[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)

[Основы электромагнитного поля](https://www.studocu.com/ru/document/spbgetu-leti/toe/osnovy-elektromagnitnogo-polya/54734984?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)

[тоэ (СПбГЭТУ ЛЭТИ)](https://www.studocu.com/ru/course/spbgetu-leti/toe/4883552?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)



Escanea para abrir en Studocu

Studocu no está patrocinado ni avalado por ningún colegio o universidad.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

В. В. ФЕДОРОВ М. С. ПОРТНОЙ

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Лабораторный практикум по теоретической электротехнике

Санкт-Петербург Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)2012

УДК 537.86 (075) ББК В 336я7

Ф 33

## Федоров В. В, Портной М. С.

Ф 33 Основы электромагнитного поля: Лабораторный практикум по теорети- ческой электротехнике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 53 с.

ISBN 978-5-7629-1194-8

Содержит описание комплекса лабораторных работ по второй части курса теоретических основ электротехники ТОЭ, теории электромагнитного поля, по темам: теоретические основы электродинамики, потенциальные по- ля и методы их расчета, переменные электромагнитные поля, их распростра- нение, излучение и экранирование.

Посвящен студентам технических специальностей для использования при работе в лаборатории электромагнитного поля кафедры ТОЭ, а также может быть полезен инженерно-техническим работникам, специалистам по электронике, радиотехнике, электрическим машинам.

УДК 537.86 (075) ББК В 336я7

Рецензенты: кафедра электротехники и технической диагностики СПбГУАП; д-р техн. наук, проф. C. А. Башарин (СПбГУКиТ).

Утверждено

редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7629-1194-8 © СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012

## Предисловие

Настоящее издание кафедры ТОЭ предназначено для студентов Санкт- Петербургского государственного электротехнического университета

«ЛЭТИ» и включает девять лабораторных работ по основным разделам тео- рии электромагнитного поля. Лабораторный практикум по ТОЭ « Теория электромагнитного поля» разработан на основе учебных пособий [1], [2].

Лаборатория электромагнитного поля кафедры ТОЭ оснащена современ- ными приборами, позволяющими студентам и магистрам проводить измере- ние напряженности электрического и магнитного поля реальных физических моделей в широком диапазоне частот от 0.1 Гц до 10 ГГц.

Оборудование лаборатории электромагнитного поля кафедры ТОЭ может быть использовано для выполнений аналогичных исследований тепловых, гравитационных и других видов полей.

## Требования к оформлению отчетов

Отчет по лабораторной работе должен быть оформлен в формате A4. Ти- тульный лист должен содержать название факультета и кафедры, название и номер лабораторной работы, номер группы, ФИО студента и преподавателя.

В отчет должен быть включен протокол исследований, подписанный пре- подавателем, с указанием даты и фамилии студента.

При оформлении отчета необходимо указать цель работы; в каждом пунк- те исследований должна быть изображена выполненная по ГОСТу принци- пиальная схема установки, приведены таблицы наблюдений и полученных результатов, а также расчетные формулы с их теоретическим обоснованием. Там, где это необходимо, должны быть построены картины поля, по ним вы- полнен расчет параметров электромагнитного поля и исследуемого устрой- ства.

В конце отчета требуется сделать заключение с оценкой полученных ре- зультатов исследований и письменно ответить на все приведенные вопросы. Заключение должно содержать краткие выводы о соответствии эксперимен- тальных данных исследований с теоретическими расчетами.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)3

## Лабораторная работа 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

# МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЯ

***Цель работы:*** исследование полей двухпроводной линии и электронной линзы на моделях в электролитической ванне.

## Основные теоретические положения

В основе электромоделирования лежит математическая аналогия различ- ного рода физических полей и поля электрического тока в проводящей среде. В качестве примера рассмотрим электростатическое поле в однородном ди- электрике при отсутствии свободных зарядов (ρэл  0 **)** и поле постоянного тока в однородной проводящей среде.

Основные дифференциальные уравнения этих полей:

rot *E*эл  0 , div *D*эл  εэл div*E*'эл  0;

rot *E*эл  0 , div *J*эл  γэл div*E*эл  0 .

Электрические поля потенциальны, причем потенциалы *U* эл удовлетво-

ряют уравнению Лапласа 2 *U* эл  0 и граничным условиям:

*D*1*n*  *D*2*n*  σпов ; *E*1τ  *E*2τ.

При совпадении (подобии) граничных условий решения уравнения Лапласа для обеих сред совпадают (подобны), т. е. структуры полей, характеризуемые графическими картинами, одинаковы. Это позволяет исследовать электроста- тическое поле на его модели в проводящей среде, например, в электролитиче- ской ванне. Такой метод особенно плодотворен в тех случаях, когда краевые условия настолько сложны, что их нельзя сформулировать аналитически.

Электролитическая ванна представляет собой сосуд из изоляционного ма- териала, наполненной проводящей жидкостью (водой). Электроды установ- лены на дне ванны так, что их верхний край совпадает с уровнем воды. Элек-

4

троды ограничены сверху и снизу (воздух и дно ванны); их удельная прово- димость значительно меньше удельной проводимости воды, поэтому ток, стекающий с электродов, зеркально отображается в границах раздела с со- хранением знака и величины. Таким образом, поле отрезков электродов сов- падает с плоскопараллельным полем бесконечно длинных электродов. Для исследования аксиально-симметричных полей необходимо установить элек- троды так, чтобы ось симметрии находилась на поверхности воды. Размеры ванны должны быть достаточно большими, чтобы стенки не влияли на ис- следуемое поле. На электроды подается переменное напряжение низкой ча- стоты 50–100 Гц. Перемещая зонд в ванне, можно определить положение эк- випотенциальных линий. Перпендикулярно полученным эквипотенциальным линиям следует построить векторные линии электростатического поля так,

чтобы поток вектора напряженности электрического поля торных трубках был одинаков.

*E*эл

во всех век-

Метод электролитической ванны – один из способов графического реше-

ния уравнения Лапласа. Картина поля – совокупность эквипотенциальных и векторных линий напряженности электрического поля.

Метод моделирования полей, различных по физической природе, основан на аналогии их дифференциальных уравнений и заключается в эксперимен- тальном снятии картины электрического поля в проводящей среде, как наибо- лее легко воспроизводимого и измеряемого. Полученная картина поля позво- ляет найти значения напряженности электрического и магнитного поля в каж- дой точке, значения интегральных характеристик моделируемых устройств: емкости, индуктивности, электрического и магнитного сопротивления.

Для моделирования плоскопараллельных полей применяют проводящий лист, для моделирования любых полей, плоскопараллельных и трехмерных, – электролитическую ванну.

В электролитической ванне лаборатории поля при соответствующей за- мене электродов двухпроводной линии могут быть исследованы электромаг- нитные поля других направляющих систем, основной волной в которых яв- ляется поперечная электромагнитная волна типа «T»: симметричной и несимметричной полосковых линий, коаксиального кабеля, однопроводной линии. Графические картины потенциальных электрических и магнитных полей (рис. 1.1) строят по одним определённым правилам, соответствующим трём аналогичным дифференциальным уравнениям при построении:

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)5

* электростатического поля:

div *D*эл  ρэл , *E*эл  grad*U*эл , 2 *U*эл  0;

* электрического поля в проводящих средах:

div *J*эл  0,

* магнитного поля:

div *B*эл  0 ,

*E*эл  grad*U*эл , 2 *U*эл  0;

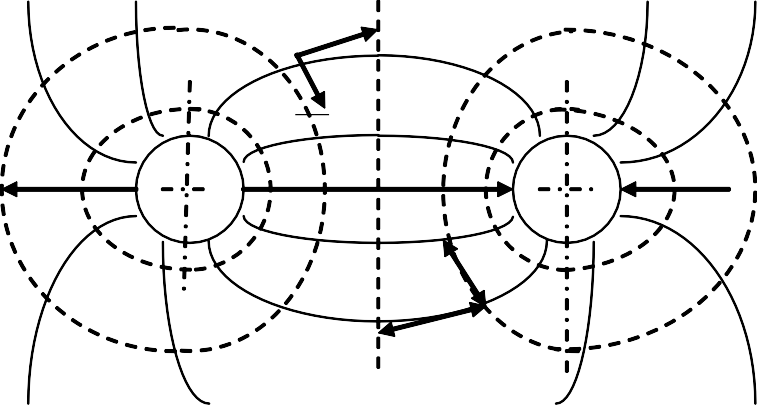
*H*эл  grad*U*м , 2 *U*м  0 .

При построении картины поля следует руководствоваться следующими правилами:

1. Векторные силовые линии электрического поля *E*эл должны быть не-

прерывными, начинаться и заканчиваться на зарядах при исследовании элек-

тростатических полей div *D*эл  ρэл или на электродах при исследовании



Пэл *E*эл

*H* эл

 *a*

 *n*

Рис. 1.1.

электрических полей в проводящих средах div *J*эл  0. Векторные линии

напряженности магнитного поля *H* эл должны быть замкнутыми div *H*эл  0 .

1. Векторные линии электрического и магнитного поля должны быть пер- пендикулярны эквипотенциальным линиям, т. е. линиям равного потенциала,

так как *E*эл  grad*U*эл , *H*эл  grad*U*м .

1. Ячейки, полученные при пересечении эквипотенциальных и векторных линий напряженности поля, должны быть подобными, т. е. отношение ли-

нейных размеров двух прилегающих сторон каждой ячейки  *a* /  *n* должно

быть постоянным для всей картины поля, где  *a* – расстояние между двумя

ближайшими векторными линиями электрического поля, а  *n* – расстояние

между двумя ближайшими эквипотенциальными линиями. При этом обеспе-

6

чиваются условия Коши-Римана, потенциалы удовлетворяют уравнению Лапласа, а напряженность поля может быть определена из отношения

*U* /  *n* .

Проводники имеют один и тот же электрический потенциал, поэтому век-

торные линии электрического поля *E*эл должны быть перпендикулярными к

контурам, ограничивающим сечение проводников.

Графическую картину рисуют вначале ориентировочно, стремясь удовле- творить ортогональность векторных и эквипотенциальных линий, а также векторных линий к поверхности проводника, затем исправляют её так, чтобы

удовлетворить подобие ячеек, т. е.  *a* /  *n* = const. Обычно для облегчения

построения картины поля выбирают отношение  *a* /  *n* =1.

По картине поля рассчитывают в любой точке модели напряженность электрического и магнитного поля, величину вектора Пойнтинга, мощность электромагнитного потока энергии, идущей вдоль линии. По картине поля определяют её емкость, внешнюю индуктивность и сопротивление утечки.

В качестве примера приведём расчет поля в воздухе и параметров двух- проводной линии (рис. 1.1):

*E*эл

 *U* эл

*A* *n*

 *U* эл ;

*n**n*

*H* эл*A*   *I* ;

*a m*



П эл*A*

 *IU* эл ;

*mn**n**a*

*P*яч  *IU* эл ; *P*  *IU* эл ; *P*  *IU* ,

*A mn*

тр*A m*

лин эл

где *п* – число эквипотенциальных промежутков; *т* – число токовых трубок. При расчете принято во внимание то, что в двухпроводной линии распро-

страняется поперечная электромагнитная волна типа «Т», у которой векторы

*E*эл , *H* эл и Пэл взаимно перпендикулярны *E*эл  *H*эл  Пэл и векторные ли-

нии напряженности магнитного поля совпадают с эквипотенциалями.

Для определения емкости электродов на единицу длины полезно исполь- зовать представление о дискретной модели, построенной из параллельно и последовательно включенных емкостей. Ёмкость ячейки определяется как

емкость плоского конденсатора

*a*

*C*яч  εэл*l* *n* , емкость токовой трубки как

емкость *n* последовательно соединённых одинаковых ячеек

*C*тр

 εэл*l*

*a* , а

*n**n*

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)7

емкость линии – емкость *m* параллельно соединённых одинаковых трубок

*m**a*

*C*  εэл*l* .

*n**n*

Для определения поверхностной плотности зарядов на электродах исполь-

зуется граничное условие *D*1*n*  *D*2*n*  σпов . Так как электростатическое по-

ле в проводниках отсутствует σпов  *Dn*  ε эл *En* .

Сопротивление утечки линии определяют по аналогии с ёмкостью

*R*ут  1 *n**n* , а внешнюю индуктивность – через магнитный поток, прохо-

γэл*l m**a*

дящий между проводами линии

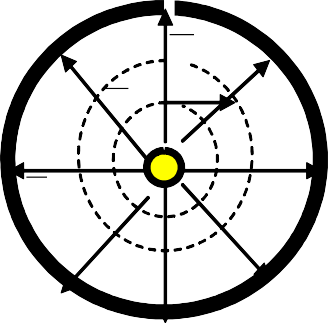
*n**n*

*L*  μэл*l* .



