

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Основы теории электромагнитных полей и волн»
для студентов направления подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

Лабораторная работа №1 Исследование возможностей программ Mathcad и ElectronicsWorkbench для моделирования и исследования электромагнитных полей.

Лабораторная работа №2 Исследование операций над векторными характеристиками физических полей.

Лабораторная работа №3 Моделирование и исследование граничных условий на поверхности раздела сред.

Лабораторная работа №4 Исследование явления падения плоской электромагнитной волны на границу раздела двух сред.

Лабораторная работа №5 Моделирование и исследование элементарных электрических и магнитных излучателей.

Лабораторная работа №6 Моделирование и исследование элементарного щелевого излучателя и элемента Гюйгенса.

Лабораторная работа №7 Моделирование и исследование явления дифракции на круглом цилиндре.

Лабораторная работа №8 Моделирование и исследование явления дифракции на круглом отверстии и полуплоскости.

Лабораторная работа №9 Исследование электромагнитных волн в прямоугольном волноводе.

Лабораторная работа №10 Исследование электромагнитных волн в круглом волноводе.

Лабораторная работа №11 Исследование электромагнитных волн в диэлектрическом волноводе.

ВВЕДЕНИЕ

1. Цели и задачи освоения дисциплины:

Выполнения лабораторных работ по дисциплине « Основы теории электромагнитных полей и волн» обеспечивают формирование у обучающихся набора профессиональных компетенций (ОПК-1, ОПК-2), которые обеспечивают их профессиональную деятельность в области основ теории электромагнитных полей и волн:

1. Способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях; осуществлять компьютерное моделирование электромагнитных полей и волн, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.

2. Способность использовать нормативную и правовую документацию, характерную для области инфокоммуникационных технологий и систем связи.

3. Способностью осуществлять исследования электромагнитных полей и волн в различных средах и направляющих системах.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ИД-1 опк-1 понимает фундаментальные законы природы и основные физические математические законы и методы накопления, передачи и обработки информации.	Понимает фундаментальные законы природы и основные физические математические законы теории электромагнитного поля.
	ИД-2 опк-1 применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера.	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера.
	ИД-3 опк-1 использует знания физики и математики при решении практических задач.	Использует знания физики и математики при решении практических задач.
ОПК-2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ИД-1 опк-2 находит и критически анализирует информацию, необходимую для решения поставленной задачи.	Находит и критически анализирует информацию, необходимую для решения поставленной задачи.
	ИД-2 опк-2 разрабатывает решение конкретной задачи, выбирая оптимальный вариант, оценивая его достоинства и недостатки.	Разрабатывает решение конкретной задачи, выбирая оптимальный вариант, оценивая его достоинства и недостатки.
	ИД-3 опк-2 понимает основные методы и средства проведения экспериментальных исследований, системы стандартизации и сертификации.	Понимает основные методы и средства проведения экспериментальных исследований электромагнитного поля.

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
	ИД-4 ОПК-2 выбирает способы и средства измерений и проводить экспериментальные исследования.	Выбирает способы и средства измерений и проводить экспериментальные исследования.
	ИД-5 ОПК-2 владеет способами обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.	Владеет способами обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование возможностей программ MathCad и ElectronicsWorkbench для моделирования и исследования электромагнитных полей

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

- 1. Исследование возможностей программы Mathcad для моделирования и анализа электромагнитных полей.**
- 2. Исследование возможностей программы Electronics Workbench для моделирования и анализа электрических схем.**

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять основные законы и математический аппарат электродинамики для компьютерного моделирования и анализа электромагнитных полей и волн в различных средах и направляющих системах.

Владеть:

- навыками определения характеристик электромагнитных полей, необходимых при решении практических задач для расчетов радиопокрытия, радиорелейных и спутниковых трасс.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench» и системой компьютерной математики «Mathcad»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Mathcad является уникальной системой для научных и инженерных расчетов и позволяет работать с формулами, числами, текстом и графиками. С помощью системы Mathcad можно решить почти любую математическую задачу символьно либо численно. Mathcad позволяет записывать на экране компьютера формулы в их привычном виде.

Mathcad имеет свою собственную справочную систему. Электронные Книги делают доступными для использования в рабочем документе множество полезных формул, справочных данных и диаграмм простым нажатием кнопки.

Особенности Mathcad:

- Полная совместимость с Windows: изменение размеров окон и их перемещение, открытие нескольких окон, поддержка мыши.
- Возможность комбинирования текста, математических выкладок и графики в любом месте экрана.
- Встроенный алгоритм решения систем уравнений и неравенств.
- Действия с производными и интегралами.
- Вычисление сумм рядов, произведений и итерации.
- Тригонометрические, гиперболические, экспоненциальные и Бесселевы функции.
- Статистические функции, включая линейную регрессию, гамма функцию Эйлера, интеграл ошибок, функции вероятностных распределений.
- Векторы и матрицы, включая операции матричного умножения, обращения, матриц, транспонирования, вычисления определителя матрицы, скалярное и векторное умножение.

- Символьное интегрирование и дифференцирование.
- Обращение, транспонирование и вычисление определителя матриц.
- Многообразие типов графиков: в декартовых координатах, графики в полярных координатах, построение поверхностей в трех измерениях, построение линий уровня, картины векторных полей, трехмерных гистограмм, точечные графики.
- Анимация графиков и любых других объектов рабочего документа. В данном издании практикуме рассматривается русифицированная версия Mathcad 15. Но для универсальности приведены обозначения пунктов меню, окон и т.п. на английском языке.

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ МАТНСАД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

1.1 ИНТЕРФЕЙС МАТНСАД

Интерфейс Mathcad по своей структуре аналогичен интерфейсу других Windows-приложений.

Рабочее окно Mathcad

При открытии файла Mathcad.exe на экране появляется рабочее окно Mathcad с главным меню и пятью панелями: *Standard* (Стандартная), *Formatting* (Форматирование), *Math* (Математическая).

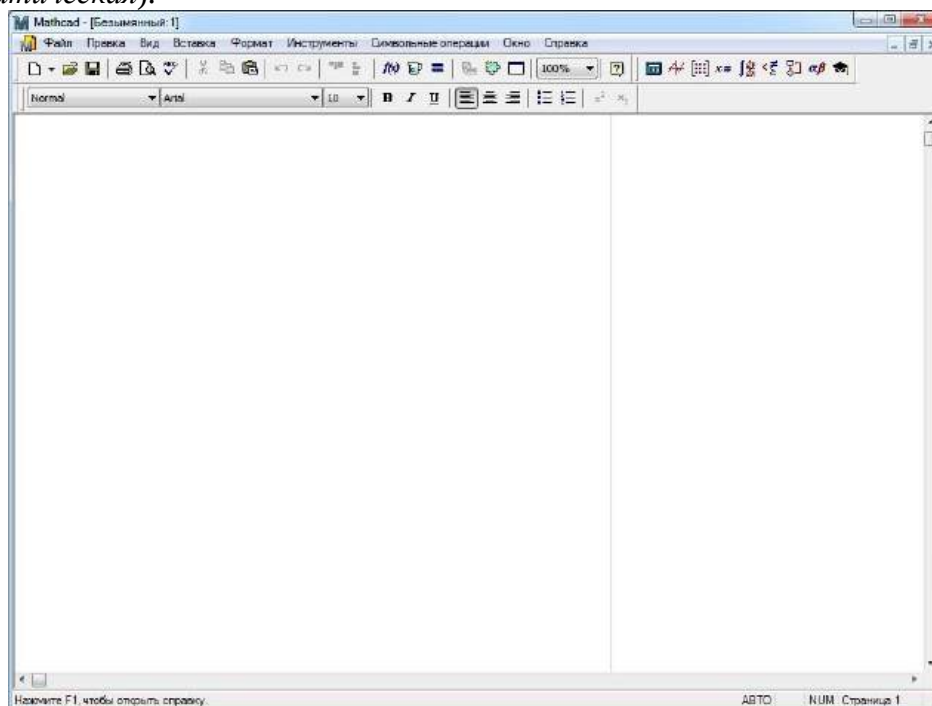
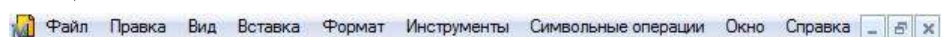


Рисунок 1.1 – Рабочее окно Mathcad

Автоматически загружается файл *Untitled:1* (Безымянный:1), представляющий собой шаблон *Normal* (Обычный) рабочего документа Mathcad, называемого *Worksheet* (Рабочий лист). Кроме того, автоматически загружаются окна *Tip of the day* (Совет дня) и *Mathcad Resource* (Документация Mathcad). Перед началом работы их надо закрыть. В окне *Tip of the day* следует снять флажок *Show tip at startup* (Показывать совет при загрузке) и щелкнуть на кнопке *Close* (Заккрыть).

Главное меню

Главное меню Mathcad занимает верхнюю строку рабочего окна. Все необходимые действия можно выполнить, следуя пунктам этого меню и последовательно открывающихся окон.



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Рисунок 1.2 – Рабочее окно Mathcad

1. Управление рабочим окном Mathcad.
2. *File (Файл)* – команды, связанные с созданием, открытием, сохранением, пересылкой по электронной почте и печатью на принтере файлов с документами.
3. *Edit (Правка)* – команды, относящиеся к правке текста (копирование, вставка, удаление фрагментов и т. д.).
4. *View (Вид)* – команды, управляющие внешним видом документа в рабочем окне Mathcad, а также команды создания файлов анимации.
5. *Insert (Вставка)* – команды вставки различных объектов в документ.
6. *Format (Формат)* – команды форматирования текста, формул и графиков.
7. *Tools (Инструменты)* – команды управления вычислительным процессом.
8. *Symbolics (Символьные вычисления)* – команды символьных вычислений.
9. *Window (Окно)* – команды, позволяющие управлять расположением окон с различными документами на экране.
10. *Help (Помощь)* – команды вызова справочной информации.

Панели инструментов

Math (Математика) служит для вставки математических символов и операторов в документы. Щелчок мышью на любом из значков вызывает вставку на место курсора в рабочем документе соответствующего этому значку символа или шаблона выполнения математической операции.



Рисунок 1.3 – Математическая панель и её подчиненные панели

В состав панели входят:

- ✓ *Calculator (Калькулятор)* – вставка шаблонов основных математических операций, цифр, знаков арифметических операций.
- ✓ *Graph (График)* – вставка шаблонов графиков.
- ✓ *Matrix (Вектор и матрица)* – вставка шаблонов векторов и матриц а также матричных операций.

- ✓ *Evaluation (Вычисления)* – операторы присвоения значений и вывода результатов расчета.
 - ✓ *Calculus (Математический анализ)* – вставка шаблонов дифференцирования, интегрирования, суммирования.
 - ✓ *Boolean (Булева алгебра)* – вставка логических (булевых) операторов.
 - ✓ *Programming (Программирование)* – операторы, необходимые для создания программных модулей.
 - ✓ *Greek (Греческие символы)* – вставка греческих символов.
 - ✓ *Symbolic (Символьные преобразования с ключевыми словами)* – вставка операторов символьных вычислений
 - *Resources (Дополнительные ресурсы)* содержит список электронных книг, включенных в оболочку Mathcad.
 - *Controls (Контроль)* содержит кнопки для дополнительного контроля работы Mathcad-документа.
 - *Debug (Отладка)* появилась в Mathcad 13, служит для трассировки выполнения программ.
 - Панель ресурсов
- В выпадающем меню панели Resources (см. рисунок 1.4) содержится список электронных книг, включенных в пакет Mathcad:

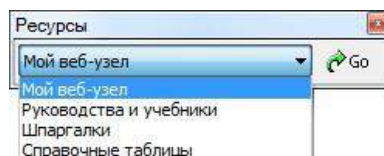


Рисунок 1.4 – Математическая панель и её подчиненные панели

1.2 ВВОД, РЕДАКТИРОВАНИЕ И ФОРМАТИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ

Перед началом работы курсор на экране имеет вид крестика. В момент ввода выражения курсор приобретает вид синего уголка, обрамляющего вводимое выражение. В рабочем документе нужно вводить какие-либо буквенные выражения и присваивать им численные значения. Имя выражения может состоять из латинских, русских, греческих и других букв и цифр, знаков подчеркивания [_], штриха ['], символа процента [%], вводимых с клавиатуры.

Имена переменных и функций не могут начинаться с цифры, знака подчеркивания, штриха, символа процента, не могут включать в себя пробелы. Символ бесконечности может быть только первым символом в имени.

Mathcad не делает различий между именами переменных и функций. Если вначале определить функцию $f(x)$, а затем – переменную f , окажется невозможно использовать $f(x)$ в расчетах где-либо после определения f .

Определение значений переменных

Для того, чтобы можно было вычислить выражение, зависящее от какихлибо переменных, значения этих переменных должны быть определены. Для этого нужно:

1. Ввести имя переменной.



