Минобрнауки России

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«Оренбургский государственный университет»**

Кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники

**Методические указания**

для обучающихся по освоению дисциплины

*«Б1.Д.Б.23 Электродинамика и распространение радиоволн»*

Уровень высшего образования

БАКАЛАВРИАТ

Направление подготовки

*11.03.04 Электроника и наноэлектроника*

(код и наименование направления подготовки)

*Промышленная электроника*

(наименование направленности (профиля) образовательной программы)

Квалификация

*Бакалавр*

Форма обучения

*Очная*

Оренбург, 2020

Составитель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.С. Лелюхин

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники

Заведующий кафедрой ПЭиИИТ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ О.В. Худорожков

Методические указания являются приложением к рабочей программе дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн», зарегистрированной в ЦИТ под учетным номером \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

**1 Общие положения**

Дисциплина «Электродинамика и распространение радиоволн» относится к обязательным дисциплинам (модулям) вариативной части блока 1 «Дисциплины (модули)». Изучается в 3 и 4 семестрах.

В результате изучения дисциплины студент должен:

1) **знать**: основы теории электромагнитного поля; условия возбуждения и источники электромагнитных волн; особенности распространения радиоволн в различных средах;

2) **уметь**: проводить анализ параметров и характеристик электромагнитных излучателей, условий распространения радиоволн;

3) **владеть**: навыками расчета параметров радиотрасс.

**2 Общие методические рекомендации**

Контроль достижения планируемых результатов обучения обеспечивается использованием оценочных средств, представленных в «Фонде оценочных средств» (приложение к рабочей программе дисциплины), в учебном процессе во время занятий по расписанию, а также во время промежуточной аттестации.

**2.1 Теоретический материал, изучаемый при освоении дисциплины**

1. **Базовые математические понятия теории электромагнитного поля** Линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Векторы. Матрицы. Определители. Квадратичные формы. Тензоры. Векторные дифференциальные операторы. Дельта-функция Дирака. Функции комплексного переменного. Ряд и интеграл Фурье.
2. **Исходные понятия и уравнения теории электромагнетизма** Уравнения Максвелла и материальные уравнения. Уравнения Максвелла и основные законы электромагнетизма. Закон сохранения заряда. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Закон Кулона. Закон Гаусса. Закон Био-Савара-Лапласа (в интегральной форме). Первый закон Кирхгофа. Второй закон Кирхгофа. Уравнения Максвелла в симметричной форме. Граничные условия для электромагнитного поля: тангенциальные компоненты поля; нормальные компоненты поля; Вектор и теорема Пойнтинга. Накопление энергии в конденсаторе. Тепловые потери в проводнике. Теорема единственности решения уравнений Максвелла .
3. **Плоские электромагнитные волны, поляризация электромагнитной волны** Векторы поля **E** и **H** в плоской волне, коэффициент фазы, фазовая скорость, коэффициент распространения, фазовый фронт, дисперсия фазовой скорости, коэффициент затухания и характеристическое сопротивление среды, виды поляризации, коэффициент эллиптичности.
4. **Отражение и преломление плоской волны на границе раздела двух сред** Граничные условия для векторов поля, коэффициент отражения, коэффициент преломления.
5. **Элементарные излучатели радиоволн** Поле в ближней зоне, поле в дальней зоне, элементарные электрический и магнитный излучатели, элемент Гюйгенса, характеристики направленности и диаграмма направленности.
6. **Распространение радиоволн в свободном пространстве** Структурная схема радиолинии, КНД антенны, эффективная поверхность и действующая длина антенны, КСВ, погонное затухание кабеля.
7. **Зоны Френеля. Существенная зона распространения радиоволны** Принцип Гюйгенса-Френеля, существенная и минимальная области пространства при распространении радиоволны, радиотрассы.
8. **Распространение радиоволн вблизи поверхности Земли** Электрические свойства земной поверхности, коэффициент отражения, угол скольжения радиоволны, угол Брюстера, коэффициент направленного действия антенны.
9. **Распространение радиоволн в тропосфере и ионосфере** Земная атмосфера, электрические свойства тропосферы, электрические свойства ионосферы, «нормальная» тропосфера, плоскослоистая модель тропосферы, рефракция радиоволн, ионосферные слои и их деление, параболическая модель ионосферного слоя, максимальная частота отражения., критическая частота слоя, траектория радиоволн в ионосфере.