*m a*

На рис. 1.2–1.4 приведены картины электромагнитного поля двухпровод- ной линии, коаксиального кабеля и несимметричной полосковой линии,

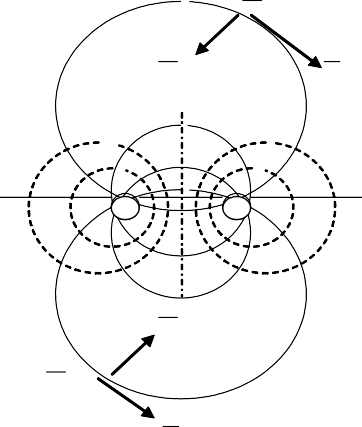


*H* эл

Пэл

*E*эл

*E*эл



 Пэл

*H* эл

*E*эл

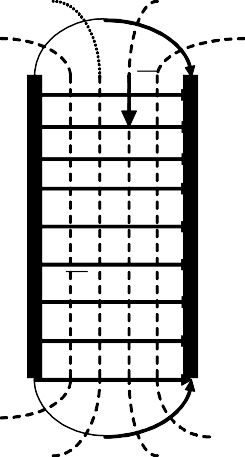
*H* эл

Пэл 

Рис. 1.2

Рис. 1.3

Рис. 1.4



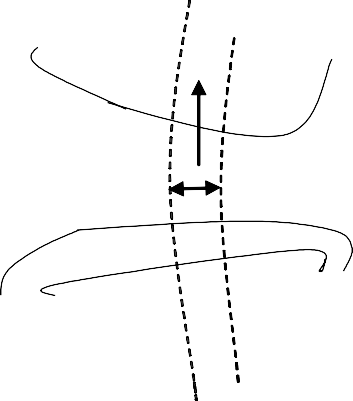
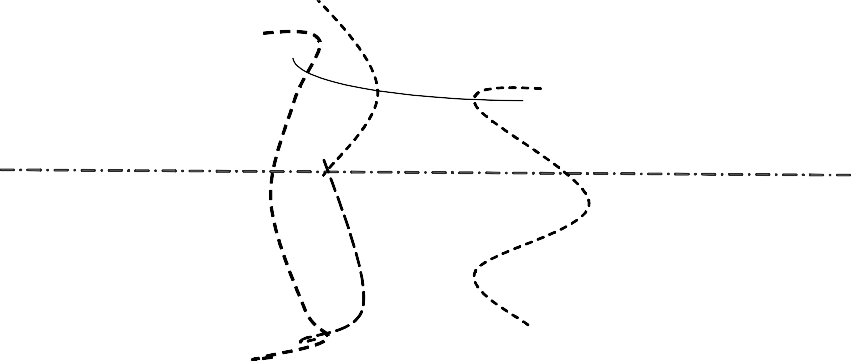
*H* эл

*E*эл

П эл 

построенные по правилам графического метода.

При построении векторных линий поля электронной линзы (рис. 1.5)



*rк*

 *a*

Рис.81.5

первые два правила сохраняются, а требование постоянства потока в векторной трубке электрического поля выполняется при условии:

 *a* *rк* /  *n*  const, где *rк* – расстояние от центра ячейки до оси. Постоянная

 *a*  *rк* /  *n* вычисляется после построения трубки поля, которая образуется

линией, совпадающей с осью симметрии, и первой векторной линией.

## Экспериментальная установка

Схема для исследования поля моделей состоит из генератора синусои- дального напряжения *1*, электролитической ванны *2*, вольтметра *3*, двух ме- таллических цилиндров, двух соосных цилиндров *4* и зонда *5* (рис. 1.6).



*2*

*5*

*4*

*3*

*1*

Рис. 1.6

В работе исследуются двухпроводная линия с проводами разного диамет- ра и электронная линза. В первом случае модель представляет собой два ме- таллических цилиндра конечной длины, во втором случае – два соосных по- луцилиндра.

Распределение потенциала поля моделей находится с помощью зонда, подключенного к потенциальному зажиму вольтметра. Эквипотенциали

*U* эл  0 и *U*эл  *U*0 совпадают с электродами. Остальные эквипотенциали

определяются с заранее выбранным шагом *U* эл  *U*0 / *n* .

## Порядок проведения исследований

1. Укрепить на крышке ванны лист бумаги.
2. Построить эквипотенциали поля модели двухпроводной линии, устано- вив предварительно потенциал первого электрода 1 В. При числе потенци-

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)9

альных перепадов

*n*  10

шаг 0.1 В, а число эквипотенциалей –

*n* 1  11.

Две эквипотенциали совпадают с электродами модели.

1. Построить эквипотенциали поля модели электронной линзы, приняв по-прежнему шаг 0.1 В.

## Содержание отчета

1. Цель работы, схема установки.
2. Картина плоскопараллельного поля двухпроводной линии, построенная в соответствии с тремя сформулированными правилами.
3. Расчет максимальной и минимальной поверхностной плотности заряда на одном из проводов линии.
4. Расчет погонной емкости, индуктивности и сопротивления утечки двух- проводной воздушной линии.
5. Расчет и определение направления векторов напряженности электриче- ского и магнитного поля, вектора Пойнтинга в заданной преподавателем точ- ке двухпроводной линии. Расчет потока электромагнитной мощности, прохо- дящей через ячейку, трубку и все сечение двухпроводной линии.
6. Картина аксиально-симметричного поля электронной линзы.
7. Выводы.

## Контрольные вопросы

* 1. Как выполняется условие подобия клеток в картине электрического и магнитного потенциального поля?
  2. Каким уравнениям удовлетворяют скалярные потенциалы электриче- ского и магнитного поля?
  3. На чем основано моделирование различных потенциальных полей?
  4. Какие правила должны выполняться при построении картины поля графическим методом?

**Лабораторная работа 2**

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ELCUT

***Цель работы:*** построение картины плоскопараллельного низкочастотно- го электромагнитного поля одной из направляющих систем численным мето- дом с помощью программного комплекса ELCUT.

10

Студент самостоятельно выбирает вид, размеры, входные токи и напряже- ния одной из направляющих систем: двухпроводной линии, однопроводной линии, коаксиального кабеля, несимметричной или симметричной полоско- вой линии. Преподаватель уточняет геометрию электродов модели.

## Основные теоретические положения

Численные методы [3], лежащие в основе специальных математических программ, позволяют достаточно быстро решать сложные полевые задачи на компьютерах с наглядным представлением результатов расчета и картин поля. Специфика работы компьютера требует замены операций дифференциро- вания в уравнениях Лапласа операциями над числами и перехода от беско- нечной совокупности чисел к конечной совокупности. Поэтому необходим переход от исходных непрерывных дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений. Переход осуществляется составлением разност- ного уравнения, являющегося дискретным аналогом соответствующего диф-

ференциального уравнения.

Для получения разностных уравнений выбирается система узлов, запол- няющих одно-, двух- или трёхмерную расчётную область. Выбор сетки, т. е. конфигурации дискретных областей, и определяемой ими системы узлов и ячеек, осуществляют исходя из условий получения возможно меньших по- грешностей при переходе от непрерывного уравнения к дискретному и пред- ставления границ расчетной области и поверхностей раздела сред с различ- ными свойствами. В практических задачах часто выбирают сетки, имеющие плоские, цилиндрические или сферические поверхности сторон ячеек, заме- няя при этом граничные поверхности совокупностью таких же плоских и криволинейных поверхностей. При расчете двухмерных полей узлы сетки могут образовывать ячейки различной формы (прямоугольной, треугольной, шестиугольной) с прямолинейными сторонами либо криволинейными (две стороны – прямые линии, две другие – дуги окружностей). При расчете трёх- мерных полей узлы сетки образуют пирамиды, призмы с плоскими, цилин- дрическими или сферическими гранями.

Замене непрерывных функций дискретными (сеточными) функциями соответствует замена области непрерывного изменения аргумента дискрет- ным множеством точек (узлов), образующих сетку или решетку. Поэтому при аппроксимации исходных дифференциальных уравнений в частных про- изводных алгебраическими зависимостями прежде всего задают систему уз-

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)11

лов – сетку. Пусть плоскопараллельное электростатическое поле в области *S*, заполненной однородной средой, описывается потенциалом, удовлетворяю- щим уравнению Лапласа:

2*U*

  2*U*

*x*2

 2*U*

 *y* 2

= 0.

Рассмотрим прямоугольную сетку с неравными шагами по координатам, аппроксимируя уравнение Лапласа в узле 0 (рис. 2.1). Используя разложение потенциала в ряд Тейлора в точке 0, получаем для потенциалов узлов 1...4:

*y*

*U* 1  2*U* 2 1 3*U* 3 1 4*U* 4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 2 |  |
| 3 | *h*2  *h*3 0 *h*1 *h*4  4 | 1 |
|  |  |  |

*U*1  *U*0 

1

*h*  *h*

*x* 2  *x*2 1

 *h*

6  *x*3 1

 *h*

24 *x*4 1

 ...;

*x U*2  *U*0  *U*

*h*2 

1  2*U*

2  1 3*U*

2

*h*

3  1

2

*h*

4*U*

*h*4  ...;

*y* 2  *y*2



6  *y*3

24 *y*4 2

*U* 1  2*U* 2 1 3*U* 3 1 4*U* 4

*U*3  *U*0  *x h*3  2  2 *h*3  6  3 *h*3  24  4 *h*3  ...;

*x*

*x*

*x*

Рис.

*U* 1  2*U* 2

1 3*U* 3

1 4*U* 4

2.1

*U*4  *U*0 

*y h*4  2 

2 *h*4  6

 3 *h*4  24

*y*4

*h*4  ...

Суммы значений *Uh* составят:

*y*

*y*

1  2*U* 2 2

*U*1*h*3  *U*3*h*1  *U*0 (*h*1  *h*3 )  2 *x*2 (*h*1 *h*3  *h*3 *h*1) 

 1 3*U* 3

3 1  4*U* 4 4

(*h h*  *h h* )  (*h h*  *h h* )...; 6 *x*3 1 3 3 1 24 *x* 4 1 3 3 1

2

*U* 2*h*4  *U* 4*h*2  *U*0 (*h*2  *h*4 )  1  *U* (*h*2*h*4  *h*2*h*2 ) 

 1 3*U* 3 3

2  *x*2 2 4

1  4*U* 4 4

(*h h*  *h h* )  (*h h*  *h h* )...

6 *x*3 2 4 4 2 24 *x*4 2 4 4 2

Пренебрегая в последних двух выражениях членами, содержащими произ- водные потенциала выше второй, определяем:

 2*U*  2*U*1  2*U*3  2*U*0

;

*x*2 *h* (*h*  *h* ) *h* (*h*  *h* ) *h h*

1 1 3 3 1 3 1 3

 2*U*  2*U* 2  2*U* 4  2*U*0

 *y*2

*h*2 (*h*2  *h*4 )

*h*4 (*h*2  *h*4 )

12

.

*h*2*h*4

После сложения вторых производных получаем:

2*U*1

2*U*3

2*U*2

2*U*4  2 2 

*h* (*h*



 *h* ) *h* (*h*



 *h* ) *h* (*h*



 *h* ) *h* (*h*

 

 *h* ) *h h*

 *U* 0

*h h*

 0 .

1 1 3

3 1 3

2 2 4

4 2 4

 1 3

2 4 

Данное выражение связывает значения потенциалов в пяти узлах 0…4 и является разностной аппроксимацией уравнения Лапласа. Равенство прибли- женное, так как не содержит отброшенные производные потенциала выше второй. Погрешность аппроксимации определяется значениями высших про- изводных потенциала, шагов сетки и их соотношениями.

В случае численного решения уравнения Пуассона

2*U* эл   ρэл

εэл

мето-

дом конечных разностей выражения разностной аппроксимации совпадают с выражениями уравнения Лапласа за исключением правой части, где вместо

нуля подставляется

( ρэл ) .

εэл

Полученные уравнения являются линейными алгебраическими уравнени- ями, связывающие потенциалы узлов. Число уравнений равно сумме внут- ренних узлов области и узлов её границы.

Системы конечно-разностных уравнений можно решать прямыми и итера- ционными методами, а также комбинированными, основанными на их сов- местном использовании. Например, методом прогонки, являющимся моди- фикацией метода исключения Гаусса, методом простой итерации, методами треугольной итерации (Зейделя, верхней релаксации, Ричардсона), вариаци- онного типа.

Аппроксимация поверхностей тел, граничных и краевых условий, особенно при криволинейных поверхностях, представляет собой сложную задачу при ис- пользовании метода сеток. Эта задача решается проще, если расчетная область разбивается на элементы конечного размера, т. е. используется метод конечных элементов. В пределах любого элемента потенциал выражается через полином степени *n* от координат *x*, *y*, *z* с коэффициентами, связанными с потенциалами узлов, обеспечивающие условие минимума энергии поля, достаточного для со- ответствия искомого распределения потенциала уравнениям Максвелла.