2. Ввести двоеточие [:], что приведёт к появлению знака присваивания (:=) и следующего за ним поля ввода.



3. Напечатать в поле ввода число или выражение. Mathcad вычислит соответствующее значение и присвоит его имени переменной.

$$x := 2$$

Для создания:

- дискретных аргументов – ввести начальное значение, затем точку с запятой [;] для создания знака диапазона и после конечное значение аргумента. При этом шаг приращений по умолчанию будет равен 1. Если задать три значения аргумента, то шаг будет равен разнице между вторым и первым значением аргумента; $x := 1, 3..20$
 $x := 0..5$
- степени – нажать клавишу [^]; x^y
- индексов переменной - ввести точку [.]; x_{y_1}
- индексов массивов – нажать клавишу левой скобки [[];
- матриц, интегралов и т.п. – вызвать необходимую палитру, задать размерности и ввести в поля ввода соответствующую число или выражение.

Определение функции

Функция есть правило, согласно которому проводятся некоторые вычисления с её аргументами и вырабатывается её числовое значение. Для того, чтобы определить функцию, нужно:

1. Ввести имя функции и левую скобку [(].
2. Ввести список аргументов, отделяемых друг от друга запятыми и закончить его правой скобкой [)].
3. Ввести двоеточие [:], что приведет к появлению знака присваивания (:=) и следующего за ним поля ввода.
4. Напечатать в поле ввода выражение.

$$f()$$

$$f(x, y)$$

$$f(x, y) :=$$

$$f(x, y) := x + y$$

Числовые константы. Ввод греческих букв

Введенная с клавиатуры латинская буква *e* внутри математического выражения означает основание натурального логарифма, $e=2,718$. Это значение можно отменить и присвоить *e* другое значение, используя знак локального присваивания (:=), например: $e:=2$.

Знак бесконечности ∞ можно вставить с математической панели *Математический анализ*.

Часто используемое в выражениях число π можно набрать с математической панели Calculator (Калькулятор), где есть кнопка π , или нажать аналогичную кнопку панели греческих букв.

Греческие буквы	α	β	χ	δ	ε	η	γ	λ	μ	ν	ω	θ	π	ψ	ρ	ζ	η	θ	ξ	ς
Латинские аналоги	a	b	c	d	e	h	g	l	m	n	w	f	p	y	r	s	t	q	x	z

Если какой-либо константе или переменной не присвоено никакого значения левее и выше ее положения на экране, то она окрашена в красный цвет, что свидетельствует об ошибке.

Дискретные переменные. Построение таблиц

Выражение «дискретная переменная» – диапазон изменения переменной:

вместо непрерывной переменной используется ряд чисел, выстроенных в порядке возрастания или убывания. Дискретная переменная задает ряд значений переменной, для которых вычисляется функция пользователя. Этот ряд значений функции можно вывести в виде графика или таблицы.

Определение дискретной переменной имеет вид $x := 0..5$, что означает задание ряда значений $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5$.

Дискретная переменная может задавать как целые, так и дробные значения переменной, но обязательно равноотстоящие друг от друга, например:

- $x := 0..5$ – ряд целых чисел от 0 до 5;
- $x := 1,1..1,5$ – ряд дробных чисел, где 1 – первое число, 1,1 – второе число, 5 – последнее число. Интервал между числами $1,1 - 1 = 0,1$;
- $x := \min, \min + \Delta.. \max$ – ряд чисел, где $\min$ – первое, Δ – шаг (интервал), $\max$ – последнее число ($\min$, Δ и $\max$ должны быть заданы заранее). Такая форма записи удобна, когда рассматриваются разные варианты одного расчета и изменение констант позволяет мгновенно пересчитать результаты и перестроить графики. Если константы, входящие в правую часть функции пользователя, не задаются непосредственно перед использованием функции, Mathcad берет их значения, использовавшиеся в последний раз перед данным расчетом. Необходимо проверить эти значения. Следует набрать имя параметра и нажать клавишу (=).

1.3 ВЕКТОРЫ И МАТРИЦЫ.

Создание массивов

Есть три способа создания массива чисел:

1. Заполнение шаблона матрицы, содержащего пустые места ввода чисел, что подходит для ввода небольших массивов (не более 100 элементов).
2. Использование дискретной переменной. Этот метод подходит, когда есть явная формула для вычисления элементов массива.
3. Считывание данных из файлов.

Заполнение матрицы по шаблону

1. Установить курсор в то место, где надо создать матрицу.
2. Щелкнуть на кнопке математической панели *Vector and Matrix Toolbar* (*Векторы и матрицы*), а в появившейся панели инструментов щелкнуть на кнопке *Matrix or Vector* (*Матрица или вектор*). Можно в главном меню Mathcad выбрать команду *Insert* → *Matrix* (*Вставка* → *Матрица*) или нажать комбинацию клавиш **[Ctrl]+[m]**.
3. В появившемся диалоговом окне вписать число строк (*Rows*) и число столбцов (*Columns*), а затем щелкнуть на кнопке *OK*. На месте курсора появится шаблон матрицы.

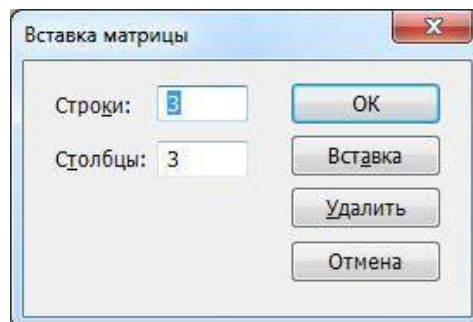


Рисунок 1.5 – Диалоговое окно «Вставка матрицы»

4. В каждое место ввода вписать число, буквенную константу или функцию. Переход от одного места ввода к другому осуществляется клавишами со стрелками. Можно также щелкнуть мышью на нужном месте ввода, но это не так удобно, как перемещение с помощью клавиш.

Изменение размеров матрицы

Можно изменять размер матрицы, вставляя и удаляя строки и столбцы:

1. Щелкнуть мышью на крайнем элементе матрицы. Синий уголок курсора должен находиться справа от выделенного элемента.
2. Выбрать значок матрицы в математическом меню или нажать комбинацию клавиш **[Ctrl]+[m]**. В появившемся окне вписать число строк и столбцов, которые необходимо вставить или удалить.
3. Щелкнуть на кнопке *Insert (Вставить)* или *Delete (Удалить)*, затем на *OK*. Если необходимо вставить или удалить одну строку, то надо вписать количество строк – 1, количество столбцов – 0 и выбрать пункт.
Чтобы удалить всю матрицу, следует выделить ее черным цветом и нажать клавишу **[Delete]** (для безвозвратного удаления) или выбрать *Cut* на стандартной панели Mathcad (чтобы вырезать в буфер). Можно также выбрать команду *Cut* в контекстном меню, появляющемся при щелчке на выделенной матрице правой кнопкой мыши.

Встроенная переменная ORIGIN

Начало нумерации элементов в векторах и матрицах определяется встроенной переменной **ORIGIN**. По умолчанию **ORIGIN=0**, то есть первый элемент вектора, первая строка и первый столбец матрицы имеют индекс нуль.

Чтобы изменить нумерацию индексов в первой строке документа, необходимо набрать (прописными буквами) **ORIGIN:=1**. Можно переопределить встроенную переменную **ORIGIN** другим способом. Для этого необходимо выбрать в главном меню команду *Tools → Worksheet Options (Инструменты → Параметры документа)*, в открывшемся окне перейти на вкладку *Built-in Variables (Встроенные переменные)* и в поле *Array Origin (ORIGIN)* ввести индекс первого элемента массива. Переменной **ORIGIN** можно присваивать разные значения, в том числе отрицательные.

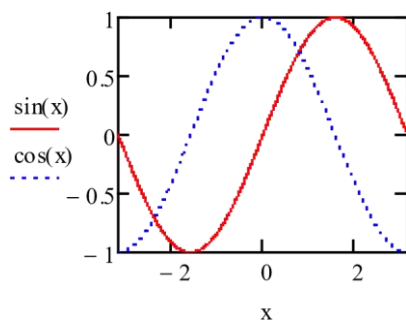
В Mathcad есть встроенные функции, в алгоритм которых по умолчанию включены величины с нулевым индексом, например, **mean** (вычисление среднего значения) или **fft** (разложение в ряд Фурье). Если **ORIGIN:=1** введено с клавиатуры, неизбежна ошибка в расчетах.

1.4 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ФУНКЦИЙ И ПОВЕРХНОСТЕЙ

Построение двумерного плоского графика

Для построения графика функции необходимо:

1. Ввести уравнение функции
2. Установить крестообразный курсор туда, где надо построить график.
3. На математической панели щелкнуть на кнопке *Graph Toolbar (Панель графиков)*, а на открывшейся панели – на кнопке с изображением плоского графика.
4. В появившемся на месте курсора шаблоне плоского графика ввести на оси абсцисс имя аргумента, на оси ординат – имя функции.
5. Щелкнуть мышью вне шаблона графика. График построен для заданного диапазона изменения аргумента.
Если диапазон значений аргумента не задан, по умолчанию график будет построен в диапазоне значений аргумента от -10 до 10.



Чтобы в одном шаблоне разместить несколько графиков, необходимо, набрав на оси ординат имя первой функции, нажать клавишу «запятая» (уголок курсора при этом обязательно должен находиться в конце имени функции). В появившемся месте ввода (черном квадрате) вписать имя второй функции и т.д. Если две функции имеют разные аргументы, например, $f_1(x)$ и $f_2(y)$, то на оси ординат нужно ввести (через запятую) имена обеих функций, а на оси абсцисс (также через запятую) – имена обоих аргументов, x и y . Тогда первый график будет построен для первой функции по первому аргументу, а второй график – для второй функции по второму аргументу. Если функций введено несколько, а аргументов – 2, то график первой функции строится по первому аргументу, а графики остальных функций – по второму.

Форматирование двумерных графиков

Чтобы отформатировать график необходимо сделать двойной щелчок мышью в поле графика – откроется окно форматирования графика (см. рисунок 4.4). Выбирая различные пункты меню (щелкнув на них мышью, а затем на кнопке *Применить* или *ОК*) можно заметить, как изменится при этом вид графика.

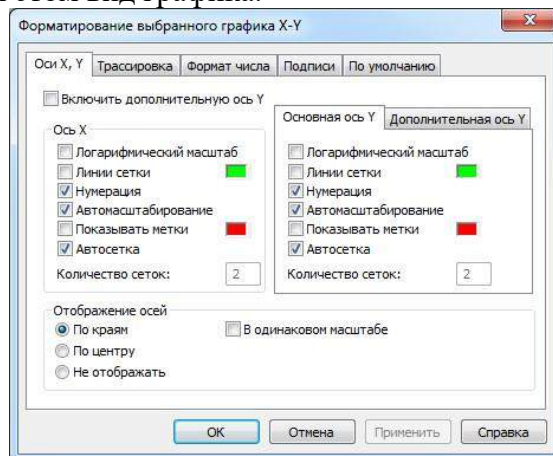


Рисунок 1.6 – Вкладка «Оси X,Y»

В открывшемся окне (см. рисунок 1.6) располагаются заголовки пяти вкладок:

1. *X-Y Axes (Оси X-Y)* – предназначена для форматирования осей координат: нанесения сетки линий, проставления численные значения; проведение ось абсцисс через ноль ординаты (*Crossed – По центру*) или по нижнему краю графика (*Boxed – По краям*), нанести метки на графике. Для выбора необходимых

пунктов необходимо щелкните на них мышью (отметить их флажком).

- *Log Scale (Логарифмический масштаб)* – представить численные значения на осях в логарифмической шкале. По умолчанию численные значения наносятся в равномерной шкале;
- *Grid Lines (Линии сетки)* – нанести сетку линий;
- *Numbered (Нумерация)* – нанести численные значения для каждой линии сетки;
- *Auto Scale (Автомасштабирование)* – автоматически выбирает предельные численные значения на осях, большие максимальных вычисленных значений. Если этот пункт не отмечен, предельными будут максимальные вычисленные значения;
- *Show Markers (Показать метки)* – нанести метки на графике. На каждой оси появляются два места ввода, в которые можно ввести численные значения (можно не вводить ничего или ввести одно число или буквенные обозначения констант). На графике

появятся горизонтальные или вертикальные пунктирные линии, соответствующие указанному значению на оси. В конце этой линии появляется само число.

