

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ТЕОРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
12.03.01 «Приборостроение»  
очной формы обучения*



Могилев 2021

УДК 530.2  
ББК 30.13  
ТЗЗ

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «17» мая 2021 г.,  
протокол № 8

Составители: ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко;  
ст. преподаватель Н. В. Герасименко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Даны описания лабораторных установок и методические рекомендации к  
выполнению лабораторных работ.

Учебно-методическое издание

## ТЕОРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторных работ по дисциплине «Теория физических полей» .....	5
2 Лабораторная работа № 2. Экспериментальное исследование и моделирование электростатических полей .....	6
3 Лабораторная работа № 3. Экспериментальное исследование и моделирование магнитостатических полей.....	9
4 Лабораторная работа № 4. Исследование электромагнитных полей .....	13
5 Лабораторная работа № 5. Исследование световых дифракционных полей .....	19
Список литературы .....	21

## Введение

Освоение ряда специальных дисциплин базируется на особенностях взаимодействия физических полей с веществом. Курс «Теория физических полей» позволяет заложить базовые знания студентам в области анализа физических полей, основанных на имеющихся достижениях акустики, радиационной физики, оптики, теплофизики, электроники, радиофизики, а также привить понимание основных явлений в этих областях науки.

Полученные в процессе изучения теории физических полей навыки позволяют анализировать физические поля различной физической природы с применением существующих теоретических методов; проводить анализ основных параметров полей экспериментальными методами, а также получить представление о физических основах приборов и методов контроля технологических процессов и окружающей среды.

## **1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторных работ по дисциплине «Теория физических полей»**

**Цель работы:** изучить технику безопасности при проведении лабораторных работ по дисциплине «Теория физических полей».

Работа в лаборатории, связанная с эксплуатацией оборудования, находящегося под напряжением, требует организации и строгого соблюдения требований безопасности. Вопросы безопасности отражаются в инструкциях по эксплуатации, которыми снабжено оборудование, а также содержатся в утвержденной кафедрой инструкции, копии которой имеются на рабочих местах и у преподавателя. С целью предотвратить возможность поражения электрическим током при работе с оборудованием необходимо выполнять следующие требования безопасности.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности с последующей проверкой знаний и регистрацией в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, задание на которую выдал преподаватель.

3 Приступая к лабораторной работе, студент обязан ознакомиться с методикой ее выполнения.

4 Сборка электрической схемы для лабораторной работы и ее изменение производится только при отключенном напряжении.

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения лабораторных работ (осциллографы, измерительные комплекты, трансформаторы, измерительные приборы), подключается к сети согласно требованиям инструкции по эксплуатации.

6 Включение собранной схемы выполняется только после проверки преподавателем или инженером лаборатории.

7 Включение питания оборудования производится одной рукой. Запрещено касаться металлических токоведущих частей соединительных проводов и кабелей осциллографа.

8 О любой неисправности лабораторного оборудования необходимо немедленно сообщить преподавателю или инженеру лаборатории.

*При выполнении лабораторных работ запрещается следующее.*

1 Без разрешения перемещать оборудование, выносить его из лаборатории.

2 Оставлять без присмотра включенные стенды и приборы.

3 Загромождать рабочие места посторонними предметами.

4 Находиться в лаборатории в верхней одежде. В зимнее время в учебном корпусе работает гардероб.

## 2 Лабораторная работа № 2. Экспериментальное исследование и моделирование электростатических полей

**Цель работы:** ознакомиться с аналитическим, численным и приближенными методами расчета электростатических полей, выработать навыки их экспериментального исследования и моделирования; научиться определять по графической картине электрического поля основные характеристики системы с помощью приближенных методов.

### 2.1 Описание лабораторной работы

Аналитический расчет электростатического поля может быть выполнен в ряде простейших случаев. Но даже в тех случаях, когда удастся получить аналитическое решение, конечные выражения часто оказываются слишком громоздкими и малоудобными для практического использования. Численные методы расчета, практически пригодные для получения графической картины в одной плоскости и, как правило, между электродами прямоугольной формы, не удовлетворяют требованиям исследователя, занимающегося моделированием электростатических полей, например полей электростатических фокусирующих систем, электронных пушек, модуляторов. Поэтому для решения практических задач широко используются методы экспериментального исследования электростатических полей. Наибольшее применение получил метод моделирования электростатических полей в электролитической ванне, основанный на аналогии, существующей между электростатическим полем в вакууме либо в однородном электроизоляционном материале в отсутствие свободных зарядов и полей токов в однородной проводящей жидкости.

Выделяют несколько условий реализации метода электролитической ванны. Во-первых, необходимо постоянство проводимости электролита. При работе с постоянным напряжением неизбежен процесс электролиза, приводящий к изменению концентрации ионов, а следовательно, и проводимости электролита. Поэтому в работе используют переменное напряжение, частоту которого выбирают в пределах 10...1000 Гц. Нижний предел частоты определяется подвижностью электронов в электролите. При слишком низкой частоте за полупериод ионы смогут заметно сместиться, что приведет к искажению распределения поля. При слишком высокой частоте заметно влияние емкостных токов, искажающих поле в ванне. В целях удобства обычно применяют напряжение промышленной частотой 50 Гц. Напряжение, подводимое к электродам, модели, погруженной в ванну, можно пропорционально уменьшить (или увеличить) по сравнению с потенциалами электродов моделируемой конструкции. Выбор невысоких рабочих напряжений 10...30 В продиктован соображениями техники безопасности и предотвращением перегрева электролита в локальных областях, приводящего к изменению проводимости.