Исследование потенциальных полей в лаборатории поля осуществляется численными методами с использованием комплекса программ ELCUT для моделирования физических полей и Mathcad 2001i Professional.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)13

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для решения задач потенциального поля численным методом состоит из персонального компьютера с программным комплексом ELCUT и принтера для распечатки картин поля.

## Порядок проведения исследований

1. На персональном компьютере открыть программу **ELCUT**, нажав в ра- бочем поле на соответствующий ярлык и внимательно ознакомиться с описа- нием программы **ELCUT**, с последовательностью операций.
2. Создать новую задачу: Файл: **Создать: Задача ELCUT.**
3. Ввести параметры задачи: **Правка: Свойства**. Имя файла, тип задачи.
4. Задать геометрию модели, метки объектов и построить сетку: **Правка: Геометрическая модель.**
5. Ввести данные о материалах, нагрузках и граничных условиях: **Прав- ка: Физические свойства.**
6. Решить задачу; **Правка: Решить задачу.**
7. Просмотр результатов и вычисление интегральных величин: **Правка: Анализ результатов.**

Анализ результатов позволяет определить как параметры поля в любой точке модели, так и погонные параметры системы: погонные емкость, индук- тивность и сопротивление утечки линии.

Полученную картину поля модели направляющей системы вместе с дан- ными характеристиками её в выбранной точке следует распечатать на прин- тере или сфотографировать на мобильный телефон.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Картина плоскопараллельного поля направляющей системы.
3. Аналитический расчет напряженностей электрического, магнитного по- ля и вектора Пойнтинга в выбранной точке линии.
4. Расчет емкости, индуктивности и сопротивления утечки линии.
5. Расчет потока электромагнитной мощности проходящей через ячейку, трубку и все сечение линии.
6. Сравнение результатов расчета модели и её параметров с численным и аналитическим методами.
7. Выводы.

14

## Контрольные вопросы

* 1. Чем отличаются решения уравнения Пуассона методом конечных раз- ностей от решения уравнения Лапласа?
  2. Каким уравнениям удовлетворяют скалярные потенциалы электриче- ского и магнитного поля?
  3. На чем основано моделирование различных потенциальных полей?
  4. Почему точность графического метода зависит от размеров сетки?

**Лабораторная работа 3**

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ

***Цель работы:*** измерение составляющих вектора магнитной индукции цилиндрической катушки, построение картины магнитного поля.

## Основные теоретические положения

Цилиндрические катушки широко применяются во многих электроизме- рительных приборах, электрических машинах, установках для высокочастот- ного нагрева металлов и диэлектриков, в электрических цепях приёмо- передающей аппаратуры связи, навигации, точного времени и др. В этих слу- чаях интерес представляют величина и распределение в пространстве вектора

магнитной индукции *B*эл или вектора напряженности магнитного поля *H* эл .

Уравнения Максвелла для магнитного поля постоянного тока имеют вид

I. rot *H* эл  *J* эл ; IV. div *B*эл  0 ,

где *J* эл – вектор плотности тока проводимости.

Для переменного поля относительно низкой частоты (квазистационарного поля) эти уравнения имеют такой же вид.

Из этих уравнений Максвелла в интегральной форме получают следую-

щие граничные условия: *H*1  *H* 2  *i*пов ; *B*1*n*  *B*2*n* ,

где *H*1 и *H* 2 – касательные составляющие вектора *H* эл на границе разде-

ла двух сред; *i*пов – модуль вектора поверхностной плотности тока *B*1*n* и

*B*2*n* – нормальные составляющие вектора *B*эл .

Из I уравнения Максвелла очевидно, что вектор напряженности магнитно-

го поля *H* эл не может иметь составляющих, параллельных току, а из IV

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)15

уравнения Максвелла – что линии вектора индукции магнитного поля *B*эл

всегда замкнуты. Для поля цилиндрической катушки это означает, что вектор

*B*эл имеет лишь осевую *Bz* и радиальную *Br* составляющие. Простое выра-

жение для вектора напряженности магнитного поля *H* эл можно получить

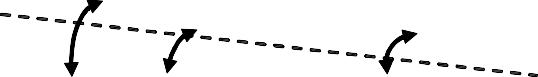
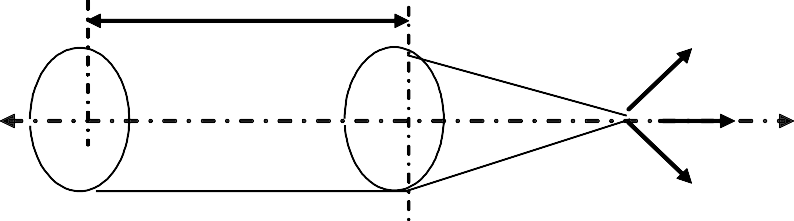
лишь для точек, расположенных на оси катушки. Покажем это при следую-

щих данных модели: *r*0 ,*W*, *L*0 , *I* – соответственно радиус, число витков, дли-

на и ток соленоида (совокупности последовательно соединённых витков).

Вначале определим *Hz* – напряженность магнитного поля на оси одного витка (рис. 3.1).

*E*



*L*0

2



1

*L* o

*z*

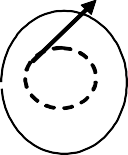
*H z*

Рис. 3.1

Из закона Био-Савара на расстоянии *z* от центра витка результирующий вектор напряженности магнитного поля от двух противоположно лежащих элементов тока витка равен сумме горизонтальных составляющих векто- ров *dH* , так как нормальные составляющие векторов, одинаковые по вели- чине, противоположны по направлению:

d*Hz*

 2 *I*d*l*

4 π *r* 2

cosα 

*I*d*l r*0

2 π *r* 2 *r*

 *I*d*l r*0 . 2 π *r*3

Интегрируя *dH z* по половине периметра витка, определяем напряжен-

ность магнитного поля на оси одного витка:

π *r* 2

*I r*0 o *I r*

*Hz*   *dl*  0 . (3.10)

2 π *r*3 0 2 *r*3

С учетом полученного решения для одного витка определяем магнитное поле на оси соленоида.

Магнитное поле бесконечно малого элемента соленоида определяем как произведение напряженности магнитного поля одного витка на число витков в этом элементе:

*I r* 2 *W*

d*Hz*  0 d*L* .

2 *r* 3 *L*0

16

После интегрирования этого выражения по всей длине соленоида получаем

*I W L*o *r* 2

*Hz* 

2 *L*0

 0 d*L* .

0 *r* 3

Для решения интеграла воспользуемся подстановкой

*L*  *z*

ctg 

*r*0

и пе-

рейдём к новой переменной , принимая во внимание равенство дифферен-

циала от котангенса угла:

dctg  

1

sin 2

d  d*L*

*r*0

и отношения

*r*0  sin.

*r*

Интегрируя по переменной  от одного края соленоида 1 до другого 2 ,

определяем *H z* напряженность магнитного поля на оси соленоида:

*I W* 2 *r* 2  *r*  *IW* 2 *I W*

*H*  0  0 d 

(sin)d 

(cos 

* cos  ) .

*z* 2 *L*0





2

1

 3 

1

*r*

sin 2 

2 *L*0 

1



2 *L*0

Определим магнитный поток сцепления соленоида без учета краевого эф- фекта.

При *r*0  *L*o в центре соленоида напряженность магнитного поля на оси

соленоида приближенно составит

*Hz* 

*IW*

2 *L*0

(cos2

* cos1) 

*IW*

2 *L*0

(cos0  cos)  *I W* .

*L*0

В этом случае поле однородно, и магнитный поток, проходящий внутри соленоида, ориентировочно может быть определён как произведение магнит-

ной индукции на его сечение: Ф  *IW* μπ*r* 2 , а магнитный поток сцепления –

*L*0 0

как произведение числа витков соленоида на магнитный поток:

ψ  *W* Ф 

*IW* 2

*L*0

μπ*r* 2 .

Определим индуктивность соленоида, которая равна величине отношения

0

магнитного потока сцепления к току в нём:

*L*c  

*I*

ψ

*W* μπ*r* 2 .

*L*0

0

2

При переменном токе в соленоиде на основании закона электромагнитной индукции кроме магнитного поля возникает вихревое электрическое поле.

В интегральной форме закон электромагнитной индукции формулируется как: циркуляция вектора напряженности электрического поля по любой за-

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)17

мкнутой регулярной кривой равна уменьшению во времени магнитного по- тока через любую поверхность, опирающуюся на эту кривую:

 *E*эл*dl*   *B*эл *dS* .

*L S* *t*

Полный поток может меняться во времени, а также из-за деформации кон- тура и изменения магнитной проницаемости.

В дифференциальной форме закон электромагнитной индукции

rot *E*эл   *B*эл

*t*



определяет вихревой характер электрического поля, возни-

кающего при изменении во времени индукции магнитного поля.

Так, напряженность электрического поля внутри соленоида определяется из закона электромагнитной индукции в дифференциальной форме, который в цилиндрической системе координат для однородного магнитного поля, имеет вид

1.  (*rE* )  μ *dHmz*cosω*t*  μω *H* sin ω*t* .

*r*  *r*

*dt mz*

Умножим левую и правую части равенства на *rdr* и возьмем неопреде- лённые интегралы

 *d*(*rE* )   *Hmz*sin *t* *rdr* .

 *r* 2 

Получаем равенство (*rE* )   *Hmz*sin *t*  *C*  .

 

2

 

Принимая постоянную *С* равной нулю, так как величина напряженности электрического поля на оси соленоида не может быть бесконечно большой,

находим

*E*  μω *Hmz*sin ω*t r* .

2

Вектор напряженности вихревого электрического поля внутри соленоида направлен по касательной к окружности с центром на его оси. Силовые ли- нии электрического поля образуют замкнутые концентрические окружности вокруг магнитного потока (см. рис. 3.1).

Вектор Пойнтинга внутри соленоида направлен по радиусу:

Пэл2  [*E**e*  *Hzez* ]  *E**Hzer* .

Его мгновенное значение:

П  *E H*   *Hmz*sin *t r H* cosω*t*   *H* 2  *r* sin2 *t* .

эл*r*  *z*

1. *mz*

*mz* 4

Вектор пульсирует с удвоенной частотой.

18

Поток реактивной мощности, идущий с внутренней боковой поверхности к оси соленоида для создания электромагнитного поля в нём, а также для из- менения этого поля во времени, прямо пропорционален индуктивному со- противлению соленоида:

2 *r I* 2 *W* 2

 *r* 2 *L I* 2

*P*   *Hmz * sin2 *t L*0 2 *r*   *m*  0 sin2 *t*   *L*c  *m* sin2 *t* .

2

4 0 2 2

*L*

Итак, переменный ток в катушке соленоида образует внутри неё и во внешней среде переменное магнитное поле. Вокруг этого магнитного поля на основании закона электромагнитной индукции возникает вихревое электри- ческое поле, совместно с магнитным полем образующее радиально пульси- рующий с удвоенной частотой поток реактивной мощности.

## Экспериментальная установка

Схема для исследования магнитного поля катушки состоит из генератора синусоидального напряжения, подключенного к последовательной цепи из исследуемой катушки *L*, конденсатора C и резистора 50 Oм (рис. 3.2).

Резистор включен в цепь для определения тока в ней, конденсатор – для согласования генератора с нагрузкой. Емкость подобрана так, чтобы на ча- стоте 2000 Гц в цепи устанавливался резонанс напряже-

ний и ток был максимальным. *C*

V

*L*

В установке на рейке смонтированы две взаимно перпендикулярные рамки. Одна из них измеряет осевую

составляющую *Bz* , а другая – радиальную *Br* составля-

ющую вектора индукции магнитного поля. *R*

На основании закона электромагнитной индукции электродвижущая сила, наводимая в проводящем конту- ре измерительной рамки, равна отрицательной скорости

изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур:

Рис. 3.2

*U*  dΨ

d*t*

 *j*ω

 *j*ω*W*Ф

 *j*ωμ *WH* *S* .

Действующее значение напряженности магнитного поля, поэтому опреде- ляется из выражения:

*H*  *U* ,

2π*f* μ*WS*

где *W* – число витков измерительной катушки; *S* – площадь измерительной катушки.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)19

## Порядок проведения исследований

1. Установить частоту 2000 Гц, ток в катушке 0.1 А (напряжение на рези- сторе 5 В).



*B*

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 I

II

*B* III

IV

Рис. 3.3

1. Снять зависимости *U* прод и *U* рад (соответствующих напряжений) вдоль направлений I, II, III и IY (рис. 3.3). Расстояние изменять от 0 до 24 см через 2 см, не пропуская характерных точек кривой. Особое внимание следует об- ратить на точки при положениях рейки III и IY у края катушки, где меняет

знак продольная составляющая вектора напряженности магнитного поля.