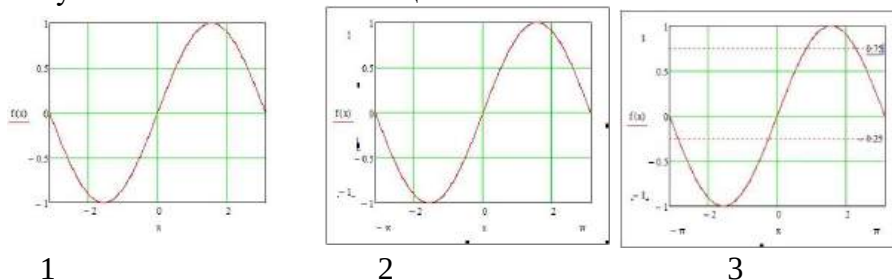


Рисунок 1.7 – Добавление меток на график, где 1 – изначальный график, 2 – добавление меток на оси Y, 3 – ввод данных и конечный результат

- *Autogrid (Автосетка)* – количество линий сетки выбирается автоматически. Если пункт не отмечен, надо задать количество линий Number of Grids (Количество сеток). Имеется возможность нанести численные значения как слева, так и справа от графика. Если это необходимо, следует поставить флажок на пункте *Enable Secondary Y-axis (Включить дополнительную ось Y)*. С

правой стороны графика появится *Place-holder (Место ввода)*, куда надо вписать имя функции, выводимой на график.

2. *Trace (Трассировка)* – служит для форматирования графиков функций.

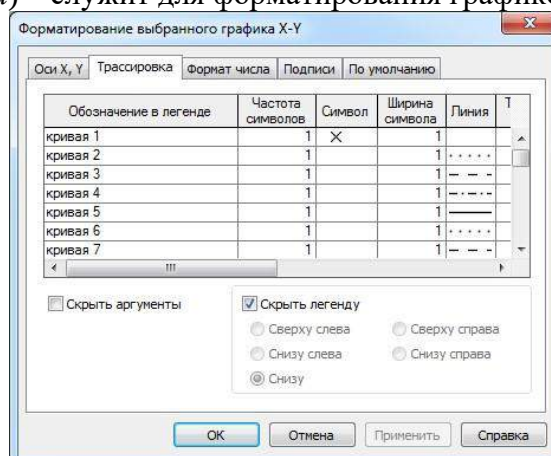


Рисунок 1.8 – Вкладка «Трассировка»

Для каждого графика в отдельности задаются:

- *Symbol Frequency (Частота символов)* – на графике можно отмечать не все расчетные точки, а через одну, через 2 и т. д.;
- *Symbol (Символ)* – обозначение расчетных точек на графике (выбрать круг, крест, прямоугольник, ромб);
- *Symbol Weight (Ширина символа)* – размер значка, которым обозначается расчетная точка;
- *Line (Линия)* – вид линии: *Solid* – сплошная, *Dot* – Пунктир, *Dash* – Длинный пунктир, *Dadot* – Штрих-пунктир;
- *Line Weight (Толщина линии)* – толщина линии;
- *Color (Цвет)* – цвет линии;
- *Type (Тип)* – тип графика: *Lines* – Линия, *Points* – Точки, *Bar* или *Solid-bar* – Столбы, *Step* – Ступенчатый график и др.;
- *Y-Axis (Ось Y)* – в этой колонке Mathcad сам проставляет Y или Y2 в зависимости от того, слева или справа будут выведены численные значения функции.

3. *Number Format (Формат чисел)* – формат чисел, выводимых на графике.

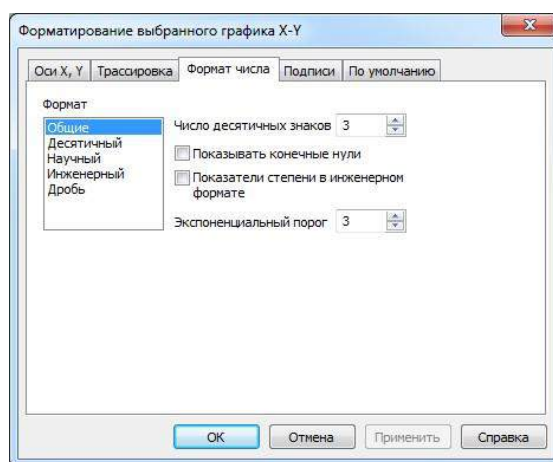


Рисунок 1.9 – Вкладка «Формат числа»

4. *Labels (Заголовки)* – вписать в область графика заголовок. В окне *Title (Заголовок)* нужно записать текст заголовка, выбрать его положение – сверху или внизу графика. Указать, если необходимо, названия осей (*Axis Label*).

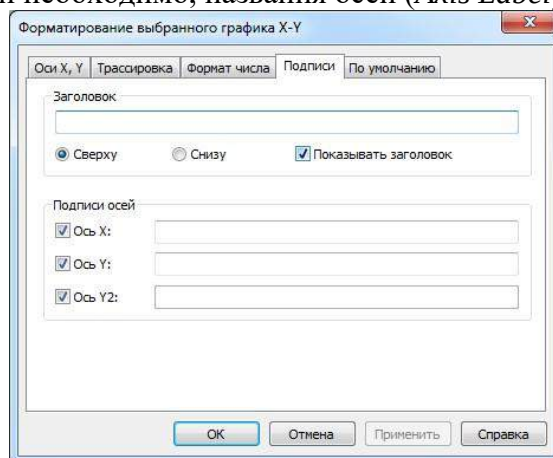


Рисунок 1.10 – Вкладка «Подписи»

5. *Defaults (По умолчанию)* – вернуться к виду графика, принятому по умолчанию (*Change to default*), либо использовать по умолчанию для всех графиков данного документа (*Use for default*) выполненные изменения.

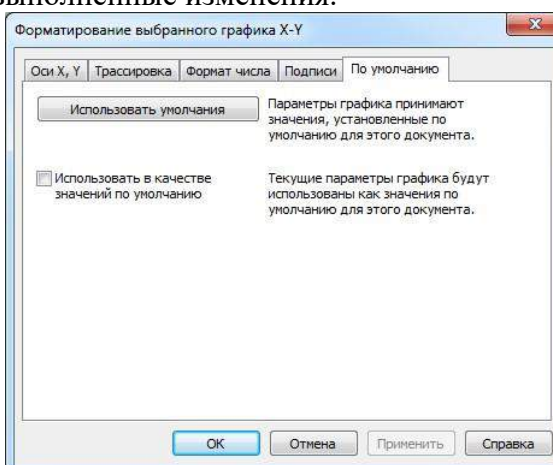


Рисунок .11 – Вкладка «По умолчанию»

Масштабирование графиков

Для изменения масштаба графика необходимо:

1. Поместить курсор в поле графика и нажать правую кнопку мыши. В открывшемся контекстном меню выбрать *Zoom (Масштаб)*.
2. Обвести пунктирной линией при нажатой левой кнопке мыши область графика, которую необходимо увеличить.
3. В открытом окне *X-Y Zoom (Масштаб по осям X-Y)* нажать кнопку *Zoom (Масштабировать)*. Выделенная область увеличится до размеров всей рамки графика.

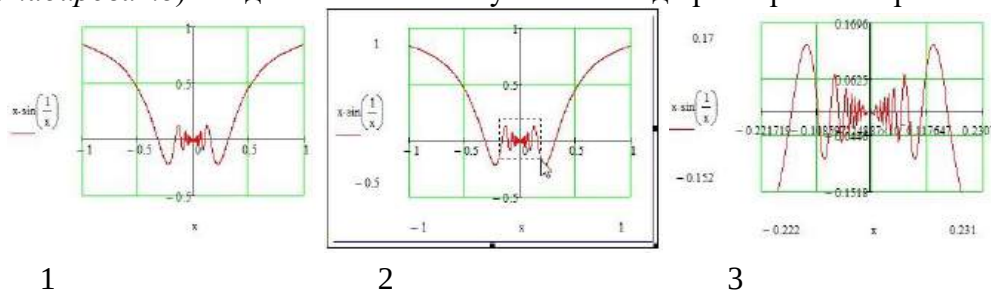


Рисунок 1.12 – Масштабирование графика, где 1 – изначальный график, 2 –выбор области масштабирования, 3 – конечный результат.

Если необходимо вернуться к исходному виду графика, нужно нажать *Unzoom (Отменить масштабирование)* или *Full View (Вид полностью)*. Если надо оставить увеличенное изображение, следует нажать кнопку ОК.

В контекстном меню, открывающемся при нажатии правой кнопки мыши, есть пункт *Trace (Трассировка)*. Выбор этого пункта вызывает появление окна трассировки X-Y Trace. Далее нужно щелкнуть левой кнопкой мыши на графике. На острие курсора появится перекрестье пунктирных линий, перемещающееся при движении курсора при нажатой левой кнопке мыши. Одновременно в окне X-Y Trace изменяются цифры, указывающие координаты перекрестья. Установив перекрестье на нужную точку графика, можно скопировать его координаты в буфер обмена и затем вставить в документ для использования в расчетах. Если поставлен флажок *Track Data Points (Отслеживать точки данных)*, то перекрестье скачет от точки к точке. Если снять этот флажок, движение перекрестья будет плавным.

Изменение размеров и перемещение графиков

Чтобы изменить размеры графика, нужно:

1. Щелкнуть мышью в поле графика.
2. Подвести указатель мыши к одному из черных квадратов на краю графика.
3. При появлении двунаправленной стрелки нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, переместить край графика в нужное место.

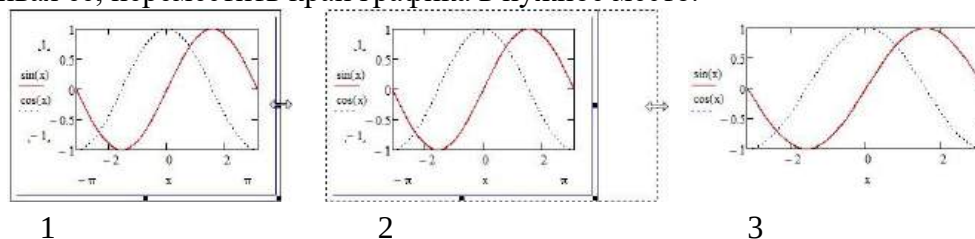


Рисунок 1.13 – Этапы изменения размера графика, где 1 – выделение графика, 2 – растягивание вдоль, 3 – конечный результат.

Чтобы переместить график, нужно:

1. Щелкнуть мышью в поле графика;
2. Подвести указатель мыши к краю графика;
3. При появлении черной ладошки нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, переместить край графика в нужное место.

живая ее, переместить график в нужное место.

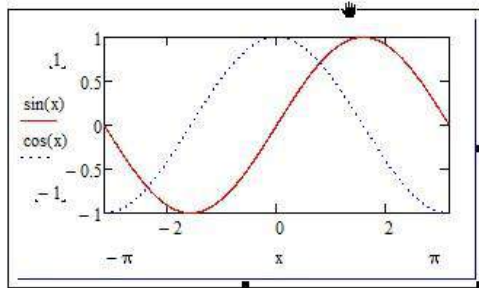


Рисунок 1.14 – Перемещение графика

Если объекты (выражения, графики) перекрывают друг друга, в контекстном меню появляются пункты *Bring to Front* (*Выдвинуть на передний план*) и *Send to Back* (*Убрать на задний план*). Использование этих пунктов позволяет экономить место в документе, специально накладывая края объектов один на другой.

Если необходимо раздвинуть наложившиеся друг на друга объекты, следует выделить их, перечеркнув мышью при нажатой левой кнопке. Все выделенные объекты будут обведены пунктирной рамкой. В главном меню Mathcad следует выбрать *Format* → *Separate Region* (*Формат* → *Разделить области*). При этом будут раздвинуты только выделенные области.

Построение полярных графиков

Чтобы построить график функции в полярных координатах необходимо:

1. В панели графиков *Graph Toolbar* щелкнуть на кнопке, изображающей полярный график.
2. В местах ввода ввести: внизу – угловой аргумент функции, слева – имя функции для построения обычного графика. Для построения параметрического графика нужно ввести в обоих местах ввода имена функций углового аргумента.

Форматирование полярных графиков аналогично форматированию плоских графиков. Полярные графики, как и плоские, можно строить в обычных и в логарифмических координатах.

Для построения графика в логарифмических координатах в окне форматирования графика надо отметить флажком пункт *Log Scale* (*Логарифмический масштаб*).

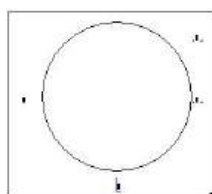
Пример:

Построить в полярных координатах с шагом в 6 градусов график функции $f(\alpha) = \cos(2\alpha)$

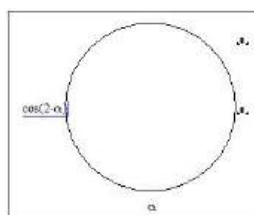
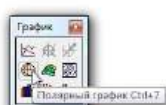
1. Ввод диапазона

$$\alpha := 0, \frac{\pi}{30} .. 2 \cdot \pi$$

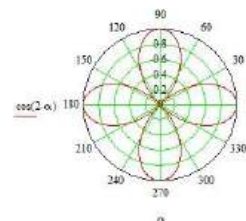
2. Создание графика функции



1



2



3

Рисунок 1.15 – Этапы построения графика в полярных координатах, где 1 – выбор графика поверхности, 2 – ввод функции и углового аргумента, 3 – завершение построения графика

Построение трехмерных графиков

Для построения трехмерного графика необходимо:

1. Набрать имя функции двух переменных, знак присвоения значения($:=$) и выражение функции.
2. Установить курсор в то место, где необходимо построить график.
3. В математической панели щелкнуть мышью на кнопке *Graph Toolbar (Панель графиков)*, изображающей график, затем на *Surface Plot (График поверхности)*. На месте курсора появится шаблон трехмерного графика.
4. В единственном поле ввода шаблона графика ввести имя функции.
5. Щелкнуть мышью вне области шаблона. График построен.