Электроды изготавливают обычно из железа (технической стали), т. к. образующаяся на поверхности гидроокись железа вследствие высокой проводи-

мости не нарушает нормальной работы. Проводимость электродов на несколько порядков превышает проводимость водопроводной воды, ее можно использовать в качестве электролита.

Распределение потенциалов в электролите определяют с помощью зонда, погруженного в электролит и подключенного к достаточно чувствительному контрольно-измерительному прибору переменного тока.

Особенно удобно моделировать в ванне поля, имеющие плоскости симметрии. Так как по условиям симметрии ток, проходящий через плоскость симметрии, равен нулю, то достаточно изготовить модель лишь части системы, расположенную по одну сторону плоскости симметрии, и погрузить эту модель в ванну так, чтобы плоскость симметрии совпадала с поверхностью электролита. В этом случае поле токов в ванне остается неискаженным, т. к. недостающая часть модели электрически «отразится» в плоскости раздела «электролит – воздух». Такой метод обеспечивает точность примерно 1 %.

## 2.2 Описание лабораторной установки

В состав установки входит электролитическая ванна, источник переменного напряжения 15 В, вольтметр переменного тока АВО-63, набор образцов электродов и электрический зонд (рисунок 2.1).

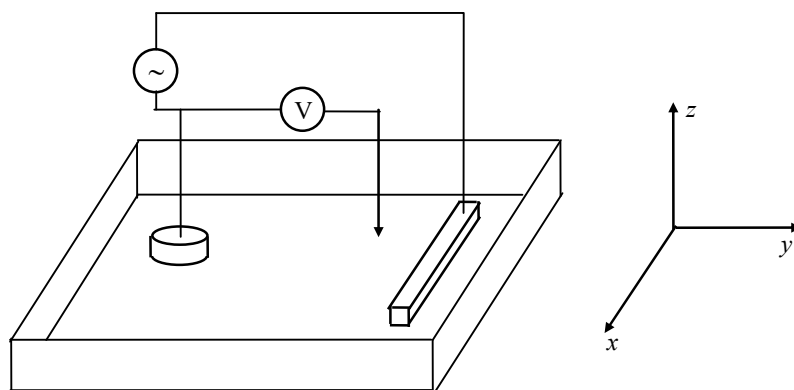


Рисунок 2.1 – Схема установки для моделирования электрических полей

Источник напряжения подключен к электродам системы, расположенным в ванне, наполненной водопроводной водой. Между подвижным электрическим зондом и одним из выводов источника питания включен вольтметр для измерения потенциалов поля системы.

## 2.3 Задание к лабораторной работе

- 1 Ознакомиться с теоретическими сведениями по электростатике, а также методами расчета и экспериментального исследования электростатических полей.
- 2 Ознакомиться с экспериментальной установкой.

3 По заданию преподавателя исследовать электрические поля в электролитической ванне.

4 Исследовать изменение конфигурации поля, если между электродами в ванне поместить проводящую, а затем диэлектрическую деталь.

5 По результатам измерений построить картину силовых линий исследуемого поля.

6 На основании полученных картин электрического поля произвести методом сеток приближенный расчет электрических характеристик системы (по заданию преподавателя).

7 Сравнить измеренную картину поля с рассчитанной методом итераций.

8 Составить отчет о выполненной работе и сделать выводы.

#### ***2.4 Методика выполнения лабораторной работы***

1 Методика расчета электростатического поля методом сеток изложена ранее. Приведем некоторые практические советы:

- зону расчета вычерчивают в таком масштабе, чтобы в минимальное межэлектродное пространство вписывалось не менее двух клеток и чтобы при дальнейшей детализации отдельных участков зоны была возможность четырехкратного уменьшения шага сетки, минимальный размер которого не должен быть менее 5 мм;

- потенциалы нулевого приближения записывают рядом с узлом в левом верхнем квадранте. Результаты первой итерации записывают в очередном по часовой стрелке квадранте и так далее до достижения заданной точности;

- эквипотенциальные линии вычерчивают по эквипотенциальным точкам, которые определяют между узлами путем интерполяции. Перпендикулярно эквипотенциальным линиям вычерчивают силовые линии.

2 Исследования электрического поля в электролитической ванне следует начинать с подготовки экспериментальной установки к работе, для чего:

- в удобном масштабе вычертить поле ванны с нанесением координатной сетки и электродов;

- убедиться в том, что установка включена в сеть;

- залить в ванну воду, расположить электроды и подключить их к источнику тока;

- перемещая зонд в поле, установить его в точку с каким-либо потенциалом, отметить на схеме эквипотенциальные точки, а затем найти эквипотенциальную линию с другим значением потенциала;

- вычертить линии напряженности.

3 Для приближенного расчета электрических характеристик системы нужно, чтобы на графической картине электрического поля клетки, образованные от пересечения силовых и эквипотенциальных линий, были квадратными (близкими к квадратным). Для этого на имеющую (полученную в результате расчета или экспериментального исследования) картину поля наносят (желательно другим цветом) силовые и эквипотенциальные линии поля, образующие в пересечении квадраты.