1. Составить таблицы данных.

## Содержание отчета

1. Цель работы, схема установки.
2. Таблицы экспериментальных данных.
3. Примеры численных расчетов вектора Пойнтинга внутри соленоида. Опытные и экспериментальные значения собственной индуктивности ци- линдрической катушки.
4. Графики экспериментальных значений.
5. Поле вектора в продольном сечении катушки, построенное по экспе- риментальным значениям его составляющих. Заштриховать область, в кото- рой с точностью до 10 % поле можно считать однородным.
6. Проверка выполнения граничных условий для тангенциальных состав- ляющих вектора напряженности магнитного поля на поверхности катушки в средней её части. Использовать измеренные значения. Поверхностная плот-

ность тока *i*пов  *IW* / *L*0 . При вычислениях учесть знаки касательных со-

ставляющих и взять абсолютную величину их разности.

1. Выводы.

20

## Контрольные вопросы

1. Из каких уравнений определяются граничные условия для векторов напряженности и индукции магнитного поля?
2. Какую составляющую не может иметь вектор напряженности магнит- ного поля соленоида?
3. Из каких соображений определяется величина ёмкости в цепи питания соленоида?
4. Какая формула используется при экспериментальном определении со- ставляющих вектора индукции магнитного поля катушки?

**Лабораторная работа 4**

# ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТЕЙ

***Цель работы:*** измерение собственной и взаимной индуктивности воз- душных катушек и катушек с ферромагнитным сердечниками.

## Основные теоретические положения

Индуктивность является одним из основных параметром любой электро- технической установки. Ее определение представляет собой важнейшую за- дачу.

В системе из несколько индуктивно связанных контуров собственной ин- дуктивностью *k* контура называется отношение магнитного потока к току

*L*  Ф*kk* ,

где

Ф *kk*

*kk Ik*

* магнитный поток, созданный током *I k*

данного контура, прони-

зывающий *k-*й контур к величине этого тока; *Ik* – ток, протекающий в *k-*м контуре.

Взаимной индуктивностью *i*-го и *k-*го контуров называется отношение

*L*  Ф*ik* ,

где

*ik I i*

*I i* – ток, протекающий в *i-*м контуре;

Ф*ik*

* магнитный поток, создан-

ный током *Ii* , пронизывающий *k-*й контур.

Из теоремы взаимности следует, что *Lik*  *Lki* .

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)21

Если по *k-*му контуру протекает синусоидальный ток с действующим зна-

чением *Ik* , а токи в остальных контурах равны нулю, то напряжение на нем

*Uk*  ω*Lkk Ik*

. Отсюда

*Lkk*

 *Uk*

2π*fIk*

. При этом напряжение на разомкнутых

выводах *i-*го контура *Uk*  ω*LkiIk* и, следовательно,

*Lik*

 *Ui* .

2π*fIk*

Из полученных формул следует, что для экспериментального определения

индуктивностей нужно измерить напряжение на выводах контура и *Ik* – ток, протекающий в *k-*м контуре.

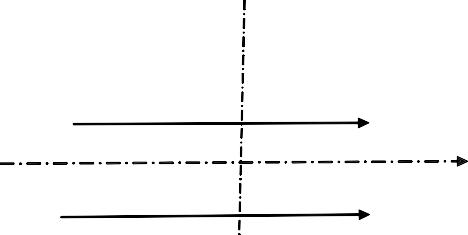
В работе исследуются три системы, состоящие из двух индуктивно свя- занных катушек: эталонный соленоид без сердечника с намотанной на него катушкой (рис. 4.1), две плоские катушки без сердечника (рис. 4.2) и две ка- тушки на ферритовом тороидальном сердечнике прямоугольного сечения (рис. 4.3).

*Z*



*H* o

*O*



*w*2

ooooooоo

*w*1 ooooooooooooooooooo

ooooooooooooooooooo

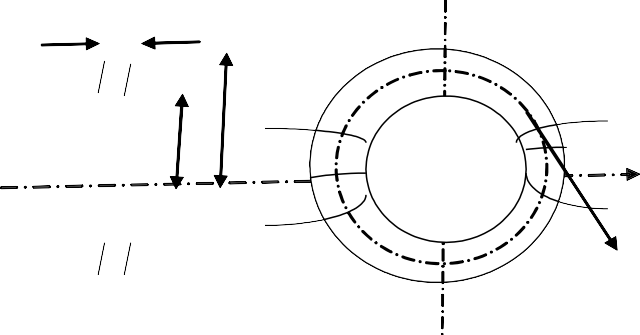
о~~ооооооо~~ *l*

*B*

Рис. 4.1

Рис. 4.2

*Z*



*h*

*r*1 *r*2

*w*1

*w*2

*Н*

Рис. 4.3

22

Для этих систем можно вывести приближенные теоретические формулы:

1. Собственная индуктивность эталонного соленоида и взаимная индук- тивность соленоида и катушки

*L*11 

μоw 2 *S*

;

1

*l*

*L*12

 *L*21 

μо *w*1 *w*2 *S* ,

*l*

где μо – магнитная проницаемость воздуха; *S* и *l* – площадь сечения и длина

соленоида; *w*1 и *w*2 – число витков соленоида и катушки.

1. Взаимная индуктивность двух плоских катушек

*r*1*r*2

*L*12

 *L*21  μо *w*1*w*2

*f* (*k*),

где *w*1 , *w*2 , *r*1, *r*2 – число витков и радиусы катушек; *f* (*k*) – функция, опре-

деляемая через эллиптические интегралы первого и второго рода модуля

4*r*1*r*2

*x*2  (*r*1  *r*2 )2

*k*  ,

где *x* – расстояние между плоскими параллельными катушками.

2  *k* 2  

Функция *f* (*k*)   1  *K*  *E* , где *K* – полный эллиптический инте-

*k* 

2



 

  

грал первого рода; *Е* – полный эллиптический интеграл второго рода. Ве- личины интегралов *К* и *Е* могут быть найдены для соответствующих *k* в ма- тематических справочниках [4].

1. Собственная и взаимная индуктивности катушек на ферромагнитном сердечнике

μ w 2*h r* μ w 2*h r*

*L*11  1 ln 2 ; *L*11  2 ln 2 ,

2π *r*1 2π *r*1

где *h* – высота тороида; *r*1 и *r*2 – его радиусы; μ – магнитная проницае-

мость феррита; *w*1 и *w*2 – число витков катушек.

Собственная и взаимная индуктивности зависят лишь от геометрических размеров системы, числа витков катушек и от магнитная проницаемости сер- дечника. Однако, если сердечник изготовлен из нелинейного магнитного ма- териала, у которого магнитная проницаемость зависит от величины напря-

женности магнитного поля μ  *f* (*H* ) , то при разных токах может получиться

разная индуктивность. В работе определяются значения магнитной проница- емости феррита для двух диапазонов изменения напряженности магнитного поля. Среднее значение напряженности магнитного поля в тороидальном сердечнике при токе *I* и числе витков *w* равно:

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)23

*H*  *I*w ,

2π*r*ср

где

*r*ср

 *r*1  *r*2

2

– средний радиус сердечника.

## Экспериментальная установка

Схема для измерения собственной и взаимной индуктивности состоит из генератора синусоидального напряжения, вольтметра и резисторов (шунтов сопротивлением 10 Ом), которые включаются последовательно с исследуе- мой катушкой для определения тока в ней.

Для определения собственной индуктивности катушки необходимо изме- рить ток в катушке, поделив напряжение на шунте на 10 Ом, и измерить напряжение на этой же катушке. Отношение напряжения на катушке к току в ней по закону Ома равно ее индуктивному сопротивлению, а отношение ин- дуктивного сопротивления к круговой частоте тока – собственной индуктив- ности катушки.

Для определения взаимной индуктивности следует измерить ток в первой катушке и напряжение на разомкнутых выводах второй катушки, поделить напряжение на ток и на круговую частоту.

## Порядок проведения исследований

1. Установить в генераторе частоту 1 кГц.
2. Определить собственную и взаимную индуктивности соленоида и ка- тушки при двух величинах тока в соленоиде: 20 мА и 40 мА.
3. Определить зависимость взаимной индуктивности двух плоских кату- шек от расстояния между ними от 3 до 21 см через 3 см при двух токах пер- вой катушки 25 мА и 50 мА.
4. Определить собственную индуктивность первой катушки на феррито- вом сердечнике и взаимную индуктивность при двух токах первой катушки 25 мА и 1 мА.
5. Определить собственную индуктивность второй катушки на феррито- вом сердечнике и взаимную индуктивность при двух токах второй катушки 50 мА и 2 мА.
6. Составить таблицы данных.

24

## Содержание отчета

1. Цель работы, эскизы катушек, схемы измерений.
2. Таблицы опытных и теоретических данных.
3. Примеры численных расчетов. Опытные значения собственных и вза- имных индуктивностей катушек.
4. График

*L*12 (*x*)

для плоских катушек, построенный по опытным и тео-

ретическим данным.

1. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Назовите магнитные потоки, определяющие собственную и взаимную индуктивности катушек.
2. Каким уравнениям удовлетворяют скалярные потенциалы поля?
3. Как определяется напряженность магнитного поля тороида?
4. Зависимость между векторами индукции и напряженности поля?

**Лабораторная работа 5**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ

**ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА**

***Цель работы:*** исследование явлений интерференции, дифракции и поля- ризации электромагнитных волн.

## Основные теоретические положения

В 1881 г. американский физик А. Майкельсон впервые поставил экспери- мент с целью определения влияния движение Земли на скорость распростра- нения света в её атмосфере. Его отрицательный результат был одним из важ- нейших экспериментальных факторов. Для достижения своей цели Майкель- сон использовал созданный им оптический интерферометр.

В 1958 г. К. И. Крылов и В. Н. Рудаков применили радиоволновой аналог интерферометра Майкельсона для измерения диэлектрической проницаемо- сти и тангенса угла электрических потерь различных материалов в сверхвы- сокочастотном диапазоне электромагнитных волн.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)25

С помощью интерферометра Майкельсона можно довольно точно опреде- лить длину электромагнитных волн, характер их поляризации, наблюдать структуру дифракционных полей.

При изменении векторов поля во времени по гармоническому закону (в

комплексной форме как *e j**t* ) система уравнений Максвелла в дифференци-

альной форме может быть приведена к комплексному виду:

эл эл

I. rot *H* эл  *j*ωε *E* ; II. rot *E*эл   *j*ωμ*H* эл ;

III. div *D* эл  0 ; IV. div *B*эл  0 , (5.1)

где ε  ε  jγэл/ω – комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

В этом случае векторы напряженности поля удовлетворяют волновому уравнения Гельмгольца

2*E*эл  *к*2*E*эл  0 ; 2*H* эл  *к*2*H* эл  0, (5.2)

где *к* = 

эл (эл  *j*эл / )

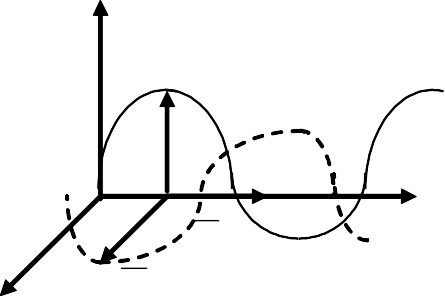
– комплексное волновое число.

При решении конкретной задачи, как и в случае потенциальных полей из бесчисленного множества решений уравнения Гельмгольца выбирают то, ко- торое удовлетворяет условиям на границе раздела сред, на бесконечно боль- ших и нулевых расстояниях.

Переменное во времени электромагнитное поле распространяется в про- странстве в виде плоских, цилиндрических, сферических, эллиптических, сфероидальных и других типов волн. Любая сложная волна может быть

представлена в виде суммы плоских

*x*



*E*

*z*

П

*H*

*y*

Рис. 5.1

волн.

Плоской называют волну, распро- страняющуюся вдоль какой-либо ли- нейной координаты и неизменную в каждый фиксированный момент вре- мени в плоскости, перпендикулярной этой координате.

26

Предположим, что плоская волна распространяется вдоль оси *z* декарто- вой системы координат (рис. 5.1), а вектор напряженности электрического поля направлен по оси *x*, т. е.

*E* *x*  *Emxe j*(ω*t* *kz*) ; *Ey*  0 ; *Ez*  0.

Отметим основные свойства и характеристики плоских волн:

1. Вектор напряженности электрического поля удовлетворяет волновому уравнению Гельмгольца (5.2):

2 

2*E* *x*

2*E* *x*

2*E* *x*

*j*ω*t* 2*e* *jkz* 2 

*Ex* 

*x*2



*y*2



*z* 2

 *Emxe*

*z* 2

 *к*

*Ex* .

1. Вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен вектору

напряженности электрического поля *H*эл  *E*эл .

Из II уравнения Максвелла (5.1) находим:

или

rot *E*

 *E* *x e*

*z y*

  *jkE*

*xey*

  *j*ωμ

эл *H*

*yey* ,

*Emx*

ε эл

 *Hmy* .

1. Отношение *E* *x* / *H* *y*  [B]/[A]  [Ом] называется волновым или харак-

μэл

теристическим сопротивлением среды, определяющим связь между вектора- ми электрического и магнитного поля в плоской волне:

эл

эл

эл

эл  *j*эл / 

*Z* = *E*x





 *Z e j*z . (5.3)

c *H* y

Волновое сопротивление среды, а, следовательно, взаимная связь между векторами поля определяются параметрами пространства, в которой распро- страняется плоская волна, и её частотой.

Для воздуха

*Z* c = 377 Ом, для проводящих сред

*Z* c =



эл*e j* 4 , т. е. в

эл

проводящих средах вектор напряженности электрического поля опережает вектор напряженности магнитного поля по фазе на угол /4.

1. Векторы

*E*эл , *H*эл и

Пэл

взаимно перпендикулярны

*E*эл

 *H* эл

 Пэл .

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)27

1. Комплексное волновое число, равное

*к*  

эл (эл  *j*эл / )

=  – *j* ,

где  – коэффициент фазы;  – постоянная затухания, определяет характер изменения амплитуды и фазы напряженности плоской волны с расстоянием:

*E*x  *E*mx*e**ze j*(*t* *z*) ; *H* y  *H*my*e**ze j*(*t* *z*) .

1. Фазовая скорость волны – скорость перемещения фронта волны, фикси-

рованного значения фазы *t* *z*  const вдоль направления распространения

волны, т. е.

*v*ф  d*z*

d*t*

или

d*t*  d*z*  0 :

*v*ф  d*z*  ω .

d*t* β

1. Длина волны  – расстояние, на котором фаза волны изменяется на 2, т. е.  = 2, или

  2  *v*ф .

 *f*

В линейно поляризованной волне вектор ванной плоскости (плоскости поляризации).

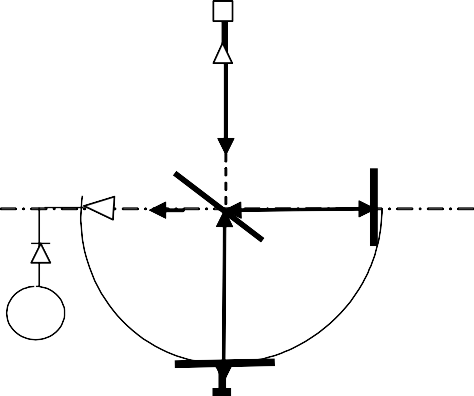
*E*эл

находится в одной фиксиро-

Если распределение поля зависит только от одной координаты *z*, волновое уравнение в частных производных переходит в обыкновенное дифференци- альное уравнение второго порядка. Его решение – сумма прямой и обратной волн, распространяющихся в направлениях  *z*.

## Экспериментальная установка

Схема интерферометра приведена на рис.



*G*

А1

З2

*l*2

А2

З

*U*

*l*1

Л

З1

5.2, где: *G* – СВЧ генератор с блоком пита-

ния; А1 – излучающая рупорная антенна; З –

полупрозрачное зеркало (лист из диэлек-

трика); З1 – подвижное металлическое зер-

кало; В – винт для его передвижения; З2 –

неподвижное металлическое зеркало; А 2 –

В

Рис. 5.2

приемная рупорная антенна, соединенная с детектором и милливольтметром *U*; Л –

28

лимб со шкалой в градусах, по которому можно передвигать приемную ан-

тенну; *l*1 и *l*2 – плечи интерферометра.

Рупорная антенна А1 , питаемая от СВЧ-генератора через волновод пря-

моугольного сечения, излучает монохроматическую линейно поляризован- ную волну:

*E* *x*  *E*m*xe j*(ω*t* *kz*) ,

где *E*m*x* – амплитуда волны; (ω*t*  *kz*) – фаза волны ( *k* – волновое число

воздуха; *z* – направление распространения волны).

Полупрозрачное зеркало, когда нормаль к нему образует угол 45º с направлением распространения падающей волны, разделяет ее на две волны с равными амплитудами.

Одна волна движется вдоль плеча *l*1 и, отразившись от зеркала З1, возвра-

щается обратно. Вторая волна совершает аналогичный путь вдоль плеча *l*2 .

Первая волна, отразившись от зеркала З , и вторая волна, пройдя сквозь не- го, поступают с практически равными амплитудами в приемную антенну А2 .

Так как волны когерентные, т. е. разность фаз между ними не зависит от

времени, то напряженность электрического поля в приемной антенне опреде- ляется результатом их интерференции и будет пропорциональна:

*E*пр  *E*m пр*e j*(ω*t* *kz*) (1  *e jk* ) ,

где  – разность фаз двух волн. Она возникает из-за различных длин плеч интерферометра. Так как каждая из волн проходит вдоль соответствующего плеча дважды, то

  2*k*(*l*1  *l*2 )  4π(*l*1  *l*2 ) / λ.

Напряжение *U*, измеряемое милливольтметром после детектирования принятого сигнала, пропорционально мощности результирующей волны:

*U*  *k E*пр *E***** m пр  *k E*пр  *E*m пр*e j*(ω*t* *kz*) (1  *e jk* ) *E*m пр*e* *j*(ω*t* *kz*) (1 

+ *e* *jk* ) = 2*kE*2

пр

(1  cos*k*)  4*kE*2

cos20.5*k*.

(5.4)

Таким образом, *U –* периодическая функция разности длин плеч

пр

  2*k*(*l*1  *l*2 )  4π(*l*1  *l*2 ) / λ с периодом λ/2.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)29

Если, вращая винт *B*, передвигать зеркало З1 и тем самым изменять плечо

*l*1, то можно построить график *U*  *f* (*l*1) . В соответствии с (5.4) расстояния

между соседними максимумами или минимумами на этом графике равны λ/2.

Если на пути волны, движущейся вдоль плеча *l*2 , поставить лист толщи-

ной *h* из материала, диэлектрическую проницаемость которого необходимо измерить, то разность фаз двух волн  в приёмной рупорной антенне изме- нится на величину

где

*n* 

4π(*n* 1)*h* / λ,

*–* показатель преломления контролируемого материала. При

этом изменение фазы будет равняться удвоенному набегу фазы в листе ди- электрика за вычетом удвоенного набега фазы на протяжении вытесненного

ε/εo

им воздушного слоя той же толщины. Поэтому на новом графике *U*  *f* (*l*1)

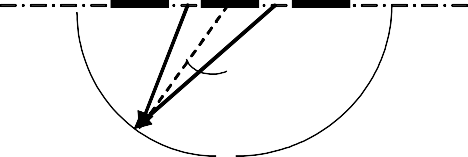
максимумы и минимумы *U* сместятся на величину *x*  (*n* 1)*h* . Отсюда

найдем диэлектрическую проницаемость контролируемого материала

ε  εo (1  *x* / *h*)2 . (5.5)

С помощью радиоволнового аналога интерферометра Майкельсона мож- но исследовать структуру дифракционных полей и характер поляризации волн, излучаемых антенной. Установим вместо полупрозрачного зеркала металлический экран с двумя щелями так, чтобы нормаль к экрану совпадала с осью излучающей антенны.

Рис. 5.3



*r*1

*r* 

*r*2

Л

А2

Тогда на экран будет падать прак- тически плоская волна. В этом случае по принципу Гюйгенса щели можно счи- тать источниками когерентных волн. В результате их интерференции в при- емной антенне (рис. 5.3) напряжен- ность электрического поля результи- рующей волны равна

*E*пр

 *Аe j*(ω*t* *kr*1) 

*r*1

*A e j*(ω*t* *kr*2 ) . (5.6)

*r*2

Геометрическая разность хода волн

*r*2  *r*1  (*a*  *d*)sinθ  *r* ,

где *a –* ширина щели; *d –* расстояние между щелями.

30

В первом приближении в знаменателях амплитуд можно положить

*r*1  *r*2  *r*. В фазах волн этого сделать нельзя. Тогда из (5.6) следует:

*E*пр

  *Ae j*(ω*t* *kr*1 *k**r* / 2) (*e jk**r* / 2  *e* *jk**r* / 2 ) 

*r*

 2 *Ae*

*r*

*j*(ω*t* *kr*1 *k**r* / 2)

cos *k**r* / 2.

Напряжение *U*, измеряемое милливольтметром и равное

 **** *A*2 2 2

*U*  *k E*пр *E*m пр

 *k* 4

*r* 2

cos

*k**r* / 2  *U*o cos

*k**r* / 2 

 *U*ocos2 *k*(*a*  *d* )sinθ **,** (5.7)

является периодической функцией sinθ .

Поляризация электромагнитной волны определяется поведением вектора напряженности электрического поля по мере ее распространения. Волна называется линейно поляризованной, если вектор *E* , изменяясь во времени, остается параллельным некоторому направлению, которое и является направлением поляризации волны.

В интерферометре рупорная антенна А1 излучает, а аналогичная антенна

А 2 принимает линейно поляризованные волны. Поэтому, если направление

поляризации приемной антенны образует с направлением поляризации излу-

чающей антенны А 2 угол η , а напряженность электрического поля излу-

ченной волны *E* , то *E* пр  *E*cosη. Напряжение *U*, измеряемое милливольт- метром, равно:

*U*  *U*ocos2η. (5.8)

При *U*  *U*o направления поляризации антенн параллельны, при *U*  0 *–*

скрещены.

## Порядок проведения исследований

1. Установить приборы интерферометра так, как показано на рис. 5.3. Провести измерение напряжения *U* по показаниям милливольтметра через каждые два миллиметра перемещения подвижного металлического зеркала

З1 с помощью винта В и построить график *U*  *f* (*l*1) .

Особо отметить положения максимумов и минимумов *U*. Их должно быть не менее трех.

Из графика определить длину электромагнитной волны, равную расстоя- нию между тремя максимумами или минимумами напряжения *U*.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)31

1. Установить вплотную к зеркалу З2 лист контролируемого диэлектри-

ка. Проделать те же операции, что и в п. 1. По смещению максимумов (ми- нимумов) вычислить диэлектрическую проницаемость листа (5.5).

1. Вместо полупрозрачного зеркала установить металлический экран с двумя щелями. Передвигая приемную антенну по круговому лимбу, провести измерение напряжения *U* по показаниям милливольтметра через 2…5º в пре- делах 0…90º.

В соответствии с (5.7) график должен иметь одинаковые амплитуды при *r =* const. Однако этого не наблюдается из-за неодинаковой направленности приема.

1. Убрать экран со щелями и установить приемную антенну напротив из- лучающей антенны так, чтобы их оси совпадали. Вращая приемную антенну вокруг ее собственной оси, провести измерение напряжения *U* по показани- ям милливольтметра через 5…10º в пределах 0…90º и убедиться в справед- ливости (5.8).

## Содержание отчета

1. Цель работы, схема радиоволнового аналога интерферометра Майкель- сона.
2. Кривые *U*  *f* (*l*1) на одном графике.
3. Расчет длины волны и диэлектрической проницаемости контролируе- мого материала.
4. Схема для исследования структуры дифракционного поля от экрана с двумя щелями; кривая измерений дифракционного поля.
5. Теоретическая кривая *U*  *f* (θ) (5.8) и экспериментальная кривая, по-

строенные на одном графике.

## Контрольные вопросы

1. Какие явления можно исследовать на электромагнитном аналоге ин- терферометра Майкельсона?
2. Каким уравнениям удовлетворяют переменное во времени электриче- ское и магнитное поле?
3. Как устроен электромагнитный аналог интерферометра Майкельсона?
4. Как определяется диэлектрическая проницаемость диэлектрика на электромагнитном аналоге интерферометра Майкельсона?

32

**Лабораторная работа 6**

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ

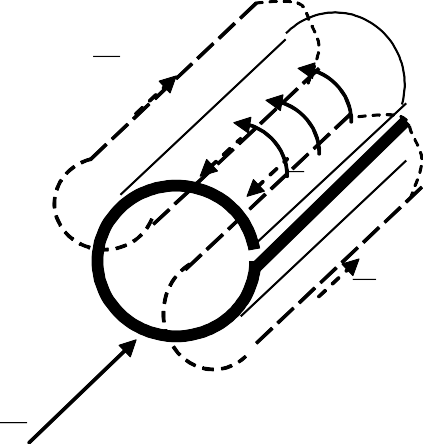
***Цель работы:*** исследование экранирующего действия проводящих корот- ких тонкостенных цилиндров и прямоугольных пластин в переменном элек- тромагнитном поле.