**Внимание!**

Материал, не вынесенный на практические занятия, изучается обучающимися самостоятельно с использованием рекомендуемой литературы.

**Контроль усвоения** изученного теоретического материала осуществляется методом опроса на лабораторных занятиях, а также методом **тестирования**.

Тестирование по разделам 1 – 3 проводится на 7 (8) учебной неделе, по разделам 4 – 6 на 13 (14) учебной неделе, по разделам 7 – 9 – на 17 учебной неделе.

**Рекомендуемая литература**:

1. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика [Текст] : учебник / О. И. Фальковский.- 2-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2009. - 432 с. - Прил.: с. 415-422. - Библиогр.: с. 423-424. - ISBN 978-5-8114-0980-8.

2. Электродинамика и распространение радиоволн [ Электронный ресурс]: Учебное пособие / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын. - М.: НИЦ Инфра-М; Мн.: Нов. знание, 2013. - 424 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972>

**2.2 Лабораторный практикум**

С целью формирования практических навыков в применении теории электромагнитных полей и волн обучающиеся выполняют 8 лабораторных работ. Тематика выполняемых лабораторных работ приведена в рабочей программе дисциплины. Лабораторные работы обучающиеся выполняют под руководством преподавателя с использованием методических рекомендаций, изложенных ниже.

Отчет о выполнении лабораторной работы каждый обучающийся защищает индивидуально. Во время защиты обучающийся должен быть готовым пояснить методику проведения исследований, показать умение анализировать результаты, полученные в ходе проведения исследований, быть готовым ответить на вопросы преподавателя по теме проводимых исследований.

**Крайние сроки защиты** лабораторных работ:

* лабораторные работы № 1, № 2, – 8 учебная неделя;
* лабораторные работы № 3, № 4, – 14 учебная неделя;
* лабораторные работы № 5, № 6, № 7 – 17 учебная неделя.

Лабораторные работы № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 выполняются на виртуальных приборах (ВП), выполненных в среде графического программирования LabVIEW фирмы «National Instruments». LabVIEW - Среда графического программирования: свободно распространяемая лицензия для студентов, для домашнего изучения, доступ: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-30610>. Описание лабораторных работ заимствованы из учебного пособия Евдокимов Ю. К., Линдваль В. Р., Щербаков Г. И. LabVIEW в научных исследованиях //М.: ДМК Пресс. – 2012.

**Примеры заданий**

**Лабораторная работа № 1. Изучение плоской электромагнитной волны и исследование с помощью виртуальной лабораторной установки зависимостей ее характеристик от параметров среды и частоты**

1. **Цель работы.**

Целью работы является изучение плоской электромагнитной волны и исследование с помощью виртуальной лабораторной установки зависимостей её характеристик от параметров среды и частоты.

1. **Подготовка к работе.**

Перед выполнением работы необходимо изучить соответствующий лекционный материал, настоящее описание и, при необходимости, рекомендованную литературу.

1. **Краткие теоретические сведения.**

Монохроматическую электромагнитную волну, фазовые фронты которой представляют собой параллельные друг другу плоскости, называют *плоской волной*. Фазовым фронтом волны называется поверхность, во всех точках которой фаза волны одинакова. Плоскую волну, во всех точках фазового фронта которой вектор *E* имеет одно и то же значение амплитуды и одно и то же направление, называют *однородной плоской волной*. Поскольку у однородной плоской волны векторы поля одинаковы во всех точках плоскости фазового фронта, то они вообще не зависят от координат в этой плоскости.

