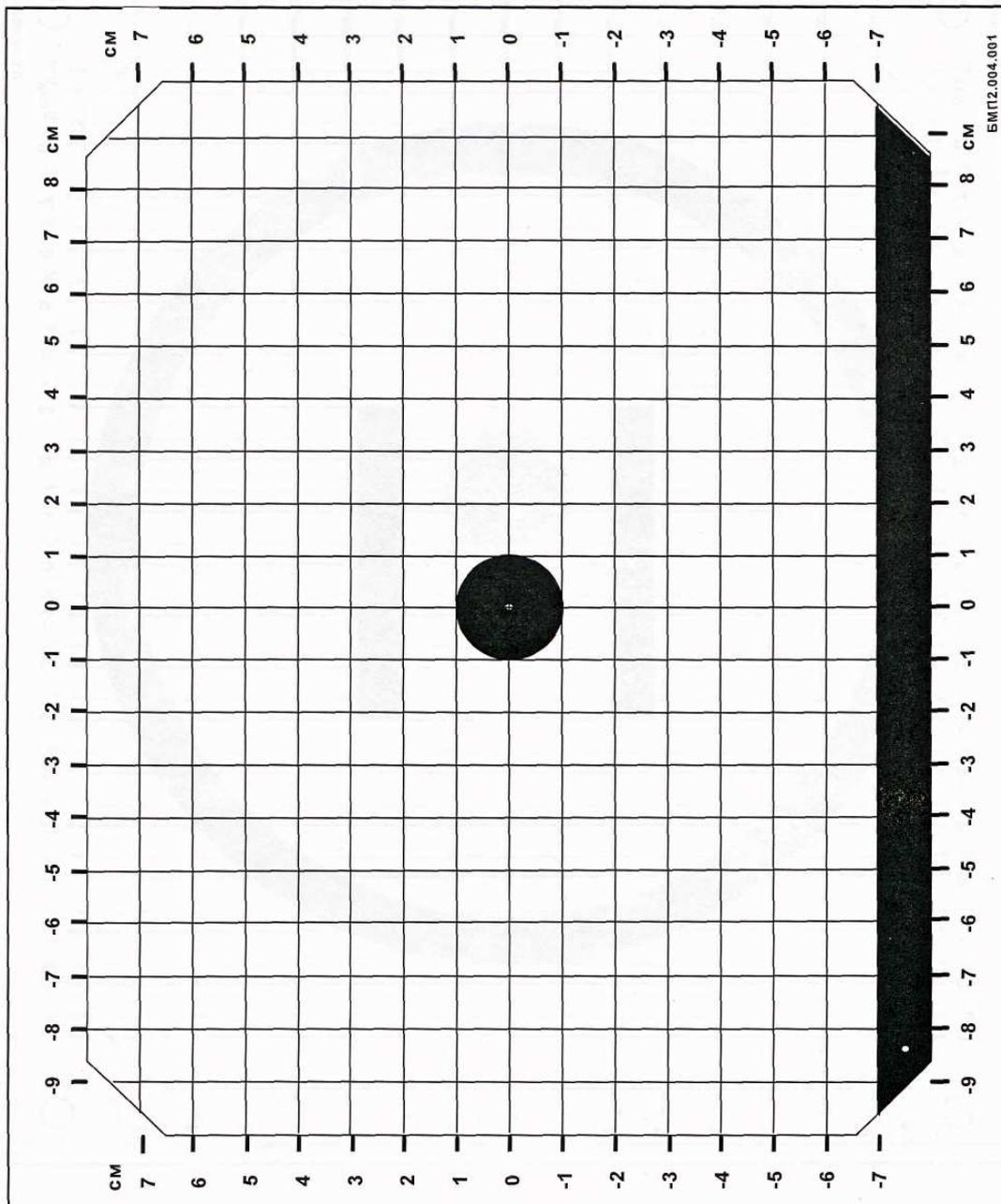
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85418781 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$1,25663706 \cdot 10^{-7}$	Гн/м
Скорость света	<i>c</i>	299 792 458	м/с

КООРДИНАТНЫЕ СЕТКИ ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТОВ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОЛЕЙ

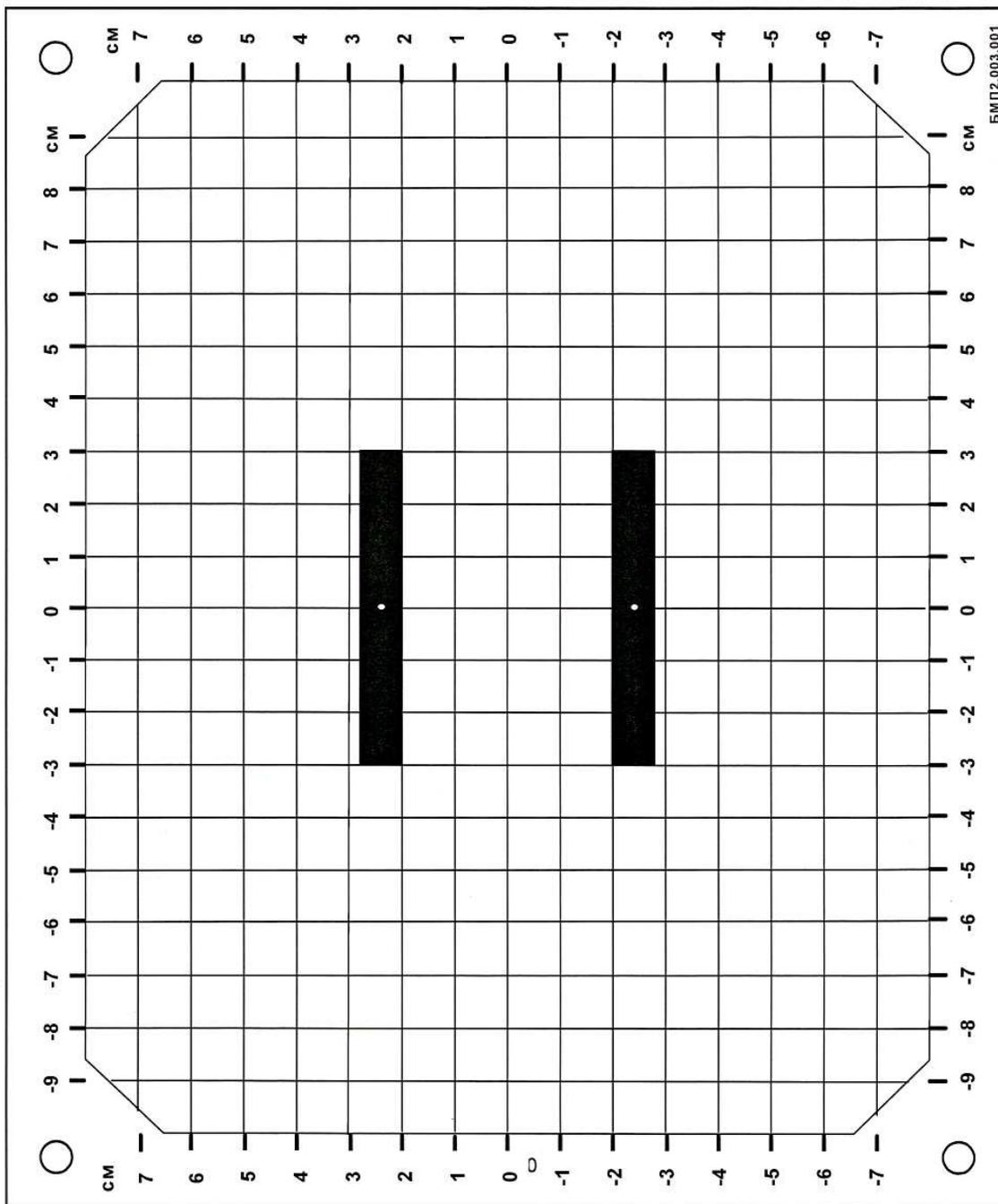
Планшет № 1



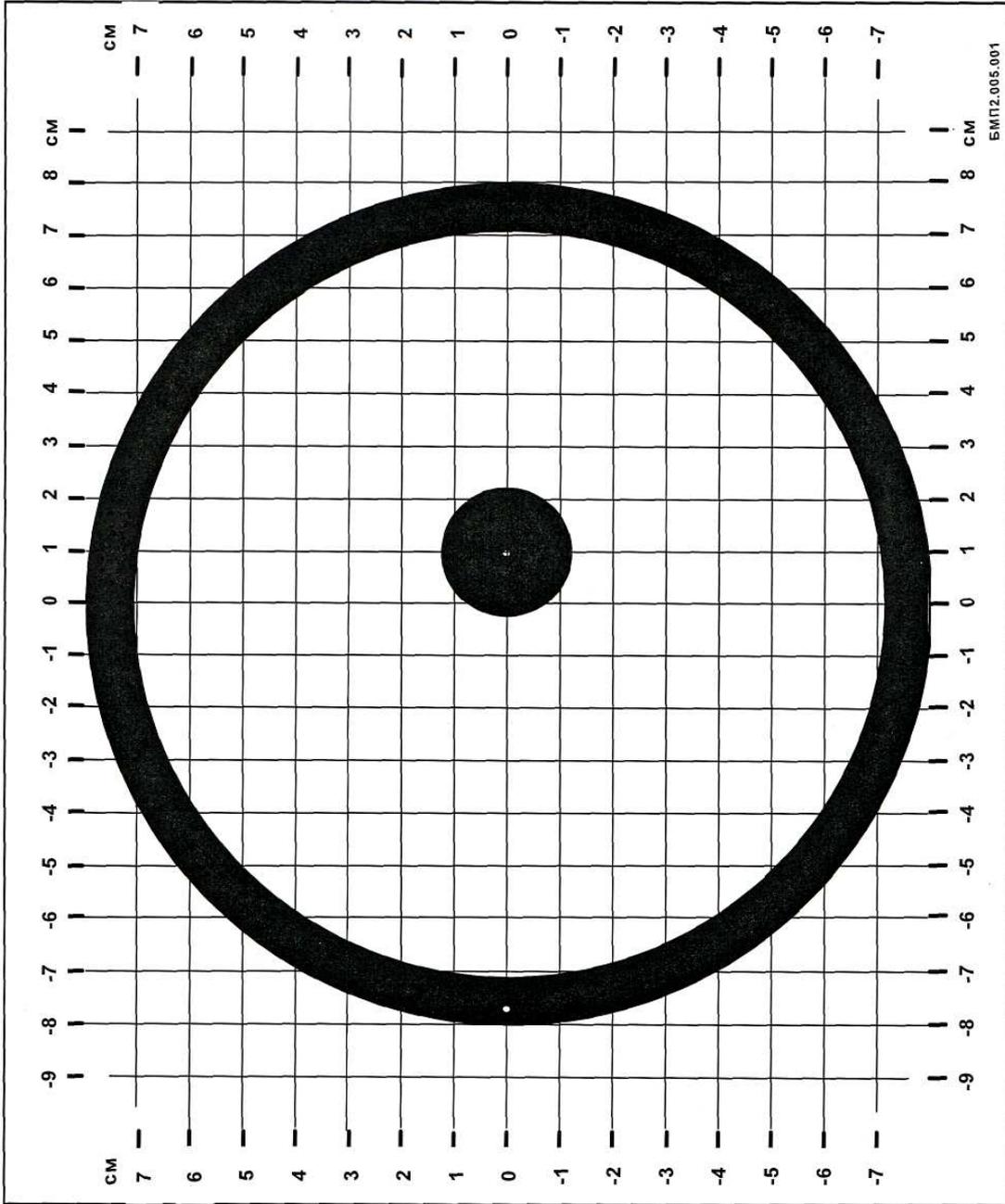
Планшет № 2



Планшет №3



Планшет № 4



Учебное издание

НОСОВ Геннадий Васильевич
КОЛЧАНОВА Вероника Андреевна
ЭСЬКОВ Владислав Дмитриевич
КАНЕВ Фёдор Юрьевич
КУЛЕШОВА Елена Олеговна

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники. Часть 3» для студентов 2 курса ЭНИН, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и для студентов 4 курса ИДО, обучающихся по специальностям 140211 «Электроснабжение», 140205 «Электроэнергетические системы и сети», 140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Научный редактор
кандидат технических наук,
доцент

Г.В. Носов

Подписано к печати . .2010. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать Херох. Усл. печ. л. 000. Уч.-изд. л. 000.

Заказ . Тираж 300 экз.

Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.