## Основные теоретические положения

Электромагнитные экраны применяют как для защиты отдельных элемен- тов, блоков, устройств и целых комплексов различных электротехнических систем от внешнего переменного электромагнитного поля, так и для ослаб- ления внешнего поля самих устройств. В качестве экранов используют ме- таллические оболочки. Общий метод расчета экранов состоит в определении электрического и магнитного поля во внешней среде, стенке оболочки и внутри неё и относится к числу труднейших задач электродинамики. В ана- литическом виде решение возможно только для оболочек, совпадающих по конфигурации с одной из известных координатных систем [1]. Экранирова-

ние электромагнитного поля *H* o открытыми проводящими оболочками (рис.

* 1. возможно за счет возбуждения в них вихревых токов *J* , создающих

встречные компенсирующие поля *Hi* . На

основании закона электромагнитной индук- ции электродвижущая сила, наводимая в проводящем контуре, равна отрицательной скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур. Данный факт говорит о том, что возникающая в проводя- щем контуре ЭДС вызывает в нём ток тако- го направления, при котором создаваемый им вокруг контура вторичный магнитный поток препятствует изменению первичного магнитного поля. В результате внутри кон-

*Hi*

*J*

*Hi*

*H* o

Рис. 6.1

тура внешний магнитный поток ослабляется встречным вторичным магнит- ным потоком. Ослабление поля зависит от сопротивления контура. В разо- мкнутом контуре ток отсутствует, а, следовательно, и эффект экранирования. Поэтому оболочки должны быть замкнутыми, в них могут быть окна, отвер-

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)33

стия, вырезы различной конфигурации, не нарушающие замкнутость конту- ров. Поперечные и продольные размеры отверстий должны быть малы по сравнению с длиной волны. Этому требованию, в частности, удовлетворяют металлические сетки, широко используемые на практике для экранирования помещений.

На высоких частотах сопротивление проводящего контура практически равно его реактивной части, т. е. индуктивному сопротивлению, пропорцио- нальному частоте. С ростом частоты увеличивается сопротивление контура, но пропорционально частоте увеличивается и величина ЭДС. Поэтому на вы- соких частотах ослабление поля слабо зависит от частоты.

Коэффициент экранирования *S* определяется как отношение напряженно- сти магнитного поля внутри экрана *H* к напряженности внешнего магнитно-

го поля

*H* o :

*S* 

*H*

*H* o

.

На высоких частотах коэффициент экранирования стремится к нулю. В этом случае встречный магнитный поток внутри экрана полностью ком- пенсирует внешний магнитный поток.

С уменьшением частоты внешнего электромагнитного поля реактивное индуктивное сопротивление контура становится соизмеримым с активной составляющей сопротивления, определяемой тепловыми потерями в контуре. В результате ЭДС с понижением частоты уменьшается быстрее, чем сопро- тивление контура, вихревые токи и, следовательно, встречный магнитный поток ослабляются, а коэффициент экранирования стремится к единице.

В закрытых проводящих оболочках коэффициент экранирования суще- ственно зависит от соотношения её толщины и глубины проникновения вол- ны. За счет поверхностного эффекта внешнее поле дополнительно ослабляет-

ся. Расстояние, на котором амплитуда вектора *E*эл или *H*эл волны в про-

водящих средах уменьшается в *e* = 2,71 раз, называется глубиной проникно-

2

 эл  эл

вения и обозначается символом :

  1



 .

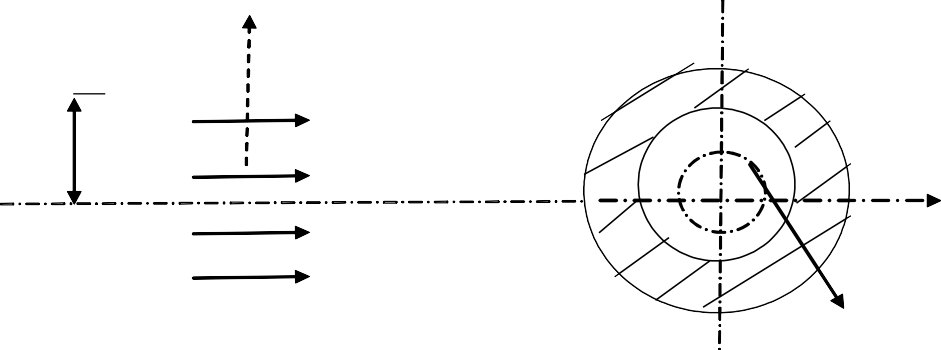
## Экспериментальная установка

На установке (рис. 6.2) с двумя коаксиальными плоскими катушками Гельмгольца исследуется экранирующее действие незамкнутого на торцах

34

латунного цилиндра, такого же цилиндра с продольным разрезом и двух па- раллельных прямоугольных пластин на частотах 10… 200 кГц.

*Z*



*x*

*H* o

*r*o

*O*

*H* o

*E*

Рис. 6.2

Студенты по экспериментальным данным измерений ЭДС, пропорцио- нальной напряженности магнитного поля, строят графики амплитудно- частотных характеристик коэффициента экранирования моделей и показы- вают возможность экранирования электромагнитного поля открытыми про- водящими оболочками за счет индуцированных вихревых токов, создающих встречные компенсирующие поля.

Однородное магнитное поле в ограниченной области пространства созда- ется между двух коаксиальных плоских катушек Гельмгольца, расположен- ных на расстоянии, равном их радиусу, при одинаковом направлении токов в их обмотках (см. рис. 6.2).

Напряженность магнитного поля в центре данного устройства *H* o может

быть определена из (3.10). Напряженность магнитного поля в центре равна

*H*o  0,7*Iw*/ *r*o ,

где *I –* действующее значение тока; *w* 10 *–* число витков катушки;

*r*o  0,15 м *–* средний радиус обмотки.

В области *x*  *y*  *z*  *r*o / 3 поле можно считать однородным, совпадаю-

щим с *H* o с точностью до 1,5 %.

Последовательно соединенные катушки Гельмгольца подключены к гене- ратору. Экраны, укрепленные на специальных стержневых подставках, вно- сятся в область однородного магнитного поля. При этом отдельно исследу-

ются два режима, когда вектор *H* o параллелен стенкам экрана (продольное

поле) и перпендикулярен им (поперечное поле).

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)35

Для измерения напряженности магнитного поля используются две миниа-

тюрные плоские катушки *K*1 и *K*2 , расположенные во взаимно перпендику-

лярных плоскостях. Катушки вмонтированы в цилиндрический держатель из оргстекла. На его корпусе нанесена шкала, позволяющая определять расстоя-

ние от точки 0 (центр экрана) до точки наблюдения. Катушка *K*1 измеряет со-

ставляющую вектора напряженности магнитного поля, направленную парал-

лельно оси цилиндрического держателя, катушка *K* 2 *–* вдоль его радиуса.

Индуцированные в измерительных катушках напряжения регистрируются милливольтметрами.

При измерении магнитного поля с помощью катушки *K* 2 необходимо так

повернуть держатель, чтобы показания индикатора вольтметра были макси- мальными.

## Порядок проведения исследований

* + 1. Включить генератор и настроить его на частоту 100 кГц.

На генераторе ручку «Ослабление» поставить в положение “+30”, а ручку

«Выходная мощность» *–* в крайнее правое положение.

* + 1. Произвести проверку однородности магнитного поля катушек Гельм- гольца. Для этой цели нужно использовать параллелепипед из оргстекла с цилиндрическим каналом, куда помещается держатель с измерительными ка- тушками. Перемещая держатель через 1 см вдоль оси *z* (при *y*  0 ), измерить

напряжение *U*1(*z*) , пропорциональное составляющей *H*o*z* . Затем, повернув

параллелепипед с держателем в плоскости *yz* на 90º, измерить напряжение

*U*2 ( *y*) через 1 см вдоль оси *y* (при *z =* 0), так как именно это напряжение в

данном случае пропорционально *H*o*z* .

* + 1. Исследовать экранирующие свойства цилиндрического экрана в про-

дольном и поперечном поле. В первом случае снять зависимость *U*1(*z*) через

1 см вдоль оси *z* внутри экрана и за его пределами. Во втором случае снять зависимость *U*2 ( *y*). Рекомендуется показания снимать через 1 см вдоль всей шкалы, нанесенной на поверхности держателя. Составить таблицы данных.

* + 1. Исследовать по такой же программе экранирующие свойства цилиндри- ческого экрана с тонким разрезом и двух прямоугольных пластин в продоль- ном и поперечном поле.

36

* + 1. Снять амплитудно-частотные характеристики коэффициента экраниро-

вания *S*( *f* ) цилиндрического экрана в продольном поле, определяя его как

отношение продольной составляющей вектора напряженности магнитного поля в центре внутри экрана (точка 0), т. е. *U*1(*z*) , пропорциональное состав-

ляющей *H z* , к напряженности магнитного поля катушек Гельмгольца вне

экрана, т. е. *U*1(*z*) , пропорциональное составляющей *H oz* .

Частоты принять равными 100, 50, 30, 20, 10 и 2 кГц. При каждом измене- нии частоты следует подбирать выходное сопротивление генератора так, чтобы показания вольтметра были наибольшими.

## Содержание отчета

1. Цель работы, электрическая схема установки, эскизы катушек Гельм- гольца и исследуемых экранов с векторными линиями магнитного поля.
2. Таблицы опытных данных *U*1(*z*) и *U*2 (*z*) , а также соответствующие графики.
3. АЧХ коэффициента экранирования *S*( *f* ) .

## Контрольные вопросы

1. За счет каких токов возможно экранирование электромагнитного поля открытыми проводящими оболочками?
2. В виде какого отношения определяется коэффициент экранирования?
3. Как устроена экспериментальная установка для исследования экрани- рования открытыми проводящими оболочками?
4. Как определяется амплитудно-частотная характеристика коэффициента экранирования открытыми проводящими оболочками?

**Лабораторная работа 7**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

***Цель работы:*** экспериментальное исследование диаграммы направлен- ности магнитного осциллятора на реальных физических устройствах; экспе- риментальное исследование зависимости электромагнитного поля магнитно- го осциллятора в ближней зоне от расстояния до точки наблюдения; исследо- вание частотного спектра принимаемого сигнала при токе в осцилляторе произвольной формы.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)37

## Основные теоретические положения

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить основные свойства и параметры электромагнитного поля, создаваемого эле- ментарными осцилляторами (рис. 7.1) [1].

Следует обратить внимание на то, что элементарные осцилляторы являют- ся идеализированными излучающими системами, удобными для теоретиче- ского анализа.