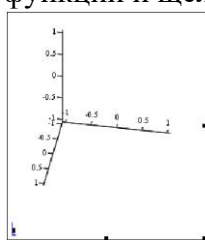
Пример:

Построить график функции $f(x, y) = x^2 * y^2$

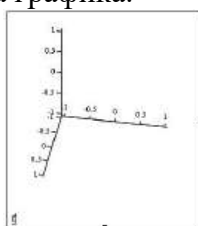
1. Ввод функции

$$f(x, y) = x^2 * y^2$$

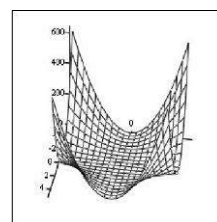
2. Выбрать кнопку построения графика поверхности, затем ввести имя функции и щелкнуть вне шаблона графика.



1



2



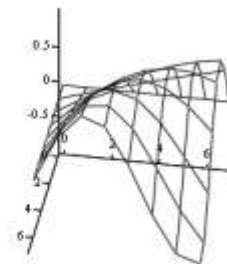
3

Рисунок 1.16 – Этапы построения графика поверхности, где 1 – выбор 1 графика поверхности, 2 – ввод имени функции, 3 – завершение построения графика

Кроме описанного способа ускоренного построения графика поверхности по функции двух переменных существует и часто применяется другой способ создания графика поверхности – с использованием массива численных значений функции. Для этого необходимо:

1. С помощью дискретных переменных ввести значения обоих аргументов заданной функции.
2. Ввести массив, элементами которого являются значения функции, вычисленные при заданных значениях аргументов.
3. Повторить п. 3-5 последовательности построения трехмерного графика

$$\begin{aligned} i &:= 0..7 & j &:= 0..7 \\ X_i &:= 0.5i & Y_j &:= 0.2j \\ Z_{i,j} &:= \sin(X_i \cdot Y_j) \end{aligned}$$



z

Рисунок 4.13 – Построение графика поверхности при помощи использования массива численных значений

Форматирование трехмерных графиков

Чтобы попасть в окно форматирования графика необходимо сделать двойной щелчок мышью в поле графика. В данном окне можно настроить:

- Выбрав пункт *Appearance* → *Fill surface* → *Colormap* (*Оформление* → *Поверхность с заливкой* → *Карта цветов*) и щелкнув мышью на кнопке *Применить* можно сделать график цветным.
- Для придания эффекта освещения нужно выбрать в окне форматирования пункт *Lighting* → *Enable Lighting* → *On* (*Подсветка* → *Необходима подсветка* → *Включить подсветку*). Далее нужно выбрать схему освещения (*Lighting schema*). В выпадающем меню находится 6 различных схем.

График векторного поля

Векторное представление функции создается построением коротких стрелочек – векторов. Стрелочка направлена в сторону возрастания высоты поверхности (увеличения значений функции). Плотность стрелок зависит от скорости изменения функции, то есть от ее градиента. Длина стрелочки пропорциональна модулю вектора. Такого вида графики удобно приводить при расчете различных полей: электромагнитных, тепловых, гравитационных и т. д.

При построении векторного поля требуется задать двухмерный массив

значений функции в заданных точках. На рисунке 4.22 показано векторное поле – поток функции G , у которой проекции на осях X и Y – это H_1 и H_2 соответственно. Иногда удобно представить функцию как матрицу комплексных чисел, где одна из проекций вектора – его вещественная часть, другая проекция – мнимая часть.

```

F1(x,y) := sin(x*y)  F2(x,y) := cos(x*y)  n := 10  m := 10
i := 0..n  j := 0..m  xi :=  $\frac{\pi}{2 \cdot n} \cdot i$   yj :=  $\frac{\pi}{2 \cdot m} \cdot j$ 
H1i,j := F1(xi, yj)  H2i,j := F2(xi, yj)  Gi,j := H1i,j + i * H2i,j

```

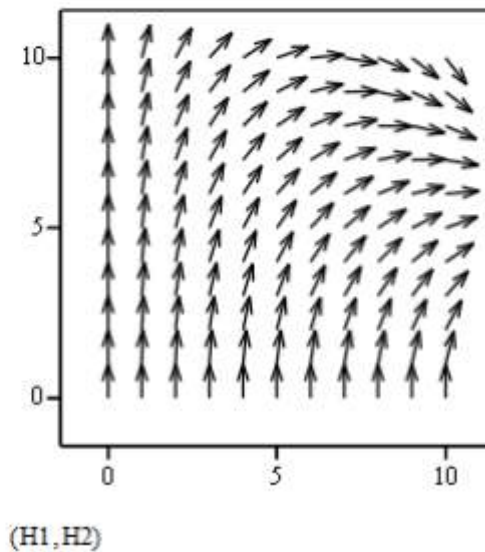


Рисунок 1.17 – Пример построения графика векторного поля

Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

Задания для работы:

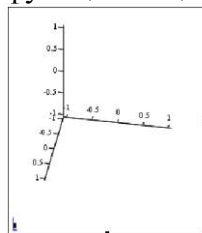
1. Построить график функции $f(x, y) = x^2 * y^2$

Для этого выполнить следующие действия:

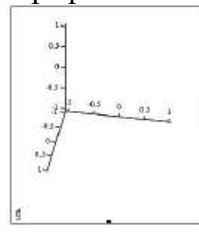
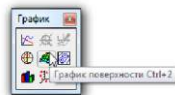
- Ввести функцию:

$$f(x, y) = x^2 * y^2$$

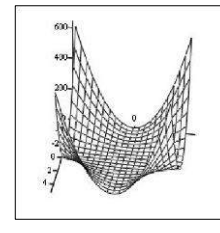
- Выбрать кнопку построения графика поверхности, затем ввести имя функции и щелкнуть вне шаблона графика.



1



2



3

Рисунок 1.16 – Этапы построения графика поверхности, где 1 – выбор 1 графика поверхности, 2 – ввод имени функции, 3 – завершение построения графика

2. Построить в полярных координатах с шагом в 6 градусов график функции $f(\alpha) = \cos(2\alpha)$

- Ввести диапазон:

$$\alpha := 0, \frac{\pi}{30} .. 2 \cdot \pi$$

- Создать график функции:

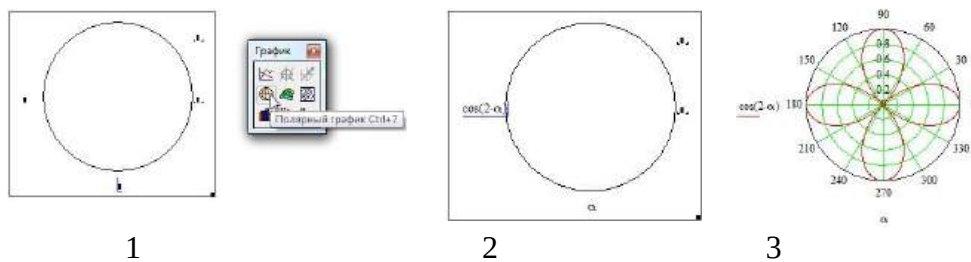


Рисунок 1.15 – Этапы построения графика в полярных координатах, где 1 – выбор графика поверхности, 2 – ввод функции и углового аргумента, 3 – завершение построения графика

3. Построить график функции $f(x) = \sin(x)$.
 Для этого выполнить следующие действия:
- Ввести функцию $f(x) := \sin(x)$
 - Выбрать кнопку построения плоского графика, затем ввести имена осей и щелкнуть вне шаблона графика.

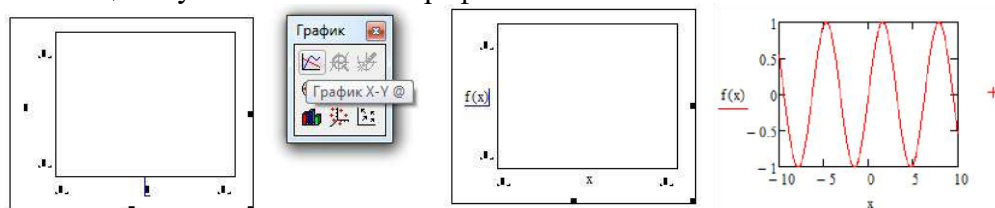


Рисунок 4.1 – Этапы построения графика

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ ELECTRONICSWORKBENCH ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ.

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

2.1 ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ

После запуска программы перед вами появиться окно, внешний вид которого представлен на рис.2.1. Рассмотрим в первую очередь внешний интерфейс программы «Electronics Workbench».

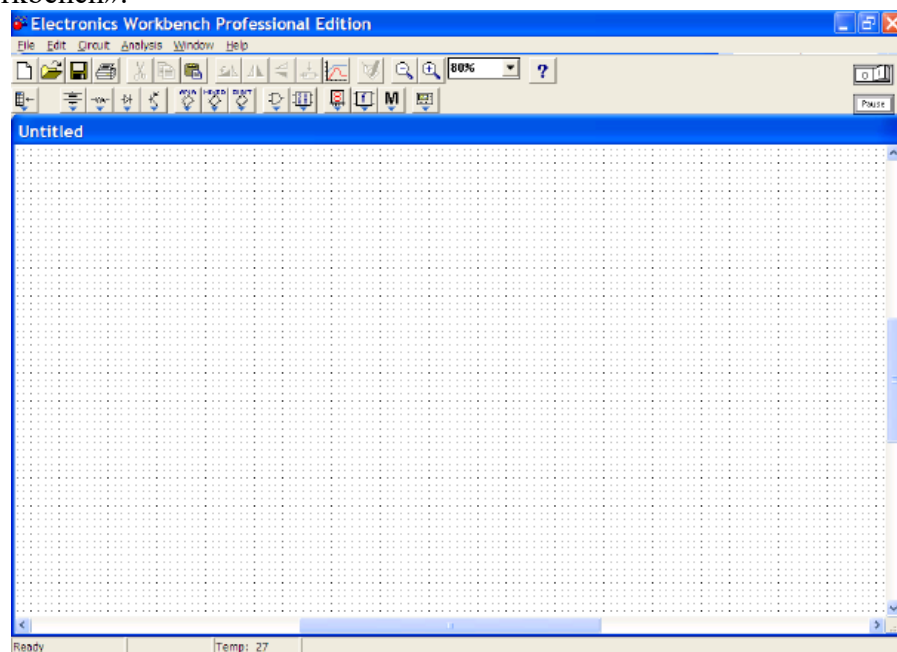


Рисунок 2.1 – Окно программы Electronics Workbench

Первое что вы увидите, запустив программу, это «монтажный стол», на котором собирается модель исследуемой схемы. В самом низу окна находится строка состояния, на которой индицируются параметры моделирования и готовность программы к выполнению действий. При запуске симуляции схемы там будет показываться имитационное время (это время, которое займет моделируемый процесс при работе реального устройства). Время моделирования зависит от сложности схемы и количества элементов в ней.

Сверху располагаются панели инструментов и меню программы. На панелях инструментов находятся библиотеки компонентов и кнопки, обеспечивающие необходимые действия при сборке схем и управлении программой.

Интерфейс программы построен таким образом, что пользователь работает с программой, используя в основном панели инструментов, поэтому с них мы и начнем знакомство с программой.

Рассмотрим кратко назначение кнопок панелей инструментов.



(New) – создать новый файл.



(Open) – открыть существующий файл.



(Save) – сохранить файл.



(Print) – печать файла.



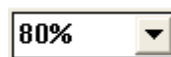
(Display graphs) – выводит на экран окно отображения результатов моделирования. В этом окне можно посмотреть показания всех приборов подключенных к схеме, и графики, полученные в результате анализа схемы (например, анализ Фурье, график переходного процесса, напряжения в узлах схемы, осциллограммы напряжений и т.д.), напряжения в узлах схемы и т.д.



(Zoom out) и



(Zoom in), а так же меню



(Scale factor) –

позволяют выбирать масштаб создаваемой (просматриваемой) схемы.



(Help) – просмотр справки (если при этом выделен некоторый компонент схемы, то будет выдаваться справка именно по этому компоненту).



(Paste) – вставить из буфера обмена.



(Activate simulation) – кнопка запуска симуляции схемы.