Договоримся, что в данной работе изучается плоская однородная электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль декартовой координаты *z*, перпендикулярной их фазовым фронтам. Фазовые фронты – волновые плоскости параллельные плоскости *xOy.*  Для однородной плоской волны справедливы соотношения:

, (1)



**Однородная плоская волна в среде без потерь**

Рассмотрим однородную плоскую волну в среде без потерь. Свойства среды описываются абсолютными диэлектрической *εа* и магнитной *μа* проницаемостями.

Векторы и однородной плоской волны удовлетворяют уравнениям Максвелла без сторонних источников. Поэтому в однородной среде без потерь можно определить из системы уравнений (2) с вещественным волновым числом (*,* где *f* – частота колебаний), а – из уравнения (3):



(2)



(3)



Поскольку в однородной плоской волне составляющие могут зависеть только от одной координаты *z*, перпендикулярной плоским волновым поверхностям, то уравнение (2) примет вид:



, , (4)



Дифференциальные уравнения второго порядка для и (4) имеют общие решения:



, (5)



где – произвольные постоянные интегрирования, представляющие собой комплексные амплитуды вектора поля при *z* = 0 (например, ).



Подставляя (5) в (3), определим составляющие :



, , (6)



где – характеристическое сопротивление среды.



Векторы *E* и *H* волны лежат в волновых плоскостях и представляют собой *поперечные* составляющие векторов поля по отношению к направлению распространения. Электромагнитную волну, имеющую только поперечные составляющие векторов *E* и *H*, называют *поперечной электромагнитной волной* или волной *Т* (от латинского слова transversus – поперечный).

Электромагнитное поле (5), (6) представляет собой суперпозицию четырех не зависящих друг от друга бегущих волн, имеющих амплитуды . Две волны с амплитудами и , имеющие знак минус у показателя экспоненты, распространяются в направлении возрастающих значений координаты *z*. Две другие волны с амплитудами и , имеющие знак плюс у показателя экспоненты, распространяются в направлении убывающих значений *z*. Волны, распространяющиеся в одном направлении различаются пространственной ориентацией своих векторов. В остальном свойства этих волн совпадают.



Рассмотрим волну, распространяющуюся в направлении оси *z* и имеющую компоненты поля и .



Мгновенные значения векторов поля этой волны имеют вид:

, (7)



Векторы волны лежат в плоскости фазового фронта. Они перпендикулярны друг другу и образуют с направлением движения волны правую тройку векторов:

, (8)



Векторы *E* и *H* пропорциональны по величине, коэффициент пропорциональности – характеристическое сопротивление среды.



Плотность потока мощности волны даёт вектор Пойнтинга:

(9)



Уравнение постоянной фазы волны (фазового фронта) имеет вид:

(10)



Фазовой скоростью волны *v* называется скорость движения точки с постоянной фазой:

(11)



Длиной волны называют расстояние между фазовыми фронтами, отличающимися по фазе на 2π:



(12)



Коэффициент фазы *k* показывает на сколько меняется фаза волны на единице длины:

, (13)



часто его называют волновым числом.

Приняв время *t =* 0, можно изобразить картину векторов плоской волны на оси *z* в среде без потерь (рис.1). При этом вектора рисуются лишь в одной точке каждого фазового фронта. Эти точки лежат на оси *z*. Во всех остальных точках фазового фронта вектора такие же.



Рис.1. Плоская волна в среде без потерь

**Однородная плоская волна в среде с потерями**

Среда с электрическими потерями характеризуется конечной величиной удельной проводимости . Распространить полученные выше результаты на среду с потерями можно, если в соответствующих формулах для среды без потерь заменить абсолютную диэлектрическую проницаемость комплексной диэлектрической проницаемостью:



, (14)



где – тангенс угла диэлектрических потерь.