*l I*

*z*

*l*



*z*

*z*

  *I**lez*

*P*

эл

*P*  2*U* щ

*lez*

 *j*ωμ*I**SWez*

*а б в*

*z*

~~~~*~~S~~*

*y , P*

щ

*P*



м

м



*P*

*x*

эл

г

Рис. 7.1

К элементарным осцилляторам (рис. 7.1) относятся электрический диполь в виде круглого плоского проводника бесконечно малой длины, магнитные диполи *–* одно- или многовитковые рамки, узкая щель в проводящем беско- нечно протяженном экране, элемент Гюйгенса *–* элемент поверхности плос- кой площадки волнового фронта, с одинаковыми величинами амплитуд и фаз возбуждающих их токов.

Предполагается, что геометрические размеры элементарных осцилляторов малы по сравнению с длиной волны образованного ими в окружающем про- странстве электромагнитного поля.

Электромагнитное поле элементарных осцилляторов в сферической си-

стеме координат определяется через векторные *A*эл и \* потенциалы:

*A*

эл

  *e* *jk r*

 \* 

*e* *jk r*  

*A*эл  *P*эл и *A*эл  *P*м , где *P*эл *–* электрический момент; *P*м *–*

4π *r* 4π *r*

магнитный момент осцилляторов.

38

С учётом условий Лоренца векторы равны:

*E*эл

и *H* эл

в комплексной форме

*B*эл  rot *A*эл ; *E*эл   *j* *A*эл  1 graddivA эл  ;

 

 *k* 2 

*E*эл  rot *A* \* ; *H*  *j*  *A*   1 graddivA   .

эл эл

эл  эл

 *k* 2

эл 



В сферической системе координат при вертикальной ориентации момен- тов осцилляторов по направлению оси *z*, после подстановки векторных по-

тенциалов *A*эл и \* в выражения вектора *E*эл и *H* эл и дифференцирования

*A*

эл

их, получаем:

– для элементарного электрического осциллятора:

*B*эл  1  *jkr* sin  *A* *z*эл*e* ;

*r*

*E*эл 

*j* sin  *A* *z* эл *e*  1  *jkr* (2 cos *er*

*j* элэл*r* 2

 sin  *e*) *A* *z* эл ;

– для элементарного магнитного осциллятора:

*H* эл   *j*элsin  *A*\* эл *e*  1 *jkr* (2 cos *e*  sin  *e* ) *A*\* ;

*z j*

эл*r*2

*r*  *z* эл

*E*эл  1 *jkr* sin  *A*\* *e* .

*r z* эл 

Любую реальную излучающую систему можно представить в виде экви- валентных элементарных осцилляторов.

Рассмотрим основные свойства электромагнитного поля магнитного ос- циллятора.

1. Векторы *E*эл и *H*эл в любой точке пространства взаимно перпендику-

лярны: *H*эл  *Hr*эл*er*  *H*эл*e* ; *E*эл  *E*эл*e* .

1. Составляющие *Hr*эл , *H*эл и *E*эл не зависят oт координаты  , т. е. поле

является симметричным относительно оси *z*, проходящей через ось осциллятора.

1. Фазы *j**r* составляющих векторов поля не зависят от полярного угла  ,

а только от расстояния *r*, поэтому поверхностями равных фаз являются сфе- рические поверхности с центром в середине осциллятора.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)39

1. Векторными линиями напряженности электрического поля

*E*эл  *E*эл*e* являются концентрические окружности, параллельные эквато-

риальной плоскости *x*0*y*, с центрами на оси осциллятора.

1. Векторные линии напряженности магнитного поля лежат в меридио-

нальных плоскостях *H*эл  *Hr*эл*er*  *H*эл*e* , *H*эл  0 .

Зависимость *E*эл и *H*эл от направления изображается полярными диа-

граммами направленности, длина радиуса-вектора на них равна отношению напряженности в направлении  к направлению, перпендикулярному оси осциллятора.

Ближняя зона соответствует расстояниям, малым по сравнению с длиной электромагнитной волны. В этой зоне можно пренебречь запаздыванием.

В ближней зоне *r*  1 напряженноcтъ электрического поля аналогична

*P*  [*P*  *e* ]

закону Био-Савара *E*эл  м sin  *e*  м *r* , а магнитного поля *–* по-

4π*r* 2

лю магнитного диполя постоянного тока

4π*r* 2

*H* эл

 *I**SW*

4π*r*3

(2 cos *er*

 sin  *e* ).

При синусоидальном токе в диполе, исходя из приближенных выражений

напряженности, векторы *E*эл и *H*эл , имеют сдвиг по фазе на /2, определяя

только реактивную мощность. Среднее за период значение вектора Пойнтин- га равно нулю; поэтому принимают, что в ближней зоне электромагнитное поле носит реактивный характер.

Мгновенное значение удельной электромагнитной мощности изменяется по гармоническому закону с удвоенной частотой

П(*t*)  1 [*E*эл  *H* эл ]=

2

1. *P*2

 м*m* [(2 cos *er*

1. ωμ эл 32π2*r*5

 sin  *e*)  sin  *e* ] sin2*t*.

Поток мощности пульсирует в ближней зоне не отрываясь от осциллятора.

## Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводятся на лабораторной установке, состоящей из генератора сигналов произвольной формы серии AFG 3000, ис-

40

следуемого магнитного осциллятора (рамки диаметром 0,134 м с 180 витка- ми) и селективного измерителя внешнего магнитного и электрического поля INTERFERENCE METER типа NLMZ-4/50 с рабочим диапазоном частот 10...150 кГц.

## Порядок проведения исследований

### Исследование диаграммы направленности рамки

1. Настроить генератор на одну из частот рабочего диапазона 10...150 кГц селективного измерителя внешнего поля. Выбрать синусоидальную форму сигнала.
2. Совместить плоскости исследуемой рамки и рамки селективного изме- рителя внешнего поля в одной вертикальной плоскости.
3. Поворачивая рамку измерителя вместе с прибором, установленным на вращающейся вокруг вертикальной оси стойке, снять показания индикаторов измерителя через 10º изменения полярного угла  в интервале 0°…180°. Стойка имеет лимб для отсчета величины угла поворота.
4. Повторить действия предыдущего пункта, поворачивая исследуемую

рамку в интервале 0° … 180° при неподвижной рамке измерителя.

### Исследование зависимости напряженности магнитного поля рамки в ближней зоне от расстояния

1. К входу измерителя подсоединить его «ручную» рамку.
2. Перемещая «ручную» рамку снять показания индикаторов измерителя через 2 см изменения расстояния от центра исследуемой рамки до 30 см в двух взаимно перпендикулярных направлениях при полярных углах  0° и 90°.

### Исследование частотного спектра принимаемого сигнала

1. Настроить генератор на частоту 15 кГц. Выбрать прямоугольную фор- му сигнала.
2. Снять показания индикаторов измерителя на кратных 15 кГц частотах от первой до девятой гармоник принимаемого сигнала.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)41

## Содержание отчета

1. Цель работы, схема лабораторной установки.
2. Таблицы опытных данных, графики.
3. Ответы на все вопросы.
4. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Что такое элементарный магнитный осциллятор?
2. Чему равен магнитный момент магнитного осциллятора?
3. Какие составляющие векторов  и  характеризуют электромагнит- ное поле элементарного магнитного излучателя в ближней зоне? Напишите эти составляющие в сферической системе координат.

**Лабораторная работа 8**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

***Цель работы:*** экспериментальное исследование электромагнитного поля двухпроводной длинной линии на реальном физическом макете.

## Основные теоретические положения

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить ос- новные свойства и параметры электромагнитного поля направляющих систем [1]. Передача электромагнитной энергии на расстояние осуществляется по направляющим системам, отличающимся между собой конструкцией, типом

волн и диапазоном частот.

*По конструкции* направляющие системы подразделяются на системы от- крытого типа, к которым относятся двухпроводные (рис. 1.2) и однопровод- ные линии, диэлектрические волноводы и системы закрытого типа *–* коакси- альные линии (рис. 1.3), полосковые линии (рис. 1.4), металлические волно- воды и световоды.

В направляющих системах распространяются волны типа «Т», «E» и «H». При рассмотрении в цилиндрической системе координат распространения

электромагнитной волны вдоль круглого радиуса *r*о бесконечно длинного

42

проводника, по которому протекает переменный ток, предполагают, что со- ставляющие векторов поля из-за его осевой симметрии относительно центра проводника не зависят от угла , а также изменяются с расстоянием как

*e* *jk z z*  *j**t* , где *k z –* продольное комплексное волновое число волны.

В этом случае волновое уравнение Гельмгольца для продольной состав- ляющей вектора электрического поля с учетом вторых производных

1 2 *E* *z*  и

0

*r* 2 2

 2 *E* *z*

 *z* 2

 *k* 2 *E*

преобразуется в уравнение Бесселя

1  (*r* *E* *z* )  (*k* 2  *k* 2 )*E*  0 .

*z z*

*r* *r* *r z z*

Решением уравнение Бесселя являются модифицированные функции Бес-

*k* 2  *k* 2

*z*

1

селя первого рода нулевого порядка от аргумента

*k* 2  *k* 2

*z*

2

*r*

для проводника

и второго рода нулевого порядка от аргумента

ды:

*r*

для внешней сре-

*E*  *AI* (*r k* 2  *k* 2 )*e* *jk z z*  *j*ω*t* ; *E* *z*2  *BK*0 (*r k* 2  *k* 2 )*e* *jk z z*  *j*ω*t* .

*z*1 0 *z* 1

Из

*z* 2

*H*  эл  

I уравнения Максвелла  *z*  *j*эл*Er* эл после дифференцирова-

ния его по *z* находят

*E**r* эл

 *kz*

эл

*H*  эл , а из II уравнения Максвелла

  

*j*эл

*E* *z* эл

rot *E*эл

  *j**H*эл *–*

*H* эл 

2  *k* 2

*r* .

В результате общее решение приводится к виду – внутри проводника:

*k*

*z*

*E* *z*1  *AI*0 (*r k* 2  *k* 2 )*e* *jk z z*  *j*ω*t* ;

*z*

1

*H*  *j*1э *AI*  (*r k* 2  *k* 2 )*e* *jk z z*  *j*ω*t* ;

 1эл 2 2 1/ 2 0 *z* 1

(*k*  *k* )

*z*

* во внешней среде:

1

*E**r* 1эл

 *kz*

1э

*H* 

1эл ;

*E* *z*2  *BK*0 (*r k* 2  *k* 2 )*e* *jk z z*  *j*ω*t* ;

*z*

2

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)43

*H*  *j*2э *BK*  (*r k* 2  *k* 2 )*e* *jk z z*  *j*ω*t* ;

 2эл 2 2 1/ 2 0 *z* 2

(*k*  *k* )

*z* 2

*E**r* 2эл 

*kz*

2э

*H* 

2эл ***.***

На поверхности проводника при *r* = *r*0 на основании граничных условий

должны быть равными тангенциальные составляющие векторов электриче- ского и магнитного полей:

*AI* (*r k* 2  *k* 2 ) = *BK* (*r k* 2  *k* 2 ) ;

0 0 *z* 1 0 0 *z* 2

*j*1э *AI*  (*r k* 2  *k* 2 ) = *j*2э *BK* (*r k* 2  *k* 2 ) .

(*k* 2  *k* 2 )1/ 2

0 0 *z* 1

(*k* 2  *k* 2 )1/ 2

0 0 *z* 2

*z* 1 *z* 2

Одно равенство делят на другое, предварительно умножив второе равен- ство на внешний периметр проводника. Левая часть полученного равенства равна погонному сопротивлению провода

*E* *I*0 (*r*0 *k* 2  *k* 2 )

*k* 2  *k* 2

*z* 1

*R*   *z*1*эл*   *z* 1 ,

*I* *j*2   *r I*  (*r k* 2  *k* 2 )

1эл 0 0 0 *z* 1

так как на основании закона полного тока циркуляция вектора напряженно- сти магнитного поля по замкнутому контуру равна току, проходящему через контур.

Правую часть равенства определяют через погонную ёмкость линии

 ε 2эл *E**r* 2эл *dl*

 2π*r*

2π *r*0ε 2э *K*0 (*r*0

*k* 2  *k* 2 )

*k* 2  *k* 2

2  *k* 2

*C*  0   *z* 2 *z* 2 в виде  .

*k*

2

*z*

   *K* (*r k* 2  *k* 2 )

*j**C*

 *Er* 2эл *dr*

*r*0

0 0 *z* 2

*k* 2  *k* 2

Из полученного равенства *R* =   *z* 2

*j**C*

находят продольное волновое

число электромагнитной волны *kz*  .

*k* 2  *j**R**C*

2

Значение продольного комплексного волнового числа *k z* определяется не

только параметрами внешней среды, но и параметрами самого проводника, его внутренним сопротивлением, ёмкостью и частотой переменного тока.

Постоянные коэффициенты *А* и *В* определяют из закона полного тока:

*j*1э *AI*  (*r k* 2  *k* 2 ) = *j*2э *BK* (*r k* 2  *k* 2 )  *Im* ;

(*k* 2

*k* 2 )1/ 2

0 0 *z* 1

(*k* 2  *k* 2 )1/ 2

0 0 *z* 2

2*r*

*z*  1 *z* 2 0

44

*A*  *R**Im*

*I* (*r k* 2  *k* 2 )

0 0 *z* 1

; *B* 

*R**Im* ,

где *I m* – амплитудное значение тока в проводнике.

*K* (*r k* 2  *k* 2 )

0 0 *z* 2

В результате получают следующие решения для электромагнитного поля: – внутри проводника:

*I*0 (*r*

*k* 2  *k* 2 )

1 *I*  (*r*

*k* 2  *k* 2 )

*E* *z*1  *R*

*z* 1 *Ime* *jkz z*  *j*ω *t* ; *H*  1эл  0 *z* 1 *Ime* *jkz z*  *j*ω*t* ;

*I* (*r k* 2  *k* 2 )

2π *r*0 *I*0 (*r*0 *k* 2  *k* 2 )

0 0 *z* 1

*E**r* 1эл 

*kz*

ωε1э

*z* 1

*H*  1эл ;

* во внешней среде:





 *jk*

*z*  *j*ω*t*

*Ez* 2эл  *R*

*Ime z* ;

*H* 2эл 

*K*0 (*r k* 2  *k* 2 )

*z* 2

*K*0 (*r*0 *k* 2  *k* 2 )

*z* 2

*E**r* 2эл 

*kz*

ωε 2э

*Ime*

*H*  2эл .

1

*K*0 (*r k* 2  *k* 2 )

*z* 2

2π *r*o *K*0 (*r*0 *k* 2  *k* 2 )

*z* 2

 *jk*

*z z*  *j*ω*t* ;