## **2.5 Содержание отчета**

- 1 Картина поля в масштабе, полученная в результате расчета методом сеток.
- 2 Картины полей, полученные в результате экспериментальных исследований.
- 3 Приближенный расчет электрических характеристик системы с картиной поля для приближенных расчетов.
- 4 Выводы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 По каким признакам обнаруживается электрическое поле?
- 2 Какими физическими величинами описывается электростатическое поле?
- 3 Сформулируйте граничные условия электростатического поля на границе раздела диэлектрика и проводника.
- 4 Сформулируете граничные условия электростатического поля на границе «диэлектрик – диэлектрик» и объясните их содержание.
- 5 Запишите уравнения Максвелла для электростатического поля и объясните их физический смысл.

## **3 Лабораторная работа № 3. Экспериментальное исследование и моделирование магнитостатических полей**

**Цель работы:** ознакомиться с методами расчета магнитостатических полей; выработать навыки их экспериментального исследования и моделирования; научиться определять по графической картине магнитного поля основные магнитные характеристики системы с помощью приближенных методов; получить представление о методе зеркальных изображений и способах расчета полей на его основе.

### **3.1 Описание лабораторной работы**

Аналитический расчет магнитного поля может быть выполнен в ряде простейших случаев. Но даже в тех случаях, когда удастся получить аналитическое решение, конечные выражения часто оказываются слишком громоздкими и малоудобными для практического использования.

Численные методы расчета, практически пригодные для получения графической картины поля в одной плоскости и при этом в замкнутой области, не удовлетворяют требованиям исследователя, занимающегося моделированием магнитных полей. Поэтому для решения практических задач широко изучаются методы экспериментального исследования магнитных полей, которые сводятся, в основном, к методам измерения магнитной индукции.

К основным методам измерения магнитной индукции относятся: баллистический метод; метод, основанный на эффекте Холла; метод ядерного магнитного резонанса; индукционный метод; метод, основанный на применении веществ, изменяющих свое сопротивление под действием магнитного поля (например, висмут).

В датчиках Холла главным элементом является полупроводниковый кристалл, через который пропускается постоянный электрический ток, как это видно из рисунка 3.1.

Данный рисунок поясняет физическую суть эффекта Холла. Через левую и правую грани полупроводникового кристалла в виде прямоугольного параллелепипеда от источника пропускается электрический ток  $I$ .

Считаем, что ток представляет собой движение электронов в направлении, указанном стрелками.

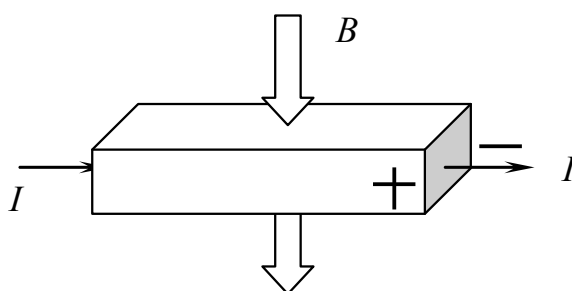


Рисунок 3.1 – Схема возникновения ЭДС Холла

Кристалл находится в магнитном поле, индукция которого направлена перпендикулярно верхней и нижней (наибольшим) граням, как это обозначено фигурными стрелками. На электроны действует сила Лоренца, которая отклоняет их в направлении к задней грани кристалла, в результате чего эта грань имеет избыточный отрицательный электрический заряд, а передняя грань кристалла, соответственно, заряжается положительным зарядом. То есть между передней и задней гранями полупроводникового кристалла возникает ЭДС Холла.

Аналогичное направление ЭДС Холла будет создавать также и дырочный ток внутри полупроводникового кристалла, т. е. ЭДС Холла будет удваиваться.

Так как величина ЭДС Холла зависит от направления регистрируемого магнитного поля по отношению к направлению распространения тока, то наибольшее значение этой ЭДС будет наблюдаться при взаимно перпендикулярных направлениях возбуждающего тока и магнитной индукции. Знак ЭДС Холла свидетельствует о направлении магнитной индукции.

### 3.2 Описание лабораторной установки

Установка содержит следующие элементы: источник постоянного тока Б 5-47 (Б 5-48); датчик Холла, наклеенный на стержень; два соленоида разного диаметра. Соленоид малого диаметра используется для калибровки датчика Холла, соленоид большого диаметра служит объектом контроля, он имеет

две независимые катушки, в каждой из которых содержится по 1500 витков провода. В состав установки входит также модель витка с током (плоская катушка, содержащая 900 витков провода), постоянные магниты и стенд, на который устанавливаются элементы экспериментальной установки. Для регистрации сигнала с выхода датчика Холла применяется мультиметр DT-9208A. Источник тока обеспечивает ток до 1 А. Ток зависит от сопротивления подключаемых катушек и устанавливается на декадном переключателе. При этом если светится индикатор «ток», то через нагрузку протекает ток, величина которого набрана на токовом декадном переключателе. Если же при некотором наборе цифр на токовом декадном переключателе светится индикатор «напряжение», то это указывает на то, что при установленном напряжении на выходе источника он не может обеспечить заданный ток, поэтому необходимо увеличивать напряжение источника или же уменьшать величину тока.

### ***3.3 Методика выполнения лабораторной работы***

Собрать экспериментальную установку. Для этого подключить источник питания Б5-47 к соленоиду для калибровки датчика Холла. Мультиметр установить на измерение напряжения постоянного тока до 200 мА. Установить датчик Холла, который приклеен на торец стержня, в центре соленоида для калибровки датчика Холла. Начиная с тока 50 мА, провести измерения ЭДС Холла для разных значений тока соленоида (до 300 мА). Ток устанавливается на декадном переключателе источника. При включенном индикаторе «ток» через нагрузку протекает ток, величина которого соответствует декадному переключателю. Измерения проводятся при нажатой кнопке источника питания датчика Холла, которая закреплена на его корпусе.