(Pause simulation) – кнопка временной остановки симуляции. Повторное нажатие этой кнопки возобновляет симуляцию с места остановки.

Кнопки, приведенные ниже, становятся активными только при выделении определенного компонента (или группы компонентов) схемы:



(Cut) – вырезать в буфер обмена.



(Copy) – копировать в буфер обмена.



(Rotate) – вращать выделенный компонент.



(Flip horizontal) –отразить выделенный компонент по горизонтали.



(Flip vertical) –отразить выделенный компонент по вертикали.



(Create subcircuit) – создать подсхему (эта кнопка позволяет объединить выделенные компоненты в один блок, что в ряде случаев очень удобно).



(Component properties) – параметры компонента.

Стоит так же рассказать о содержимом различных меню программы, так как некоторые действия можно выполнить только с их помощью (анализ Фурье, настройка опций симуляции, копирование схемы как рисунок и т.д.).

Меню «**File**» содержит следующие пункты:

- New (создать новый документ): создает новый документ.
- Open (открыть документ): с помощью этого пункта можно открыть существующие файлы схем.
- Save (сохранить документ): этот пункт меню позволяет сохранить документ в формате версий программы 5.0с или 5.1.
- Save as (сохранить документ как): позволяет сохранить документ под другим именем или поменять версию файла.
- Revert to saved (возвратится к сохраненному документу): позволяет отменить все изменения, сделанные в схеме вплоть до последнего сохранения.
- Import (импорт файла): импортирует файл из формата SPICE [*.CIR]
- Export (экспорт файла): экспортирует файл в формате SPICE [*.CIR] и EWB Layout [*.PCL]
- Print (печать документа): позволяет распечатать схему.
- Print setup (параметры печати): установка опций печати.
- Exit (выход): выход из программы.
- Install (установить): позволяет устанавливать обновление для программы.

Назначение трех последних пунктов разъяснять не буду, потому что и так ясно их назначение и мало вероятно, что их будут использовать.

- Export to PCB (экспорт в PCB)
- Import from SPICE (импорт из SPICE)
- Export to SPICE (экспорт в SPICE)

Меню «**Edit**» содержит такие пункты как:

- Cut (вырезать): удаляет выделенный компонент (или группу компонентов) в буфер обмена.
- Copy (копировать): копирует выделенный компонент (или группу компонентов) в буфер обмена.
- Paste (вставить): вставляет компонент (или группу компонентов) из буфера обмена в схему.
- Delete (удалить): удаляет выделенный компонент (группу компонентов).
- Select all (выделить все): выделить все элементы на схеме.
- Copy as bitmap (копировать как рисунок в формате BMP): эта команда копирует часть схемы как рисунок в формате BMP в буфер обмена.
- Show clipboard (просмотр содержимого буфера обмена): открывает папку обмена. Содержимое буфера обмена можно сохранить не только на странице папки обмена, но и в виде отдельного файла буфера обмена.

Меню «**Circuit**» позволяет выполнять операции над компонентами и настройками отображения схемы. Меню содержит следующие разделы:

- Rotate (вращать): поворот выделенного компонента (или группы компонентов) на 90° против часовой стрелки.
- Flip horizontal (отразить по горизонтали): зеркально отображает выделенный элемент схемы по горизонтали.
- Flip vertical (отразить по вертикали): зеркально отображает выделенный элемент схемы по вертикали.
- Component properties (свойства компонента): открывает окно свойств выделенного компонента.

- Create subcircuit (создать подсхему): создает подсхему из выделенных компонентов (объединяет их в блок).
- Zoom in (увеличить масштаб): увеличить масштаб схемы.
- Zoom out (уменьшить масштаб): уменьшить масштаб схемы.
- Schematic options (Свойства схемы): выводит окно свойств схемы, где можно задать опции отображения сетки, трассировки проводников и т.д.

Меню «**Analysis**» позволяет выполнять различные виды анализа схемы и изменять настройки симуляции (например, устанавливать время моделирования и т.д.), в него входят пункты:

- Activate (активировать): запускает симуляцию схемы.
- Pause (пауза): приостанавливает симуляцию схемы.
- Stop (остановка): остановка симуляции схемы.
- Analysis options (настройки анализа): установка параметров проведения анализа.
- DC operating point (постоянное напряжение в узлах): определяется напряжение в узлах схемы.
- AC frequency (частотный анализ): вычисляет передаточную характеристику (амплитудно-частотную характеристику).
- Transient (переходный процесс): показывает график переходного процесса.
- Fourier (Фурье): показывает спектр частот в определенном узле схемы.
- Monte Carlo (Монте Карло): анализ Монте Карло.
- Display graphs (вывод окна построения графиков): выводит на экран окно отображения результатов анализа, о котором говорилось выше.

Меню «**Window**» позволяет управлять окнами программы и состоит из нескольких пунктов, которые приведены ниже:

- Arrange (размещение): выстраивает окна на экране (если вы сместили или отодвинули окно, то эта команда возвращает его в первоначальное положение);
- Circuit (схема): показать монтажный стол (схему);
- Description (Описание): открывает окно описания схемы. Окно описания создается вместе со схемой, но по умолчанию не выводится на экран;

Назначение пунктов меню «**Help**» рассматривать, наверное, не стоит, – там и без пояснений все понятно.

Мы рассмотрели кнопки панелей инструментов, но до сих пор не трогали библиотеки компонентов. Для этого выделен следующий раздел книги.

2.2 БИБЛИОТЕКИ КОМПОНЕНТОВ

На панелях инструментов находятся также кнопки библиотек компонентов, которые мы рассмотрим отдельно:

 (Favorites) – наиболее часто используемые компоненты. Эта библиотека содержит компоненты, которые вы собираетесь часто использовать. О том, как добавить компонент в библиотеку «Favorites» будет сказано ниже.

 (Sources) – источники. В этой библиотеке вы найдете источники постоянного и переменного тока (напряжения), источники частотно-модулированных и амплитудно-модулированных напряжений, источники импульсов, управляемые источники тока и напряжения (например, источник тока управляемый напряжением), а так же «землю» (ground), программируемые источники (линейно-изменяющегося напряжения и нелинейный) и др.

Описание компонентов входящих в состав библиотеки «Sources» отдельно рассматривается в разделе книги «Источники тока и напряжений».

 (Basic) – основные элементы. Тут находятся пассивные радиоэлементы: постоянные и переменные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности;

трансформаторы и т.д. В этой библиотеке есть один очень полезный компонент  (connector) – монтажная точка, которая позволяет соединить несколько проводников в одной точке, что очень удобно в сложных схемах.

 (Diodes) – полупроводниковые диоды и приборы диодного типа. Здесь можно найти, например, выпрямительный диод (Diode), стабилитрон (Zener diode), светодиод (LED), динистор (Shockley diode), тиристор (Silicon-controlled rectifier), диодный мост (Full-wave bridge rectifier) и др. К сожалению, в программе нет варикапов и туннельных диодов.

 (Transistors) – транзисторы. По названию библиотеки ясно, что в ней находятся различные виды транзисторов – биполярные, полевые со встроенным каналом, МДП и прочие.

 (Analog ICs) – аналоговые интегральные микросхемы. Здесь находятся операционные усилители (причем различных видов и с разным количеством выводов), компаратор, схема ФАПЧ и т.д.

 (Mixed ICs) – интегральные микросхемы смешанного типа. Библиотека содержит цифро-аналоговые и аналого-цифровые интегральные схемы, такие как АЦП, ЦАП, 555-таймер и др.

 (Digital ICs) – цифровые интегральные микросхемы. Название этой библиотеки говорит о том, что в ней содержатся различные цифровые микросхемы (обратите внимание, что это именно существующие микросхемы).

 (Logic gates) – логические элементы. В этой библиотеке содержатся логические элементы, например элементы ИЛИ, НЕ, И, И-НЕ и т.д.

 (Digital) – цифровые устройства. Здесь находятся базовые устройства цифровой техники – триггеры, счетчики, шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры и др. В отличие от «Digital ICs» это не микросхемы, а просто блоки.

 (Indicators) – индикаторные приборы – лампы накаливания, семисегментные индикаторы, логический пробник и т.д. Тут же находятся и некоторые измерительные приборы как вольтметр и амперметр, пользование которыми описано в разделе «Работа с приборами»

 (Controls) – функциональные блоки и базовые элементы радиоавтоматики (перемножитель, сумматор, интегратор, дифференциатор и др.).

Описание компонентов входящих в состав библиотеки «Controls» отдельно рассматривается в разделе книги «Функциональные блоки»

 (Miscellaneous) – прочее. В данной библиотеке создатели программы видимо поместили то, что не влезло в остальные.

Здесь находятся кварцевые резонаторы, двигатель постоянного тока, вакуумные лампы, предохранители и другие полезные компоненты.

 (Instruments) – инструменты, приборы. Здесь находятся приборы для наблюдения процессов в схеме, или для генерации необходимых сигналов (осциллограф, мультиметр и т.д.). Работе с этими компонентами посвящен соответствующий раздел настоящей книги, где они подробно описываются.

Ну а теперь, после ознакомления с панелями инструментов программы и их назначением, можно приступить собственно к созданию самой схемы.

2.3 МЕТОДИКА СБОРКИ СХЕМЫ

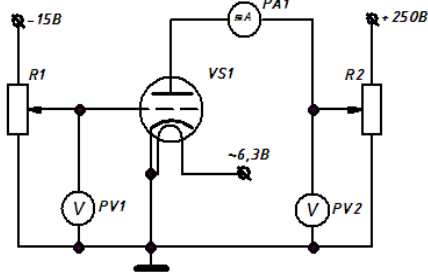


Рисунок 2.2 – Схема, используемая для снятия статических характеристик лампового триода.

После того как мы разобрались с панелями инструментов и меню программы можно приступить к сборке и моделированию схем. Попробуем продвигаться вперед последовательно. Рассмотрим методику создания моделируемой схемы в программе Electronics Workbench на конкретном примере, в качестве которого выберем схему для снятия вольтамперных характеристик вакуумного триода (рис.3.1).

Для создания модели схемы нам

понадобятся следующие компоненты:

-  – электронная вакуумная лампа (из библиотеки «Miscellaneous»).
-  – переменные резисторы (из библиотеки «Basic»).
-  – земля (из библиотеки «Sources»).
-  – источники постоянного тока (из библиотеки «Sources»).
-  – вольтметр (из библиотеки «Indicators»).
-  – амперметр (из библиотеки «Indicators»).

Для того чтобы установить компонент на монтажный стол нужно выбрать нужную библиотеку компонент щелчком левой кнопки мыши на ней, после этого нажать на необходимый компонент, а затем, не отпуская кнопки мыши, перетащить его изображение на монтажный стол и отпустить кнопку мыши. Компонент на монтажном столе можете перемещать с помощью мыши или клавиатуры, размещая его как вам нравится (или как требуется).

Компоненты на монтажном столе можно поворачивать на 90° (против часовой стрелки), зеркально отразить по горизонтали или по вертикали с помощью кнопок  (Rotate),  (Flip horizontal) и  (Flip vertical) соответственно, или используя горячие клавиши (см. Приложение).

При соединении компонентов между собой нужно подвести указатель мыши к выводу компонента. При подведении указателя мыши к выводу на нем появляется точка (рис.2.3, а). В этот момент нужно нажать на левую кнопку мыши и, не отпуская ее протянуть появившийся проводник к выводу другого элемента. На выводе этого элемента также появится точка (рис.3.2, б), после чего кнопку мыши можно отпустить, и выводы элементов окажутся соединенные проводником, как показано на рис.3.2, в (рекомендую посмотреть в пятом разделе книги описание пункта «Routing options»).

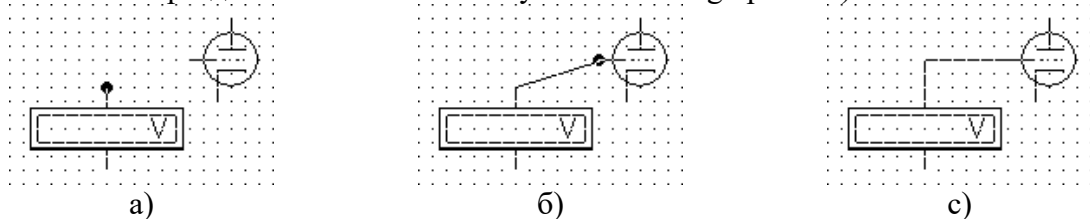


Рисунок 2.3 – Соединение компонентов между собой.

Для соединения вывода компонента с проводником нужно проделать те же действия, что и при соединении компонентов (когда при подводе указателя мыши к проводнику на нем появится точка или изгиб, то можно отпустить кнопку мыши). Если нужно соединить несколько проводников в одной точке (до четырех проводников) то можно использовать

для этого монтажную точку («connector») из библиотеки «Basic» (о монтажной точке мы уже говорили, когда рассматривали назначение кнопок панелей инструментов).