Внешняя индуктивность и погонное сопротивление излучения проводника в этом случае составляют:

*L*   μ 2 ln(*r*  *j**C**R* )   μ 2э ln(*r* *CR* )  *j* 3  ;

2π 0

2π 0

8 2эл

*R*изл 

*j* Im*L*  32эл .

8

Квадрат волнового числа внешней среды выражают через ёмкость и

внешнюю индуктивность проводника

2  ω2*C* *L* , так как

*C* *L*   2 2 и

подставляют его в выражение для продольного волнового числа

*k* 2  *j**R**C*

2

 (*R*  *j*ω*L*) *j*ωC

*k*

2

*kz* 

 .

Вдоль проводника распространяется поперечная электромагнитная волна типа «T».

В длинной линии, при распространении одной прямой волны, сопротивле-

ние, в любом её сечении равно волновому сопротивлению *Z* c  .

*R*  *j**L j**C*

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)45

Одиночный проводник имеет большую погонную индуктивность и малую ёмкость, а, следовательно, высокие характеристическое и входное сопротив- ления, поэтому направляющие системы (двухпроводная линия, коаксиальный кабель, полосковая линия и др.) состоят из двух проводников, при этом уменьшается внешняя индуктивность линии и возрастает ёмкость за счёт концентрации поля между проводниками. Основной поток активной мощно- сти распространяется вдоль проводника во внешней диэлектрической среде и только часть её идёт внутрь проводника для компенсации тепловых потерь в нём.

В линии конечной длины (рис. 8.1) при выходном сопротивлении, не рав- ном волновому сопротивлению, за счет отраженной волны возникает режим стоячих волн с образованием пучностей и узлов напряжения и тока.

Ток на расстоянии *z* от конца линии длиной *l* равен сумме токов прямой и

отраженной волн: *I*  *I* *e* *jk z* (*l*  *z*)  *I* *e* *jk z* (*l*  *z*), а напряжение – неопре-

пр

отр

делённому интегралу из произведения полного сопротивления бесконечно малого элемента линии на ток:

*U*  (*R*  *j*ω*L*)*I*d*z*  *R*  *j*ω*L* (*I* *e* *jk z* (*l*  *z*)  *I* *e* *jk z* (*l*  *z*) ) =

 *jk* пр

пр

отр

*z*

отр

= *Z*c(*I*

*e* *jk z* (*l*  *z*)  *I*

*e* *jk z* (*l*  *z*) ) .

*l*

*R*

*L*

*C*

*C*

*Z* н

0

*z*

Рис. 8.1

Токи прямой и отраженной волн определим через значения тока и

напряжения на конце линии при *z* = 0:



*I*

вых

  *jk l*

пр

 *I*

*e z*



отр

 *I*

*e* *jk zl* ;

*U*вых

 *Z*c

  *jk l*

пр

(*I*

*e z*



отр

 *I*

*e* *jk zl* );

*I* *e* *jk zl*

 

 вых c вых ; *I*

*U*  *Z I*

*e* *jk zl*

 

  вых c вых .

*U*  *Z I*

пр 2 *Z*c

отр 2 *Z*c

46

После подстановки их в выражения для тока и напряжения на расстоянии

*z* от конца линии получаем

*I*  1 *U*выхsh *jkz z*  *I* ch *jk z*;

*Z*c вых *z*

*U*  *U*

вых

сh *jkz*

*z*  *Z*c



вых

*I*

sh *jkz*

*z*; *E* *z*

 *U*

*z*

 *jkz*

(*U*

вых

sh *jkz*

*z*  *Z*c



вых

*I*

ch *jkz*

*z*).

Ток в проводах определяет распределение вдоль линии магнитного поля, напряжение – поперечную составляющую, а его производная по *z* – про- дольную составляющую вектора электрического поля. Исследование элек- тромагнитного поля в длинной линии студенты проводят на реальном макете двухпроводной линии. Макет линии отличается от классической длинной линии. Макет расположен на деревянном столе.

## Экспериментальная установка

В состав лабораторной установки входят:

* генератор сигналов Agilent №9310A RF Signal Generator 9 kHz – 3 GHz;
* закороченная исследуемая двухпроводная линия (длиной 2 м, проложен- ная по лабораторному столу медным проводом диаметром 0,5 мм);
* малогабаритный микропроцессорный измеритель ИПМ-101 с рабочими диапазонами частот от 30 кГц до 1,2 ГГц и от 2,4 до 2,5ГГц.

По показаниям измерителя ИПМ-101 студенты строят графики изменения поперечной и продольной составляющих вектора напряженности электриче- ского поля вдоль оси двухпроводной линии и по ним определяют расстояния между узлами и пучностями тока, длину волны.

## Порядок проведения исследований

Настроить генератор и измеритель ИПМ-101 на частоту 1 ГГц.

На столе под проводами двухпроводной линии положить два листа бумаги А4. По центральной оси двухпроводной линии на бумаге нанести шкалу расстояния через 1 см.

Электрический диполь измерителя ИПМ-101 расположить поперек оси линии в её центре. Перемещая диполь через 2 см от 0 до 60 см вдоль оси двухпроводной линии провести измерения поперечной составляющей векто- ра напряженности электрического поля. Результаты занести в таблицу.

Электрический диполь измерителя ИПМ-101 расположить вдоль оси ли- нии в её центре и для определения продольной составляющей вектора

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)47

напряженности электрического поля повторить действия предыдущего пунк- та.

Эти измерения составляющих вектора напряженности электрического по- ля для определения уровня внешних помех повторить при отключенной от генератора закороченной исследуемой двухпроводной линии.

## Содержание отчета

1. Цель работы, эквивалентная электрическая схема макета длинной двух- проводной линии, картина поля двухпроводной линии.
2. Таблицы опытных данных продольной и поперечной составляющих вектора напряженности электрического поля, а также соответствующие гра- фики.
3. Ответы на контрольные вопросы.
4. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. В каких случаях в длинной линии возникают режимы стоячих и бегу- щих волн?
2. Чему равно расстояние между узлами и пучностями в длинной линии?
3. Как влияет подстилающая поверхность деревянного стола, на котором расположен макет длинной двухпроводной линии на длину её волны?
4. Какие резонансные волны устанавливаются в исследуемом макете ли- нии при открытом её входе и замкнутом выходе?

**Лабораторная работа 9**

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ

**ПОСТОЯННОГО ТОКА**

***Цель работы:*** изучение эффекта Холла, измерение магнитной индукции цилиндрической катушки постоянного тока, проверка граничных условий.

## Основные теоретические положения

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить основные законы и уравнения магнитного поля постоянного тока [1] и озна-

48

комиться с основными теоретическими положениями работы 3 настоящего лабораторного практикума.

В работе для измерения магнитной индукции постоянного тока использу- ется эффект Холла.

.

«3»



*2*

*3*

*B*эл

*E* эл *J*эл

*1*

Рис. 9.1

Полупроводящая пластина *2* (рис. 9.1), по которой в продольном направ-

лении протекает электрический ток устройства *1* с удельной плотностью *J*эл ,

помещается в однородное магнитное поле *B*эл , перпендикулярное плоскости

пластины. Согласно закону Ампера, движущиеся электрические заряды за счет магнитного поля приобретают ускорение в поперечном направлении, образуя разность потенциалов поперек пластины

*U*   *R I*пл *B* cosα ,

*t*

где *R* – постоянная Холла; *I* пл – ток через пластину; *B* – магнитная индук-

ция; *t* – толщина пластины; α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к пластине.

В датчиках Холла по разности потенциалов устройства *3* при α = 0 опре- деляют индукцию магнитного поля из формулы

*B*  *U K* ,

*I* пл

где *K* – параметр преобразователя Холла, определяемый его материалом и размерами.

Проверка граничных условий производится из условий, определяющих поведение векторов магнитного поля на границе раздела сред.

Они находятся из I и IV уравнений Максвелла в интегральной форме:

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)49

*H*1  *H*2  *i*пов ; *B*1*n*  *B*2*n* ,

где *i*пов – поверхностный ток.

## Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводятся на лабораторной установке, в которую входят:

* источник постоянного стабилизированного напряжения серии HY 3020;
* исследуемый соленоид диаметром 0,114 м длиной *l* = 0,3 м с W = 1980

витками и плоские намагниченные стальные пластины;

* измеритель магнитной индукции РШ-10 с двумя зондами «С» (зонд со- леноида) и «М» (зонд магнитов).

По экспериментальным данным студенты строят картину магнитного поля исследуемых моделей, определяют влияние стального стакана на внутреннее поле соленоида, а также численно, как и в лабораторной работе 3, проверя- ют выполнение граничных условий на его поверхности.

## Порядок проведения исследований

1. В исследуемом соленоиде установить с помощью источника постоян- ного стабилизированного напряжения ток *I =* 0,1 А.
2. Зонд «С» вынуть из металлического защитного чехла и поместить его внутрь соленоида вдоль центральной оси.
3. Перемещая зонд «С» вдоль оси соленоида, провести измерения маг-

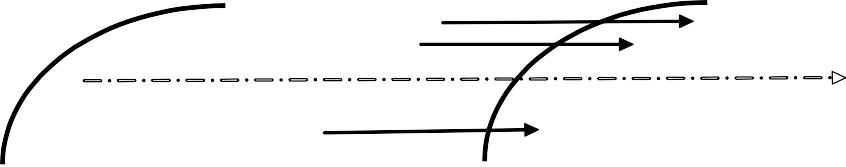
нитной индукции *B*τ (*z*) через 2 см по всей его длине внутри и в пределах

0,1 м во внешней среде. Результаты занести в таблицу.

1. Аналогичные измерения *B*τ (*z*) повторить вдоль образующих цилин-

дрической катушки внутри и вне соленоида у его корпуса вдоль направле- ний II и III (рис. 9.2).

*B*



*z*

0 2 4 6 8 10 1214 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 46 50 I

II

*B* III

50

Рис. 9.2

1. Численно проверить выполнение граничных условий: сумма тангенци- альных составляющих напряженности магнитного поля в средней части внутри и вне соленоида у его корпуса должна равняться поверхностному току

*i*  *IW* .

пов *l*

1. Внутрь катушки поместить стальной стакан и провести измерения

*B*τ (*z*) вдоль направлений I (см. рис. 9.2).

## Содержание отчета

1. Цель работы, схема установки, эскизы катушки с векторными линиями магнитного поля.
2. Таблицы опытных данных *B*τ (*z*) , а также соответствующие графики.
3. Оценка влияния стального стакана на магнитное поле внутри катушки.

## Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Можно ли измерить магнитную индукцию постоянного тока магнитным диполем?
3. Почему при проверке граничных условий берётся сумма магнитных ин- дукций внутри соленоида и во внешней среде?
4. В каком случае происходит размагничивание металлической сферы в постоянном магнитном поле?

## Список литературы

1. Башарин С. А., Федоров В. В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля: Учеб. пособие. М.: Академия, 2010. 340 с.
2. Лабораторный практикум по ТОЭ. Теория электромагнитного поля / Под ред. В. Н. Рудакова. СПб., 1991. 76 с.
3. Демирчян К. С., Чечурин В. Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высш. Шк., 1986.
4. Янке У., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1977.

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)51

# СОДЕРЖАНИЕ

[Предисловие 3](#_TOC_250004)

[Требования к оформлению отчетов 3](#_TOC_250003)

[Лабораторная работа 1. Исследование электромагнитного поля](#_TOC_250002)

[методом электромоделирования 4](#_TOC_250001)

**Лабораторная работа 2.** Моделирование электромагнитного поля численным методом с помощью комплекса программ ELCUT 10

Лабораторная работа 3. Исследование магнитного поля

цилиндрической катушки 15

Лабораторная работа 4. Измерение индуктивностей 21

Лабораторная работа 5. Исследование характеристик электромагнитных волн и параметров веществ

с помощью интерферометра Майкельсона 25

Лабораторная работа 6. Электромагнитное экранирование 33

Лабораторная работа 7. Исследование электромагнитного поля

магнитного осциллятора в ближней зоне 37

Лабораторная работа 8. Исследование электромагнитного поля

в длинных линиях 42

Лабораторная работа 9. Исследование магнитной индукции цилиндрической катушки постоянного тока 48

[Список литературы 51](#_TOC_250000)

52

Федоров Виктор Викторович, Портной Марк Саулович

## Основы электромагнитного поля

Лабораторный практикум по теоретической электротехнике Публикуется в авторской редакции

Подписано в печать 15.03.2011. Формат 60 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 3,3.

Гарнитура «Times New Roman». Тираж 125 экз. Заказ 18.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

[](https://www.studocu.com/ru?utm_campaign=shared-document&utm_source=studocu-document&utm_medium=social_sharing&utm_content=osnovy-elektromagnitnogo-polya)197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5