Рассчитать значение индукции магнитного поля внутри соленоида для разных значений тока соленоида  $I$  по формуле

$$B = \mu_0 n I = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 9333 \cdot I = 1,17 \cdot 10^{-2} I.$$

В этой формуле число  $n = 9333 \text{ м}^{-1}$  представляет число витков соленоида на единицу длины.

По результатам проведенных измерений построить график зависимости показаний мультиметра от индукции магнитного поля внутри соленоида. По этой зависимости определить постоянную датчика Холла в теслах на вольт.

Исследовать распределение индукции магнитного поля соленоида – объекта контроля вдоль его оси при отсутствии внутри соленоида ферромагнитного сердечника и при его присутствии и построить соответствующие графики. Вблизи соленоида сравнить измеренную индукцию с рассчитанной по формуле для соленоида. По полученным значениям определить значение эффективной магнитной проницаемости, обусловленное введением в соленоид стального стержня. Измерения проводить при токе 0,5 А.

Исследовать характер изменения магнитного поля в пространстве вокруг

соленоида в осевой плоскости при введении в него ферромагнитного сердечника. Измерения проводить при токе 0,5 А. Измерения проводить в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии 2 см. Одновременно в каждой точке отмечать направление вектора магнитной индукции по положению зонда. Максимальное значение сигнала датчика Холла будет при направлении вектора магнитной индукции вдоль стержня, на котором приклеен датчик Холла.

По результатам измерений построить топограмму вектора магнитной индукции в осевой плоскости соленоида – объекта контроля, для чего в каждой точке, где проводятся измерения индукции, располагать стержень параллельно оси соленоида, а затем перпендикулярно. Результирующее значение и направление вектора магнитной индукции будет определяться как гипотенуза соответствующего прямоугольного треугольника.

Построить распределение индукции магнитного поля (топограмму) вблизи плоской поверхности кольцевого магнита на расстояниях 1 и 5 см от поверхности.

Экспериментально построить зависимость индукции постоянного кольцевого магнита от расстояния вдоль оси.

Составить отчет о выполненной работе и сделать выводы.

### **3.4 Содержание отчета**

- 1 Схема экспериментальной установки.
- 2 График для калибровки датчика Холла.
- 3 Графики изменения магнитной индукции вдоль оси соленоида при наличии и отсутствии внутри соленоида ферромагнитного сердечника.
- 4 Распределение индукции магнитного поля в осевой плоскости соленоида.
- 5 Распределение индукции магнитного поля кольцевого постоянного магнита.
- 6 Результат измерения эффективной магнитной проницаемости при введении в соленоид стального сердечника.
- 7 Выводы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 По каким признакам обнаруживается магнитное поле?
- 2 Какими параметрами описываются магнитные поля?
- 3 Сформулируйте граничные условия для магнитного поля на границе раздела двух магнетиков и объясните их содержание.
- 4 Запишите уравнения, описывающие магнитостатические поля, и объясните их физический смысл.

## 4 Лабораторная работа № 4. Исследование электромагнитных полей

**Цель работы:** ознакомиться с аналитическими методами расчета электромагнитных нестационарных полей; приобрести навыки их экспериментальных исследований.

### 4.1 Описание лабораторной работы

В данной работе исследуется интерференция радиоволн СВЧ-диапазона, а также диаграмма направленности рупорной антенны. Интерференция наступает тогда, когда когерентные волны перекрываются в пространстве. Условия для интерференции возникнут, если на пути прямой волны создать границу раздела двух сред, в частности экран из электропроводного материала. В этом случае появляется отраженная (обратная) волна. Параметры прямой и обратной волн определяются на основании начальных и граничных условий. Для электрического поля одно из граничных условий

$$E_1 \tau = E_2 \tau$$

следует понимать как равенство в любой момент времени при  $z = 0$  тангенциальных (в данном случае  $X$ ) составляющих электрического поля в первой (в вакууме) и второй (электропроводящем экране) средах, т. е.

$$E_{1x}(0,t) = E_{2x}(0,t).$$

Так как во второй среде напряженность электрического поля равна нулю, то  $E_{2x}(0,t) = 0$  и тогда  $E_{0x} = -E'_{0x}$ , т. е. на поверхности экрана напряженности электрического поля падающей и отраженной волны равны по величине и противоположны по знаку. В этом случае говорят о потере волны при отражении (рисунок 4.1).

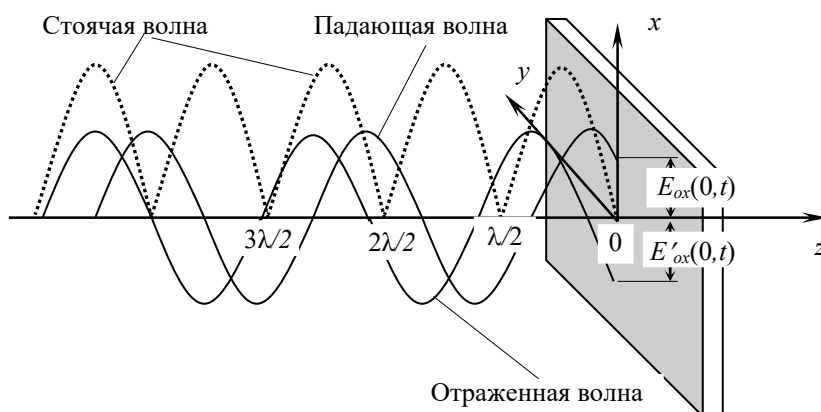


Рисунок 4.1 – Картина волнового электрического поля перед электропроводящим экраном