При сборке схемы удобно пользоваться координатной сеткой (см. рис 2.3). Что вывести ее на экран надо установить указатель мыши на свободное от компонентов поле и нажать правую кнопку мыши. В появившемся контекстном меню следует выбрать пункт «Schematic options». После этого в открывшемся окне на вкладке «Grid» установить галочку в пункте «Show Grid».

Наиболее часто используемые элементы (точнее компоненты) создаваемых вами схем можно добавить в библиотеку «Favorites». Для того чтобы добавить тот или иной компонент библиотеку «Favorites» откройте библиотеку с нужным элементом и кликните на нем правой клавишей мыши (рис.2.4). В появившемся контекстном меню выберите пункт «Add to favorites» и выбранный вами компонент теперь окажется в библиотеке «Favorites».

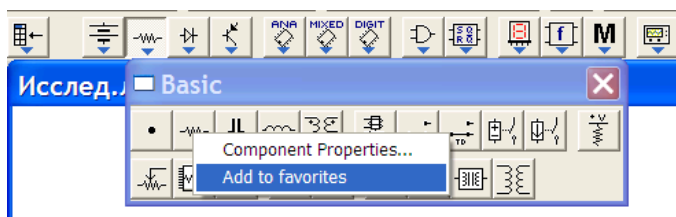


Рисунок 2.4 – Добавление элемента в библиотеку «Favorites»

Из своей библиотеки компонент при этом не исчезнет. Если сохранить теперь файл как шаблон, который загружается по умолчанию (файл default.ewb) то при следующем запуске программы все компоненты, которые вы добавили в библиотеку «Favorites», будут всегда доступны (иначе при последующем запуске программы их там уже не будет).

Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

1. Задание для работы:

- 1) Собрать простую схему.

Извлеките необходимые компоненты из библиотек, расположите их на монтажном столе и соедините между собой так, как показано на рис. 2.5. Несколько неудобно то, что в схемах применяются зарубежный стандарт обозначения элементов, отличающийся от принятого у нас стандарта на электрические схемы, но это несущественно.

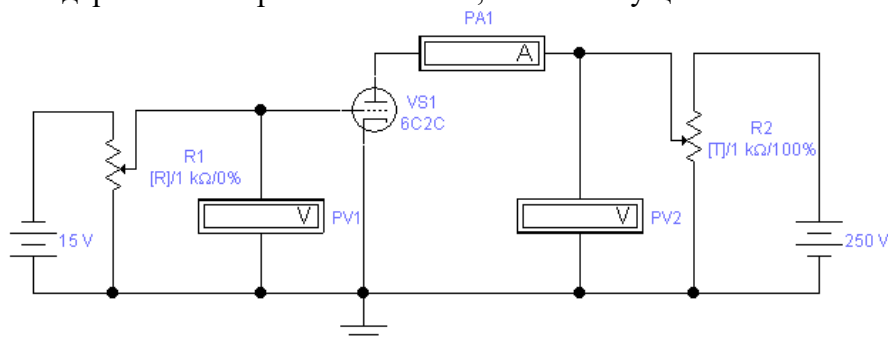


Рисунок 2.5 – Схема, собранная в программе Electronics Workbench

Обязательно следует подключить к схеме «землю» («Ground» из библиотеки «Sources») до того, как запускать симуляцию схемы. Программа отказывается запускать симуляцию (за исключением схем с логическими элементами), если та не имеет земли, причем даже когда она вообще не нужна.

5. Составить отчет о проделанной работе по первому вопросу в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

В отчете привести:

- исходные данные,

- выполняемые задания,
- составленные листинги программ моделирования,
- результаты моделирования и исследований – рассчитанные формулы, полученные графики;
- выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. По указанию преподавателя практически выполнить по одному из заданий каждого учебного вопроса, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в смоделированном физическом поле.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование операций над векторными характеристиками физических полей

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Исследование алгебраического, экспоненциального и тригонометрического представления векторов.
2. Исследования операций сложения и умножения векторов.
3. Исследования операций интегрирования и дифференцирования векторных характеристик.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять основные законы и математический аппарат электродинамики для компьютерного моделирования и анализа электромагнитных полей и волн в различных средах и направляющих системах.

Владеть:

- навыками определения характеристик электромагнитных полей, необходимых при решении практических задач для расчетов радиопокрытия, радиорелейных и спутниковых трасс.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench» и системой компьютерной математики «Mathcad»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. СКАЛЯРНОЕ И ВЕКТОРНОЕ ОПИСАНИЕ ПОЛЕЙ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы УМНОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ

Из курса векторной алгебры известно, что существует *три вида произведения векторов*:

- скалярное произведение, результатом которого является скалярная величина,
- векторное произведение, результатом которого является новый вектор,
- смешанное произведение векторов, результатом которого является скалярная величина.

Все эти результаты векторного умножения имеют различный физический смысл, поэтому в теории ЭМП применение этих операций на практике является целесообразным для определения различных характеристик поля.

С помощью векторов в теории ЭМП отображаются силовые характеристики поля, такие как силы $\vec{F}$ Кулона, Лоренца, Ампера, электрическая $\vec{E}$ и магнитная $\vec{H}$ напряженности, электрическая $\vec{D}$ и магнитная $\vec{B}$ индукции, а также радиус-вектор $\vec{r}$, вектор перемещения $\vec{s}$ или векторы бесконечно малого радиуса и перемещения $d\vec{r}$ и $d\vec{s}$.

Рассмотрим типовые ситуации (см. рис. 1) применения различных видов умножения векторов при решении различных физических задачах теории ЭМП.

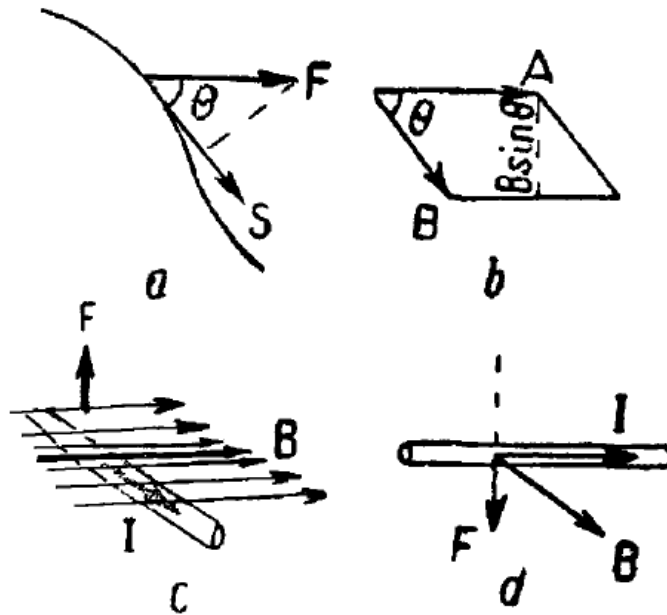


Рис. 3 – Типовые ситуации применения различных видов умножения векторов

Ситуация 1, приведенная на рис. 1 а), демонстрирует случай, когда в результате действия силы поля $\vec{F}$ на некоторое тело происходит его перемещение на расстояние $\vec{s}$. Из курса механики известно, что **произведение силы на расстояние перемещения имеет физический смысл работы A** , совершаемой силой поля. Математически это определяется скалярным произведением векторов $\vec{F}$ и $\vec{s}$ с учетом угла θ между их направлениями, т.е.

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = (\vec{F}, \vec{s}) = F \cdot s \cdot \cos(\theta) = F_s \cdot s. \quad (1)$$

В этом случае, как следует из выражения (1), работа, совершённая силой поля, определяется скалярным произведением вектора силы на вектор перемещения, что геометрически соответствует умножению модуля вектора перемещения s на проекцию F_s вектора силы $\vec{F}$ на вектор $\vec{s}$.

Случаи, когда для решения физической задачи используется векторное произведение векторов, продемонстрированы на рис. 1 б), 1 с), 1 д). Так на рис. 1 б) показано то, что векторное произведение имеет геометрический смысл, заключающийся в том, что модуль полученного вектора $\vec{N}$ равен площади параллелограмма, образованного исходными векторами $\vec{A}$ и $\vec{B}$, т.е.

$$\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B} = [\vec{AB}] = A \cdot B \cdot \sin(\theta). \quad (2)$$

Векторное умножение, например, *используется* при определении силы Ампера, действующей на находящийся в магнитном поле проводник с током. Если магнитное поле (см. рис. 1 с) по величине и направлению определяется вектором $\vec{B}$, а ток (который предполагается постоянным), вектором $\vec{I}$, то сила, действующая на проводник длиной 1 м, будет характеризоваться вектором $\vec{F}$, который перпендикулярен как к вектору $\vec{B}$, так и к вектору $\vec{I}$. Величина вектора $\vec{F}$ находится из выражения

$$\vec{F} = \vec{I} \cdot \vec{B} \cdot \sin(\theta). \quad (3)$$

В выражении (3) результат умножения представляет собой вектор. Однако с первого взгляда неясно, почему площадь на рис. 1 б) представляет собой векторную величину. Понятно только, что поверхность должна быть ориентирована в пространстве. Поэтому условились представлять площадь вектором, направление которого нормально к поверхности, а длина пропорциональна величине площади. Таким образом, площадь на рис. 1 с) изображается вектором, перпендикулярным к плоскости чертежа.

Естественно возникает вопрос о знаке результирующего вектора, что в уравнении (3) показывает, куда направлена сила – вверх или вниз? С тем, чтобы устранить двусмысленность в математической постановке задачи, условились, что в векторном произведении знак результирующего вектора определяется порядком, в котором записаны векторы, входящие в произведение. Этот способ является достаточно удобным и определённым для установления направления векторного произведения. Однако, выразить словами соответствующие соотношения несколько затруднительно. Обычно правило знака запоминают, располагая определённым образом пальцы правой руки, или пользуясь вращением, так называемого правовинтового винта.

Итак, произведение двух векторов $[\mathbf{AB}]$ само представляет собой вектор величины $AB \sin(\theta)$, имеющий направление, нормальное к плоскости, в которой лежит как вектор $\mathbf{A}$, так и вектор $\mathbf{B}$, при чём знак направления таков, что если поворачивать правый винт (буравчик), как показано на рис. 2 от $\mathbf{A}$ к $\mathbf{B}$ (на угол меньший 180°), то он будет ввинчиваться по направлению, определяемому направлением вектора произведения.

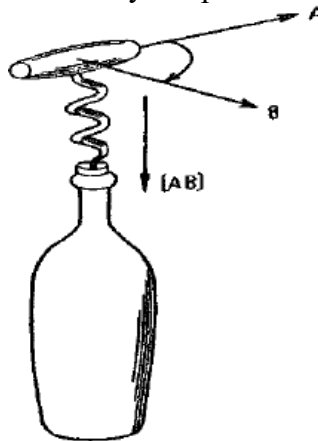


Рис. 2 – Правило правового буравчика (винта)

В соответствии с этим правилом уравнение (3) даёт направление силы. Причём вектор $[\mathbf{AB}]$, характеризующий площадь, изображённую на рис. 1 б), направлен вниз относительно плоскости параллелограмма, тогда как произведение $[\mathbf{BA}]$ соответствует вектору, направленному вверх относительно плоскости параллелограмма. Сказанное представляет собой только иллюстрацию общего правила, согласно которому $[\mathbf{BA}] = -[\mathbf{AB}]$. Это означает, что рассматриваемая операция векторного умножения не подчиняется основному закону коммутативности обычной алгебры, который говорит, что $\mathbf{ab} = \mathbf{ba}$.

Для того, чтобы ввести выражение, однозначно и строго определяющее векторное произведение воспользуемся единичным вектором $\mathbf{n}$, представляющим собой вектором единичной длины, который нормален к плоскости в которой расположены векторы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$, и имеет такое направление, что образует правовинтовую систему с этими векторами. Таким образом, векторное произведение определяется выражением

$$\mathbf{C} = [\mathbf{AB}] = \mathbf{n} \cdot AB \cdot \sin(\theta), \quad (4)$$

где A и B представляют собой скалярные величины векторов $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$, θ - угол между векторами, т.е. результат векторного произведения представляет собой произведение скаляра, равного площади параллелограмма, на единичный вектор, который служит для указания направления нормали к плоскости векторов $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$, и, следовательно, точно определяет направление векторного произведения.

До сих пор, вектора в лекции рассматривались абстрактно без привязки к координатам пространства. Известно, что положение любой точки в пространстве можно определить, используя декартовы координаты на основании известных методов аналитической геометрии. При этом длина и направление любого вектора выражается с помощью проекций вектора на три оси координат. Тогда любой вектор $\mathbf{A}$ может быть

описан как имеющий три взаимно перпендикулярных скалярных компоненты (проекции): A_x по направлению x , A_y по направлению y и A_z по направлению z .