При такой замене коэффициент фазы переходит в комплексный коэффициент распространения , который представляют в виде суммы вещественной и мнимой частей:



(15)



Выражение (13) принимает вид:

(16)



Характеристическое сопротивление среды с потерями является комплексной величиной:

, (17)



где модуль и фаза определяются соотношениями:

(18)



(19)



Подставив (15), (17) в соотношения (5) и (6) для волны с амплитудой *A*, имеем:

(20)



(21)



Перейдя от комплексных амплитуд в (20) и (21) к мгновенным значениям, получим:

(22)



(23)



Из (22), (23) следует, что в среде с потерями амплитуды векторов поля однородной плоской волны затухают в направлении распространения по экспоненциальному закону: , . Это затухание обусловлено постепенным поглощением электромагнитной энергии, вызванным преобразованием ее в тепло, и характеризуется мнимой частью коэффициента распространения, которую поэтому называют *коэффициентом затухания*. Единицей измерения *α* является 1/м.



Затухание амплитуд, происходящее при прохождении волной пути *l*, характеризуется отношением . Затухание амплитуд *L*, выраженное в *децибелах* (дБ), определяется как:



(24)



Если в соответствии с этим соотношением ввести измерение коэффициента затухания в *децибелах на метр* (дБ/м) и обозначить его через α′, то получим



Амплитуды векторов поля уменьшаются в *е* = 2,718 раз при прохождении волной расстояния *d = 1/α*. Это расстояние называют *глубиной проникновения* поля в среду, или толщиной скин-слоя. При прохождении волной расстояния в несколько *d* амплитуды векторов поля оказываются настолько сильно уменьшенными, что дальше волна практически не проникает. Например, при прохождении расстояния в 10*d* амплитуды поля уменьшаются в *e*10 = 22026 раз.

Мнимая часть коэффициента распространения определяет изменение фазы векторов поля в направлении распространения и называется *коэффициентом фазы*. Коэффициент фазы измеряют в радианах на метр (рад/м).



Коэффициенты затухания и фазы определяются через параметры среды как:

(25)



(26)



В среде с потерями взаимно перпендикулярные векторы *E* и *H* однородной плоской бегущей волны (22), (23) сдвинуты друг относительно друга по фазе на величину аргумента комплексного характеристического сопротивления и отличаются по амплитуде в раз. На рис.2 изображена структура поля волны в среде с потерями для фиксированного момента времени *t* = 0.



Рис.2. Плоская волна в среде с потерями

Воспользовавшись выражением (26), получим формулу для фазовой скорости:

(27)



Поскольку зависит от *ω* то, согласно (27), фазовая скорость зависит как от параметров среды, так и от частоты колебаний. Явление зависимости фазовой скорости от частоты называют *дисперсией* электромагнитных волн. Различают нормальную и аномальную дисперсии. Если при увеличении частоты колебаний фазовая скорость уменьшается, то дисперсию называют нормальной, если же фазовая скорость увеличивается, то аномальной. Формула (27) характеризует аномальную дисперсию электромагнитных волн.



Согласно определению длины волны

(28)



Приведенные выше соотношения позволяют осуществить моделирование зависимостей характеристик плоской однородной волны от электрических параметров среды, в которой она распространяется.

1. **Описание лабораторной установки.**

Внешний вид лицевой панели виртуальной лабораторной установки приведён на рис.3.

В верхней её части расположен заголовок «Плоская электромагнитная волна» и кнопка останова STOP.

Под ними расположен экран, на котором отображаются продольные зависимости компонент поля волны.

Слева под экраном расположена группа из пяти регуляторов, задающих амплитуду и частоту исследуемой волны, и параметры среды, в которой эта волна распространяется: относительные диэлектрическую и магнитную проницаемости и тангенс угла диэлектрических потерь.