Тогда пространственно-временное распределение напряженности электрического поля перед отражающим экраном может быть представлено в виде стоячей волны:

$$E_{1x}(-z, t) = E_{0x} [\sin(\omega t + kz) - \sin(\omega t - kz)] = 2 E_0 \cos \omega t \cdot \sin kz .$$

Узлы напряженности электрического поля определяются из условия

$$\sin kz = 0 \quad \text{или} \quad kz = n \pi$$

и появляются в точках, отстоящих от экрана на расстоянии

$$z = n \pi / k = \lambda n / 2; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{ т. е. кратном } \lambda / 2.$$

Если волна падает на отражающий экран под углом  $\alpha$  (рисунок 4.2), то расположение узлов вдоль нормали к экрану определится из условия

$$\sin(\vec{k}\vec{z}) = 0 \quad \text{или} \quad kz \cos \alpha = n \pi .$$

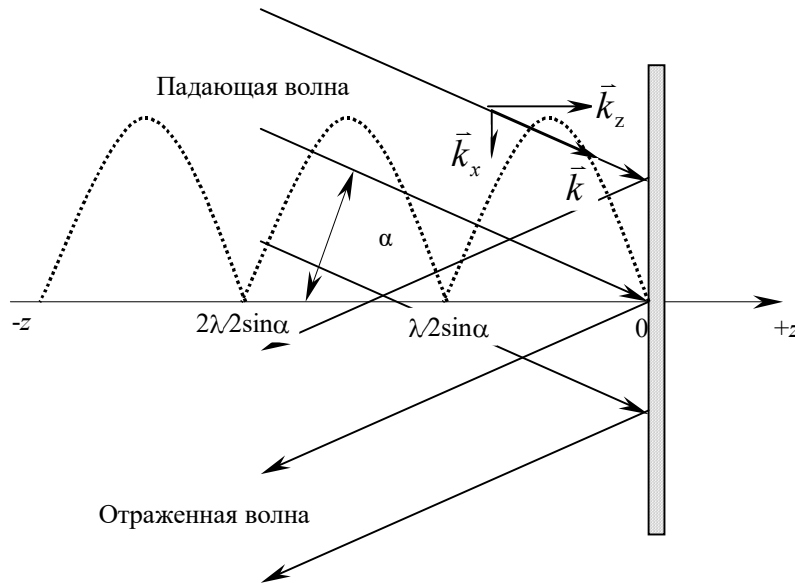


Рисунок 4.2 – Распределение узлов стоячей волны при косом падении пучка электромагнитного излучения

Тогда расстояние между узлами вдоль оси  $Z$  определяется выражением

$$z = \frac{n\pi}{k \cos \alpha} = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} .$$

Под диаграммой направленности излучателя принято считать изменение среднего за период значения потока энергии электромагнитной волны в измеряемой точке  $M(\vec{r})$  в зависимости от угла поворота излучателя в определенной

плоскости. Графически диаграмму направленности  $R(\theta)$  изображают в полярных или декартовых координатах и в относительных единицах (рисунок 4.3).

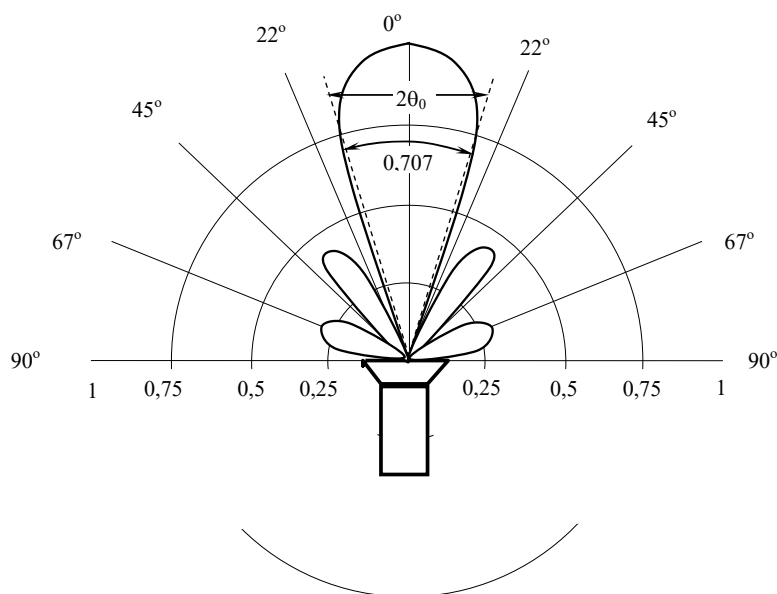


Рисунок 4.3 – Диаграмма направленности рупорной СВЧ-антенны

В горизонтальной плоскости  $XOY$  (при  $\theta_y = 0$ )

$$P_x(\theta_x) = \frac{I(\theta_x)}{I_{\max}} = \left( \frac{E(\theta_x)}{E_{\max}} \right)^2 = R_x^2(\theta_x).$$

В вертикальной плоскости  $ZOY$  (при  $\theta_x = 0$ )

$$P_y(\theta_y) = \frac{I(\theta_y)}{I_{\max}} = \left( \frac{E(\theta_y)}{E_{\max}} \right)^2 = R_y^2(\theta_y),$$

где  $R_x(\theta_x)$ ,  $R_y(\theta_y)$  – диаграмма направленности «по полю» соответственно в плоскости  $ZOX$  и  $ZOY$ .