Для придания этим скалярным проекциям направленности вводится система из трех ортонормированных векторов или ортов $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$, т.е. векторов единичной длины, направленных вдоль оси декартовой системы координат, следовательно, являющихся ортогональными (перпендикулярными) друг к другу.

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с установленной системой компьютерной алгебры «Mathcad-14».

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для заданий 1 – xxx.

№ варианта	Re(A)	Im(A)	Re(B)	Im(B)	№ варианта
1	5	4	3	1	8
2	6	-5	-4	-3	9
3	-4	-2	1	4	10
4	3	-1	9	7	11
5	-2	8	-8	1	12
6	-8	5	-5	4	13
7	9	-3	1	-3	14

3. Задание для работы

1. *Исследование алгебраического, экспоненциального и тригонометрического представления векторов.*
2. *Исследование операций сложения и умножения векторов.*
3. *Исследование операций интегрирования и дифференцирования векторных характеристик.*

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. *Моделирование и исследование алгебраического, экспоненциального и тригонометрического представления векторов в системе «Mathcad».*

1.1. Алгебраическое представление комплексного числа в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- комплексное число A в алгебраической форме. В качестве первого слагаемого ввести $\text{Re}(A)$ согласно варианту, в качестве второго $\text{Im}(A)$ соответственно–

$$A := -3 + 5i ;$$

- вектор представления реальной составляющей комплексного числа A –

$$A_x := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Re}(A) \end{pmatrix} ;$$

- вектор представления мнимой составляющей комплексного числа A – $A_y := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Im}(A) \end{pmatrix} ;$

2) Построить график векторного представления числа A в комплексной плоскости.:

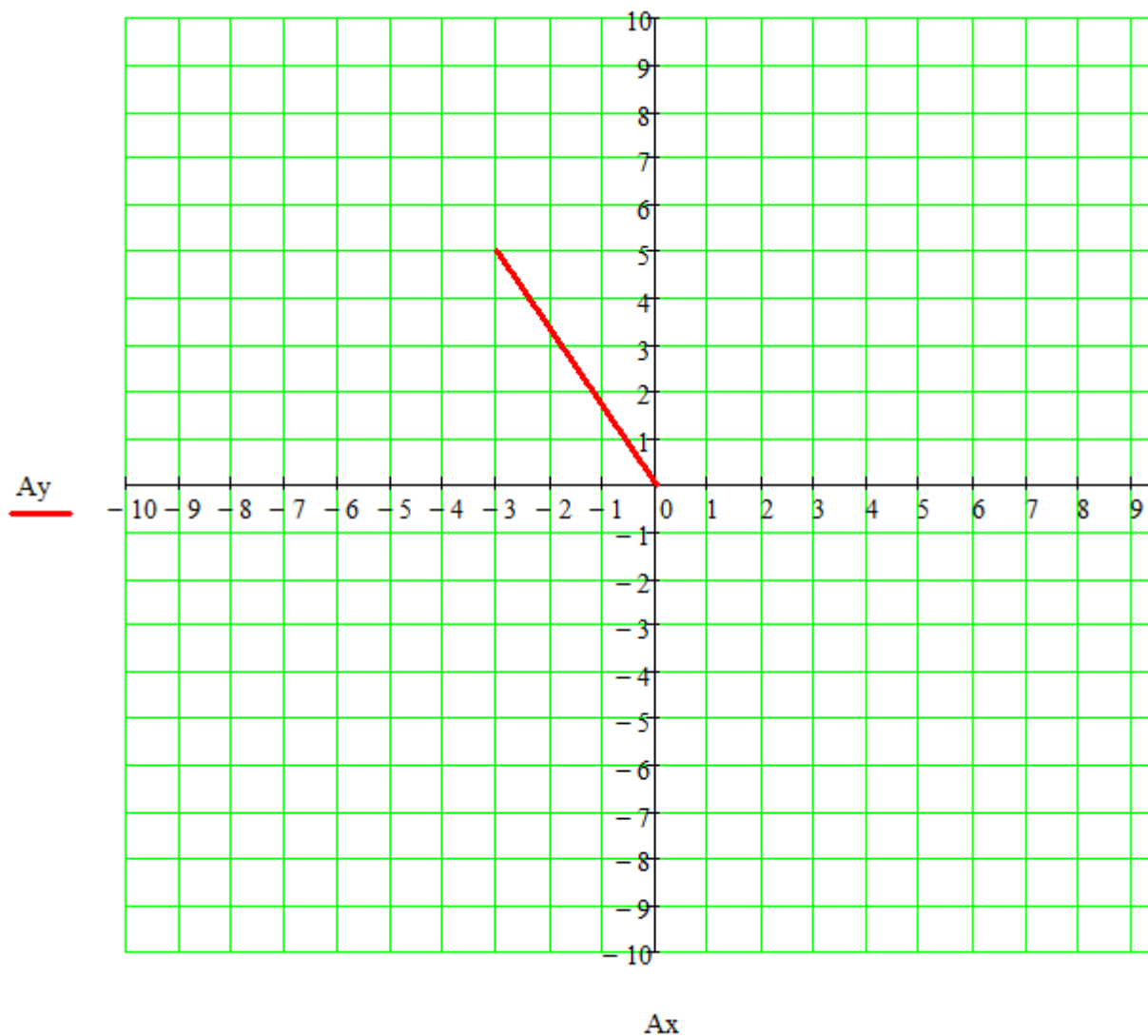


Рис. 1.xx -

- 3) Изменить знаки реальной и мнимой составляющих комплексного числа A на противоположные. Зафиксировать изменившийся график.
- 4) Сделать выводы по результатам проведенного исследования.

1.2 Экспоненциальное и тригонометрическое представление комплексного числа в системе «Mathcad».

- 1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- мнимую единицу $j = \sqrt{-1}$;
- модуля комплексного числа A – $A_m := |A|$;
- Аргумента комплексного числа A – $\varphi_a := \arg(A)$;
- Аргумента комплексного числа A в градусах – $\varphi_{ag} := \arg(A) \cdot \frac{180}{\pi}$;

- 2) Ввести формулу для представления комплексного числа в экспоненциальной и тригонометрической форме:

- Представления комплексного числа A в экспоненциальной форме –

$$A2 := A_m \cdot \exp(j \cdot \varphi_a) = ;$$

- Представления комплексного числа A в тригонометрической форме –

$$A3 := A_m \cdot \cos(\varphi_a) + j \cdot A_m \cdot \sin(\varphi_a) = ;$$

- 3) Сравнить полученные результаты .
- 4) Сделать выводы по результатам проведенного исследования.

Задание 2. Исследования операций сложения и умножения векторов в системе «Mathcad».

2.1. Сложение векторов в системе «Mathcad».

- 1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:
 - комплексные число **B** в алгебраической форме. В качестве первого слагаемого ввести **Re(B)** согласно варианту, в качестве второго **Im(B)** соответственно–

$$B := 5 - 5i,$$

- 2) Ввести формулы для расчета:

- вектор представления реальной составляющей комплексного числа **B** –

$$B_x := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Re}(B) \end{pmatrix};$$

- вектор представления мнимой составляющей комплексного числа **B**–

$$B_y := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Im}(B) \end{pmatrix}$$

- 3) Ввести формулы для расчета суммы комплексных чисел:

- **C**, равное сумме комплексных чисел **A** и **B** – $C := A + B =;$

- вектор представления реальной составляющей комплексного числа **C** –

$$C_x := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Re}(C) \end{pmatrix};$$

- вектор представления мнимой составляющей комплексного числа **C**–

$$C_y := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Im}(C) \end{pmatrix};$$

- 4) Построить график суммы векторов **A** и **B** в комплексной плоскости. Пример приведен на рис. 1.xx.

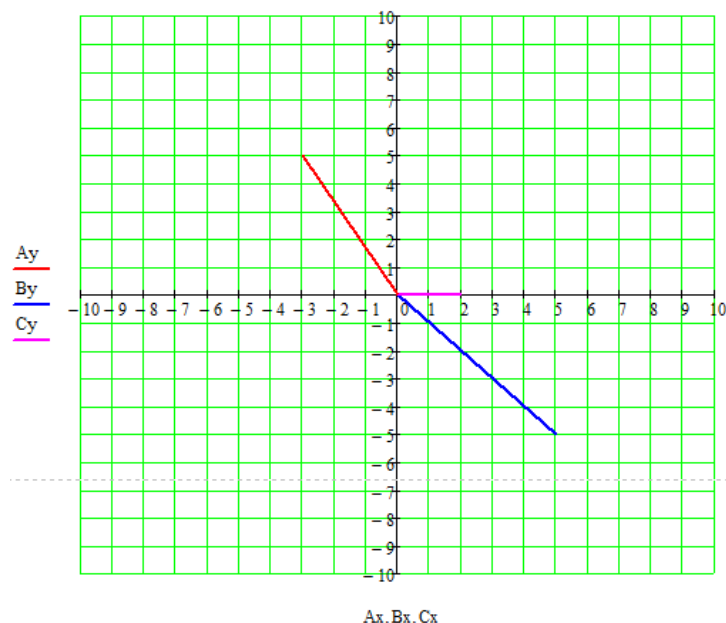


Рис. 1.xx -

2.1. Скалярное произведение векторов в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- модуль комплексного числа **B** – $B_m := |B|$;
- Аргумента комплексного числа **B** – $\varphi_b := \arg(B)$;
- Аргумента комплексного числа **B** в градусах – $\varphi_{bg} := \arg(B) \cdot \frac{180}{\pi}$;
- угол между векторами **A** и **B** – $\theta := \varphi_{ag} - \varphi_{bg}$.

2) Ввести формулы для расчета скалярного произведения векторов:

- косинус угла между векторами, выраженный в градусах –

$$\cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) = -0.97$$

- Произведение векторов представленное как произведение модулей на косинус угла

$$SP := A_m \cdot B_m \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) =$$

между ними – ;

- Произведение векторов представленное как сумма произведений реальных и мнимых составляющих векторов **A** и **B** – $SP2 := \operatorname{Re}(A) \cdot \operatorname{Re}(B) + \operatorname{Im}(A) \cdot \operatorname{Im}(B) =$;

2.2. Векторное произведение векторов в системе «Mathcad».

1) Ввести

формулы для расчета:

- вектор представления комплексного числа **A** в трехмерной системе координат –

$$AA := \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(A) \\ \operatorname{Im}(A) \\ 0 \end{pmatrix} ;$$

- вектор представления комплексного числа **B** в трехмерной системе координат –

$$BB := \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(B) \\ \operatorname{Im}(B) \\ 0 \end{pmatrix} ;$$

$$AA \times BB = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -10 \end{pmatrix} ;$$

- векторное произведение векторов в трехмерной плоскости –

- Векторное произведение представленное как произведение модулей на синус угла

$$VP := A_m \cdot B_m \cdot \sin\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) ;$$

между ними –

- Векторное произведение представленное как разность произведений реальных и мнимых составляющих векторов **A** и **B** –

$$VP2 := \operatorname{Re}(A) \cdot \operatorname{Im}(B) - \operatorname{Re}(B) \cdot \operatorname{Im}(A) = -10 ;$$

2) Сделать выводы по проведенным исследованиям

Задание 3. Исследование операций интегрирования и дифференцирования векторных характеристик.

3.1. Исследование операции дифференцирования в системе «Mathcad».