Правее на лицевой панели расположена группа из шести цифровых индикаторов, в которых выводятся параметры волны: длина волны, фазовая скорость, коэффициент затухания, коэффициент фазы, модуль и фаза характеристического сопротивления среды.

Регулятор «Длина шкалы Z» на лицевой панели позволяет улучшить наблюдение зависимостей на экране, изменяя продольный размер экрана.

Непосредственно под экраном расположена группа кнопок, осуществляющих управление перемещением курсора по экрану и переключение курсора с одного на другой график. Справа непосредственно под экраном в двух индикаторах отображаются текущие координаты курсора.

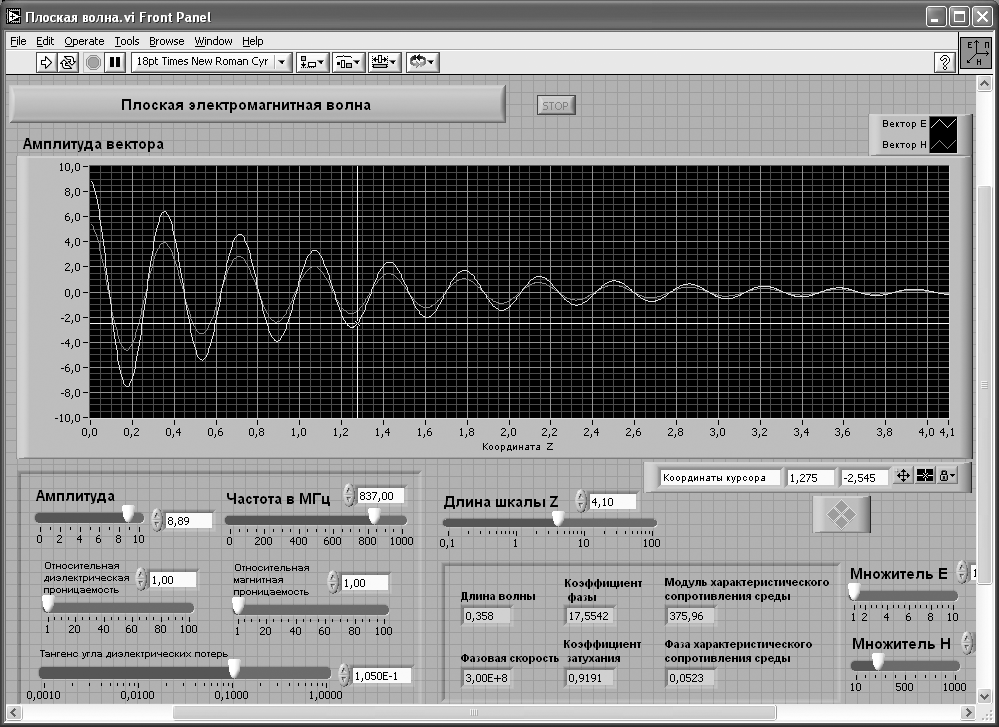


Рис.3. Лицевая панель ВИ «Плоская электромагнитная волна»

Правее всех элементов лицевой панели разместим два регулятора, которыебудут управлять масштабом графиков на экране. Это связано с тем, что значения амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в единицах системы СИ отличаются в сотни раз. Для отображения их на одном экране необходимо вводить масштабные множители для каждого графика. Эти регуляторы названы: «Масштаб Е» и «Масштаб Н».

Включение прибора осуществляется нажатием на двунаправленную стрелку в строке кнопок окна LabVIEW, расположенная правее заголовка кнопка STOP выключает виртуальную лабораторную установку.

**5. Порядок выполнения работы.**

1. Запустить лабораторную установку, ознакомиться с органами управления.
2. Выполнить исследования в соответствии с выбранным вариантом. Исходные параметры для каждого исследования брать в таблице 1. Изменяемые и варьируемые параметры, значения которых отличаются от данных в таблице 1, указаны в описании конкретных исследований.