Форма диаграммы направленности зависит от устройства излучателя. Для рупорного излучателя напряженность поля в точке  $M$  определится по формуле

$$E(M) = E(r, \theta_x, \theta_y) = \frac{B}{r} \frac{\sin\left(\frac{kD_x \sin \theta_x}{2}\right)}{\frac{kD_x \sin \theta_x}{2}} \frac{\sin\left(\frac{kD_y \sin \theta_y}{2}\right)}{\frac{kD_y \sin \theta_y}{2}},$$

где  $r$  – расстояние от излучателя до точки  $M$ ;

$\theta_x$ ,  $\theta_y$  – направляющие углы радиус-вектора точки  $M(\vec{r})$  соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскости;

$B$  – величина, пропорциональная амплитуде волны в плоскости излучателя;  
 $D_x, D_y$  – размеры, ограничивающие отверстие излучателя (рисунок 4.4).

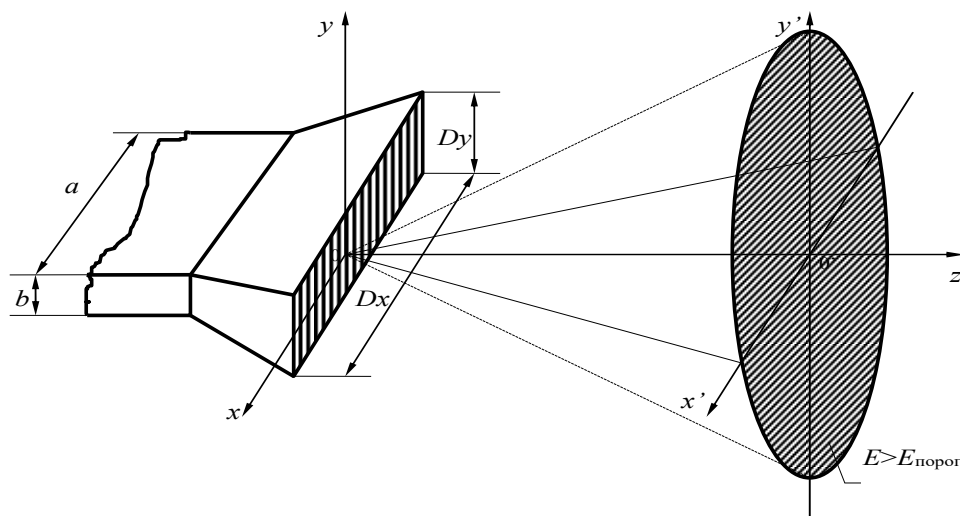


Рисунок 4.4 – Рупорный излучатель

Тогда горизонтальная диаграмма направленности «по полю» определится как

$$R_x(\theta_x) = \frac{E(r, \theta_x, \theta_y)}{E(r, \theta_x = 0, \theta_y = 0)}.$$

Аналогичным образом можно рассчитать вертикальную диаграмму направленности «по полю».

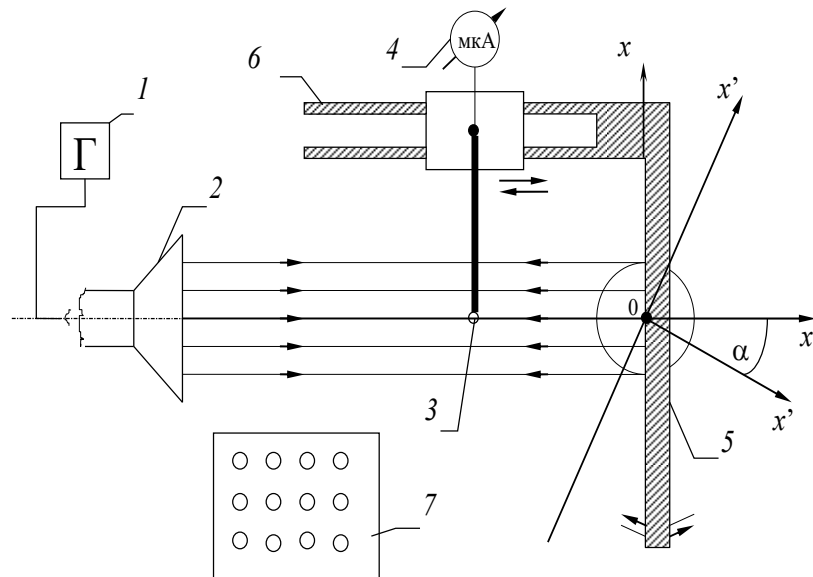
Остроту диаграммы направленности определяют по углу раствора  $2\theta_0$  по уровню  $-3$  дБ (т. е. по уровню  $0,707$  диаграммы направленности «по полю» или по уровню  $0,5$  диаграммы направленности по интенсивности). Раствор диаграммы направленности  $2\theta_0$  можно приближенно рассчитать по формулам соответственно для горизонтальной и вертикальной плоскости (в градусах)

$$2\theta_{0x} = \frac{51\lambda}{D_x} \quad \text{и} \quad 2\theta_{0y} = \frac{51\lambda}{D_y}.$$

## 4.2 Описание лабораторной установки

В состав экспериментальной установки (рисунок 4.5) входит СВЧ-генератор  $1$  с рупорным излучателем  $2$ , закрепленным на столике, который можно устанавливать на столе, зонд  $3$ , в качестве которого использован СВЧ-диод, индикатор напряжения  $4$  и отражающий экран  $5$ , однокоординатный сканер  $6$  и металлический экран с отверстиями  $7$  для реализации щелевой антенны. Сам излучатель имеет возможность поворачиваться относительно горизонтальной оси на угол  $90^\circ$ . Углы для определения диаграммы направленности определяются по лимбу, нарисованному на листе ватмана.





1 – СВЧ-генератор с источником питания; 2 – рупорная антенна; 3 – СВЧ-зонд; 4 – индикатор; 5 – металлический экран; 6 – однокоординатный сканер; 7 – металлический экран с отверстиями

Рисунок 4.5 – Схема экспериментальной установки

В работе в качестве генератора СВЧ-волн используется прибор для изучения свойств радиоволн ПСР-76. Он состоит из передатчика на основе отражательного клистрона К-19, возбуждающего электромагнитные волны сантиметрового диапазона длин волн в резонаторе, образованном отрезком металлического волновода прямоугольного сечения размером  $23 \times 10$  мм. Длина резонатора определяется короткозамыкающим плунжером. Волновое сопротивление волновода и открытого пространства неодинаковое, поэтому для их согласования и получения направленного излучения служит рупорная антенна.

В приборе имеется также модулятор для модуляции генерируемого излучения. Он собран на двойном триоде с частотной модуляцией на управляющую сетку изменением смещения. Для возможности регулировки частоты модуляции сигнала передатчика ручка потенциометра выведена за пределы перфорированного корпуса, закрывающего передатчик.

Длина волны, излучаемая генератором СВЧ, составляет  $3,15 \dots 3,29$  см.

Приемник представляет собой СВЧ-зонд, изготовленный на СВЧ-диоде Д405АП. Он устанавливается на рейтере с возможностью плавного перемещения и поворота на угол  $90^\circ$ . Другой СВЧ-зонд закреплен на однокоординатном сканере. К диоду подведен экранированный кабель, свободный конец которого необходимо подключать к индикатору.

Питание передатчика осуществляется от выпрямителя ВУП-2.

Рупорный излучатель обеспечивает концентрацию энергии в осевом направлении.

### 4.3 Задание к лабораторной работе

- 1 Ознакомиться с теоретическими положениями по выполняемой работе.
- 2 Ознакомиться с экспериментальной установкой для исследования нестационарного электромагнитного поля и работой СВЧ-генератора.
- 3 Снять волновую картину поля перед отражающим экраном при углах падения  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .
- 4 Убедиться в том, что электромагнитные волны поперечны. Определить плоскость поляризации.
- 5 Рассчитать и измерить диаграмму направленности рупорного излучателя. Измеренные значения точек нанести на расчетный график. Обосновать расхождение графиков. Определить угол раствора диаграммы направленности.
- 6 Измерить диаграмму направленности щелевой антенны.
- 7 Сделать выводы по работе.

### 4.4 Методика выполнения лабораторной работы

Включить и настроить СВЧ-генератор. Установить расстояние между излучателем и экраном примерно 300...400 мм. Поместить зонд вблизи от экрана так, чтобы индикатор показал максимальное значение выпрямленного тока. Перемещая зонд вдоль оси излучателя, измерить распределение напряженности электрического поля в функции координаты  $Z$ . При этом удобнее фиксировать координаты узлов напряженности (не менее нескольких минимумов). Измерить таким образом картину поля при углах падения  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .

По измерениям распределения поля при нормальном падении электромагнитной волны на экран определить длину генерируемой СВЧ-волны, значение которой использовать при дальнейших расчетах.

Для экспериментального подтверждения того, что волна поперечна, следует поместить антенну-зонд вдоль оси излучения. Если волна действительно поперечна, то индикатор не покажет наличия ЭДС. Это значит, что вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен оси  $Z$ .

Из перпендикулярности вектора  $\vec{E}$  оси  $Z$  совсем не следует, что волна поляризована. Для подтверждения наличия поляризации волны необходимо поместить антенну-зонд в пучность  $\vec{E}$ . Теперь при повороте излучателя или приемника вокруг горизонтальной оси будут четко наблюдаться максимумы показания индикатора через угол  $90^\circ$ .

Следует заметить, что антенна-зонд, представляющая собой полуволновой диполь, воспринимает электромагнитное поле, поляризованное в плоскости самого диполя, т. е. когда вектор  $\vec{E}$  совпадает с осью СВЧ-зонда. Иначе говоря, антенна-зонд воспринимает составляющую напряженности электрического поля электромагнитной волны, направленную вдоль оси диода.

Для измерения диаграммы направленности излучателя в горизонтальной плоскости поставить излучатель и зонд на одной прямой так, чтобы антенна-зонд находилась в некоторой точке на оси излучателя на расстоянии примерно 300 мм. Устанавливая излучатель при различных углах в горизонтальной плос-

кости, измерить напряженность поля в зависимости от угла направления волны в пределах от  $0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$ .

При построении диаграммы направленности использовать лист с нарисованной на нем угловой сеткой.

#### **4.5 Содержание отчета**

1 Теоретический расчет и экспериментальные графики картины волнового поля перед отражающим экраном при нормальном и наклонном падении луча.

2 Расчет длины волны и погрешность ее измерения по интерференционной картине.