Таблица 1. Исходные параметры для исследования плоской электромагнитной волны

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Вариант 1** | **Вариант 2** | **Вариант 3** | **Вариант 4** | **Вариант 5** |
| *f*1 (МГц) | 50 | 100 | 200 | 300 | 150 |
| *f*2 (МГц) | 400 | 600 | 800 | 1000 | 500 |
| ε1 | 1 | 20 | 40 | 60 | 10 |
| µ1 | 60 | 40 | 20 | 1 | 2 |
| ε2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 4 |
| µ2 | 8 | 6 | 4 | 2 | 2 |
|  | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.9 |

1. Провести исследования волны в среде без потерь:
   * установить тангенс угла диэлектрических потерь равным 0;
   * установить относительную диэлектрическую проницаемость равную *ε1*;
   * для частот *f1* и *f2* определить зависимости длины волны и характеристического сопротивления от относительной магнитной проницаемости. Данные свести в таблицу;
   * установить относительную магнитную проницаемость равную *µ1*;
   * для частот *f1* и *f2* определить зависимости длины волны и характеристического сопротивления от относительной диэлектрической проницаемости**.** Данные свести в таблицу;
   * построить графики полученных зависимостей.
2. Провести исследования волны в среде с потерями:
   * установить относительную диэлектрическую проницаемость равную *ε1*;
   * установить относительную магнитную проницаемость равную *µ1*;
   * для частот *f1* и *f2*определить зависимости длины волны, коэффициента затухания, коэффициента фазы, модуля и фазы характеристического сопротивления от тангенса угла диэлектрических потерь**.** Данные свести в таблицу;
   * построить графики полученных зависимостей.
3. Провести исследования фазового сдвига между электрическим и магнитным полями волны в среде с потерями:
   * установить относительную диэлектрическую проницаемость равную *ε2*;
   * установить относительную магнитную проницаемость равную *µ2*;
   * установить тангенс угла диэлектрических потерь равным;



* + с помощью курсора определить зависимость фазового сдвига между полями *Е* и *Н* от частоты. Данные свести в таблицу;
  + построить график полученной зависимости.

1. Провести исследование зависимости уменьшения амплитуды поля на расстоянии в 1 метр от частоты, называемое погонным затуханием. Для этого на ряде частот:
   * с помощью курсора замерить уменьшение амплитуды двух максимумов поля и их положения. Данные свести в таблицу;
   * погонное затухание получить расчётом и выразить в дБ/м;
   * построить график полученной зависимости.
2. Объяснить полученные результаты, опираясь на знание теории.
3. Оформить и защитить отчёт по работе.

**6. Требования к отчёту.**

Отчёт оформляется каждым студентом индивидуально. Он должен содержать краткое описание виртуального эксперимента, результаты измерений в виде таблиц и графиков, анализ результатов и выводы.

1. **Контрольные вопросы.**

1. Как связаны по величине и направлению векторы Е и Н в плоской волне?

2. Что такое вектор Пойнтинга?

3. Что такое коэффициент фазы?

4. Как зависит фазовая скорость от параметров среды?

5. Какие параметры характеризуют свойства среды?

6. Как зависит длина волны от параметров среды?

7. Что такое длина волны?

8. Что такое фазовая скорость?

9. Как определить вектор Пойнтинга через вектор Е, через вектор Н, через оба эти вектора?

10. Что такое коэффициент распространения волны?

11. Что такое комплексная диэлектрическая проницаемость?

12. Что такое дисперсия фазовой скорости?

13. Что такое фазовый фронт?

14. Что такое коэффициент затухания?

15. Что такое характеристическое сопротивление среды?

16. Какие значения может принимать фазовый сдвиг между векторами Е и Н в среде с потерями?

17. Каковы частотные зависимости коэффициента затухания и коэффициента затухания?

18. Каковы частотные зависимости длины волны и фазовой скорости?