3 Теоретические и экспериментальные диаграммы направленности излучателя в полярных (или декартовых) координатах, угол раствора диаграммы.

4 Выводы, результаты опытов по установлению поперечности волны и ее поляризации, сопоставление результатов эксперимента и теоретического расчета.

#### **Контрольные вопросы**

1 Запишите систему уравнений Максвелла для нестационарного электромагнитного поля.

2 Как показать на опыте, что излучаемая волна монохроматична?

3 Как показать на опыте, что излучаемая волна поперечна и поляризована?

4 Как экспериментально показать, что на границе «воздух – металл» происходит отражение волны электрического поля с потерей фазы на  $\pi$ ?

5 Почему при расположении антенны-зонда вдоль оси излучения индикатор дает нулевое показание?

6 Напишите граничные условия для электрического и магнитного полей.

7 Где расположены узлы и пучности электрического и магнитного полей перед отражающим металлическим экраном?

## **5 Лабораторная работа № 5. Исследование световых дифракционных полей**

**Цель работы:** изучить основные закономерности дифракции света; научиться определять размеры щели, проволок и круглых отверстий на основе анализа дифракционных картин.

### **5.1 Описание лабораторной работы**

Если свет падает перпендикулярно на отверстие в виде прямоугольника размером  $a \times b$ , то наблюдается картина дифракции, образуемая наложением двух параллельных дифракционных картин, одна из которых получена дифрак-

цией на щели шириной  $a$ , а другая – шириной  $b$ . Минимумы в дифракционной картине удовлетворяют соотношениям

$$b \sin \theta = m \cdot \lambda; a \sin \gamma = m \cdot \lambda, \quad (5.1)$$

где  $\theta, \gamma$  – углы, отсчитываемые перпендикулярно сторонам отверстия  $b$  и  $a$  соответственно.

Несколько иной вид носит дифракция на круглом отверстии. В этом случае распределение интенсивности в дифракционной картине описывается формулой

$$I = I_0 \cdot \left( \frac{2 \cdot J_1 \cdot (k \cdot a \cdot \sin \theta)}{k \cdot a \cdot \sin \theta} \right)^2, \quad (5.2)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка.

Приближенно угловые радиусы темных колец определяются формулой

$$\sin \theta_m = \left( 0,61 + \frac{m-1}{2} \right) \cdot \frac{\lambda}{R}. \quad (5.3)$$

Таким образом, анализируя дифракционную картину, можно определить форму и размеры отверстия, учитывая формулы (5.1)–(5.3).

## **5.2 Описание лабораторной установки**

В состав установки входит полупроводниковый лазер, генерирующий красный свет, набор дифракционных препятствий, дифракционную решетку, линзу и экран. Набор дифракционных препятствий включает непрозрачные цилиндрические тела (проволоки различных диаметров), набор круглых отверстий различных диаметров, спектральную щель с изменяющейся шириной, прямоугольное отверстие.

## **5.3 Методика выполнения лабораторной работы**

1 По дифракционной картине на дифракционной решетке с известным периодом 100 штрихов на миллиметр определяют длину волны лазерного излучения. Для этого устанавливают на пути лазерного луча дифракционную решетку и на выбранном удобном для наблюдения расстоянии на экране наблюдают дифракционную картину. Путем расчетов определяют угол дифракции при направлении на максимумы разных порядков, а затем по формуле (5.1) рассчитывают длину волны лазера, которую используют в дальнейших измерениях.

2 Наблюдают дифракцию на щели различной ширины. Для этого на пути лазерного излучения устанавливают спектральную щель и на экране наблюдают дифракционную картину для размера щели 0,1; 0,2 и 0,3 мм. По полученным

картинам дифракции рассчитывают дифракционные углы при направлении на минимум дифракционной картины, а затем ширину щели по формуле (5.1) и сравнивают ее с установленной шириной щели.

3 На пути лазерного излучения устанавливают проволоки различного диаметра и, зная расстояние от препятствия до экрана, определяют углы дифракции при направлении на минимум, а затем по формуле (5.1) определяют диаметр проволоки. Измерения производят 3–5 раз и результаты заносят в таблицу.

4 По результатам обработки картины дифракции по соответствующей формуле (5.3) определяют диаметры отверстий. Результаты заносят в таблицу.

5 Исследуют особенности дифракции Фраунгофера лазерного излучения на прямоугольном отверстии. Зарисовывают схематически наблюдаемую картину, объясняют ее и по результатам обработки дифракционной картины находят размеры отверстия.

6 На пути лазерного луча ставят линзу и сравнивают наблюдаемую дифракционную картину с аналогичной картиной при отсутствии линзы для дифракционной решетки и выбранной ширине щели.

#### **5.4 Содержание отчета**

- 1 Схема экспериментальной установки.
- 2 Результаты определения размеров различных дифракционных препятствий.
- 3 Выводы.

#### **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое дифракция?
- 2 В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
- 3 Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера?

### **Список литературы**

- 1 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., стер. – Москва: Академия, 2016. – 272 с.
- 2 **Лесин, В. В.** Уравнения математической физики: учебник / В. В. Лесин. – Москва: КУРС; ИНФРА-М, 2020. – 240 с.
- 3 Ультразвуковой контроль: учебное пособие для вузов / Н. П. Алешин [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – Москва: Спектр, 2011. – 288 с.
- 4 Лазеры в общем физическом практикуме / Под ред. А. Н. Матвеева. – Москва: МГУ, 1981. – 112 с.