1) Ввести формулы для

– Функция $F(x)$ –

$$F(x) := \sin(x) ;$$

– Переменная q , которую Mathcad будет использовать как начальное приближение при поиске корня–

$$q := 3$$

– Ввести с клавиатуры функцию root, которая позволит найти значение q при котором функция $F(q)$ равна нулю. В качестве аргументов функции root запишем функцию $F(q)$ и переменную q , которую Mathcad будет использовать как начальное приближение при поиске корня. При этом для заданного

приближения находится только один корень.– $root(F(q), q) = 3.142$;

$$z(x) := \frac{d}{dx} F(x) \rightarrow \cos(x)$$

– производная функции $F(x)$ –

– Переменная s , которую Mathcad будет использовать как начальное приближение при поиске корня– $s := 3$

– Функция root для производной функции $F(x)$

$$root(z(s), s) = -14.137$$

$$g(x) := \frac{d^2}{dx^2} F(x) \rightarrow -\sin(x)$$

– производная функции $F(x)$, возведенная в квадрат–

– Функция root для квадрата производной функции $F(x)$

$$root(g(q), q) = 3.142$$

2) Построить на одном графике

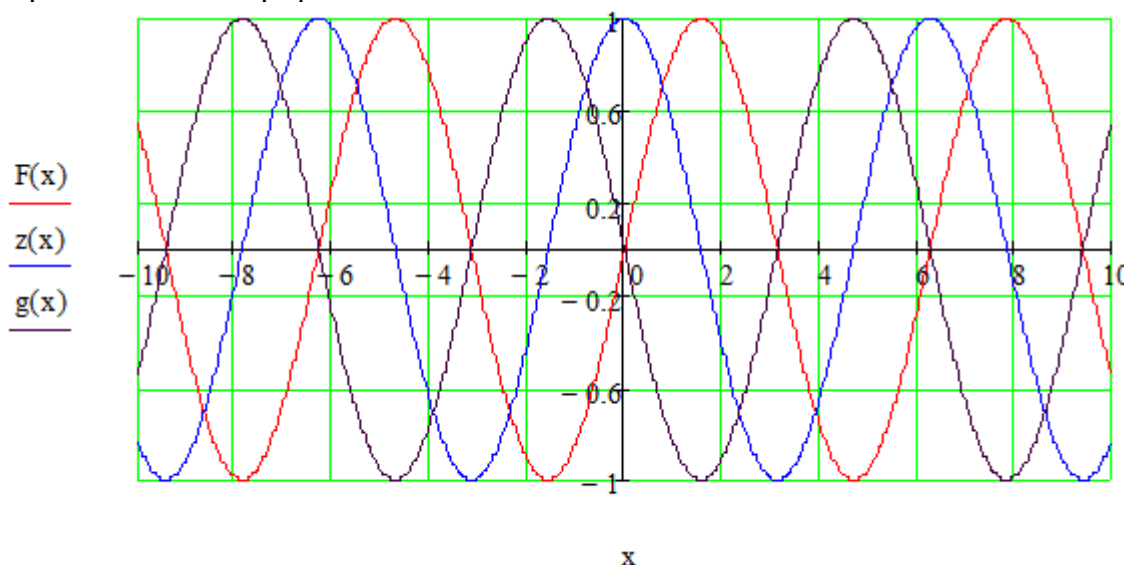


Рис. 1.xx -

3) Построить график в полярной системе координат:

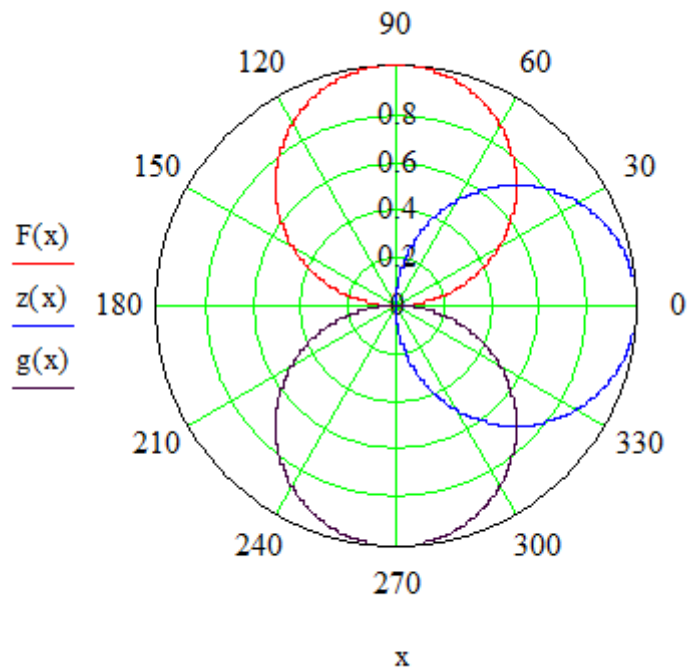


Рис. 1.xx -

4) Сделать выводы по проведенным исследованиям

3.2. Исследование операции интегрирования в системе «Mathcad».

1) Ввести формулы для:

– Интеграл от функции $F(x)$ –

$$Z(x) := \int F(x) dx \rightarrow -\cos(x) ;$$

– Интеграл от уже проинтегрированной функции–

$$\underline{\underline{G(x)}} := \int Z(x) dx \rightarrow -\sin(x)$$

– Двойной интеграл от функции $F(x)$ –

$$\underline{\underline{V(x)}} := \int \int F(x) dx dx \rightarrow -\sin(x) ;$$

2) Построить на одном графике:

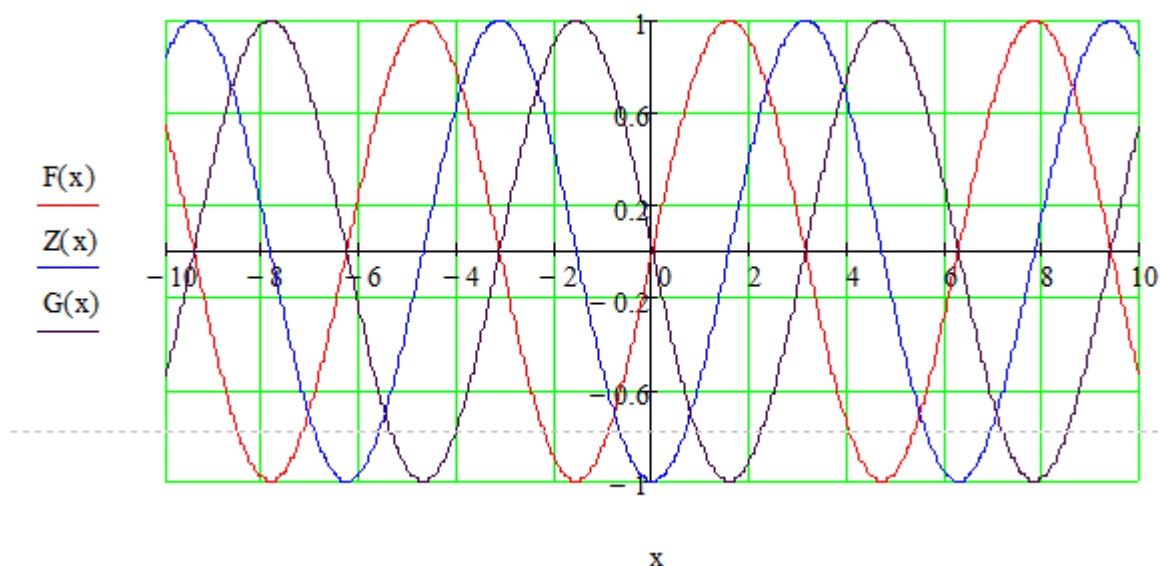


Рис. 1.xx -

3) Построить график в полярной системе координат:

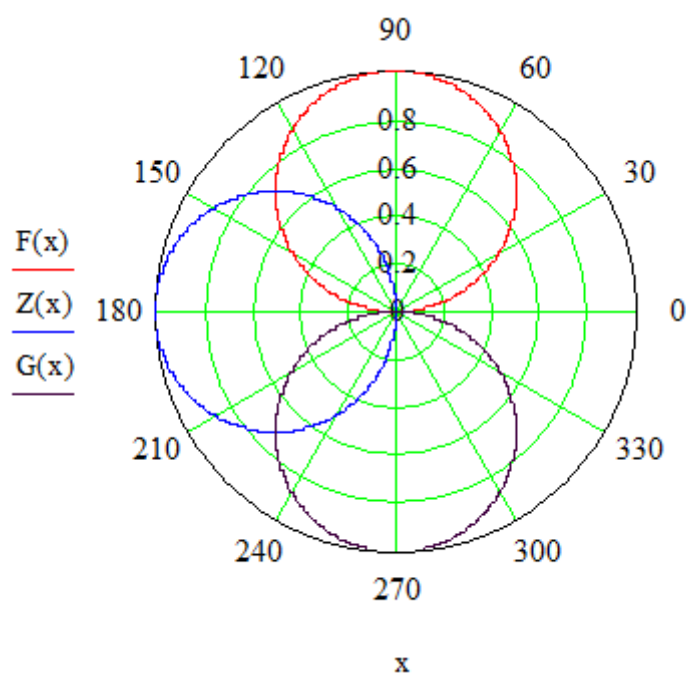


Рис. 1.xx -

4) Сделать выводы по проведенным исследованиям

Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. По указанию преподавателя практически выполнить по одному из заданий каждого учебного вопроса, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в разработанной модели.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Моделирование и исследование граничных условий на поверхности раздела сред для векторов электрического и магнитного поля

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Моделирование и исследование граничных условий на поверхности раздела двух сред для векторов электрического поля в системе

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

– применять основные законы и математический аппарат электродинамики для компьютерного моделирования и анализа электромагнитных полей и волн в различных средах и направляющих системах.

Владеть:

– навыками определения характеристик электромагнитных полей, необходимых при решении практических задач для расчетов радиопокрытия, радиорелейных и спутниковых трасс.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench» и системой компьютерной математики «Mathcad»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. СКАЛЯРНОЕ И ВЕКТОРНОЕ ОПИСАНИЕ ПОЛЕЙ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Рассмотрим плоскую границу раздела двух сред с параметрами ϵ_{a1} , μ_{a1} , σ_1 и ϵ_{a2} , μ_{a2} , σ_2 . На поверхности раздела сред выделим достаточно малый элемент ΔS , в пределах которого в обеих средах нормальные составляющие вектора $\vec{D}$ равномерно распределены. На основании ΔS построим цилиндр с высотой h так, чтобы его основания находились в разных средах, как показано на рис. 1.

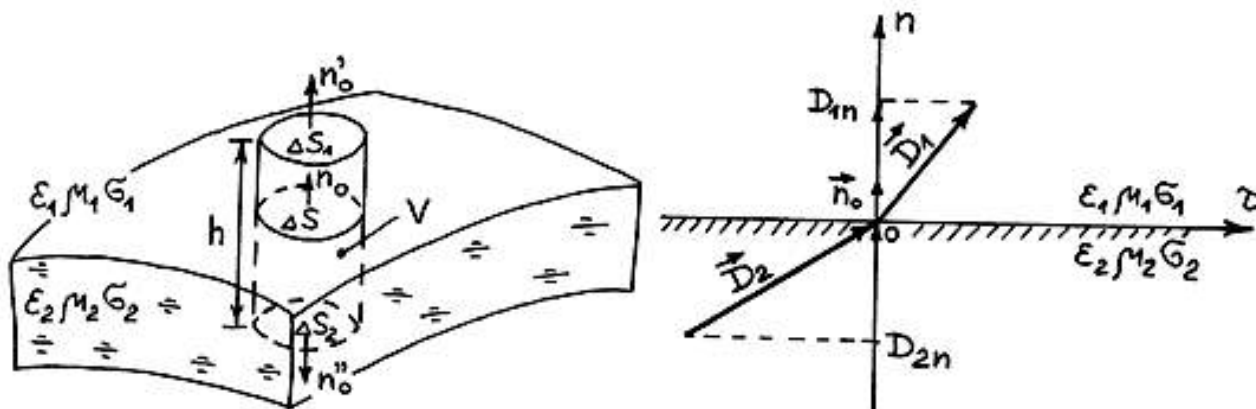


Рис. 1 – Пояснение к выводу граничных условий для нормальных составляющих электрического поля

Используем **3-е уравнение Максвелла в интегральной форме**, согласно которому поток вектора электрической индукции через любую замкнутую поверхность S равна сумме зарядов в объеме V , ограниченном этой поверхностью, т.е.:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV,$$

где: $d\vec{S} = \Delta S \vec{n}_0$ – единичный вектор, нормальный к малой площадке ΔS ; $\vec{n}_0$ – нормаль к ΔS , ρ – объемная плотность электрического заряда.

Разобьем интеграл по замкнутой поверхности S , ограничивающий объем V , на три интеграла:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_{\Delta S_1} \vec{D}_1 d\vec{S} + \int_{\Delta S_2} \vec{D}_2 d\vec{S} + \int_{S_{бок}} \vec{D}_{бок} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

Устремим высоту цилиндра h к нулю, тогда: основания цилиндра устремляются к площади круга на границе раздела двух сред, а площадь боковой поверхности воображаемого цилиндра к нулю, т.е.

$$\Delta S_1 \text{ и } \Delta S_2 \rightarrow \Delta S; \quad S_{бок} = h \cdot \Delta S \rightarrow 0; \quad \int_{S_{бок}} \vec{D}_{бок} d\vec{S}_{бок} \rightarrow 0;$$

тогда интеграл по объему V будет стремиться к интегралу по элементарной площади:

$$\int_V \rho dV \rightarrow \int_{\Delta S} \rho_S dS,$$

где: ρ_S – поверхностная плотность заряда на границе раздела сред.

$$\text{Учитывая это, получаем: } \int_{\Delta S_1} \vec{D}_1 d\vec{S} + \int_{\Delta S_2} \vec{D}_2 d\vec{S} = \int_{\Delta S} \rho_S dS.$$

Определим теперь нормальные составляющие вектора $\vec{D}$. Из рис. 1 очевидно, что:

$$\int_{\Delta S_1} \vec{D}_1 \cdot \vec{n}'_0 dS + \int_{\Delta S_2} \vec{D}_2 \cdot (-\vec{n}''_0) dS = \int_{\Delta S} \rho_S dS.$$

Наконец, считая площадку ΔS настолько малой, что на этой площади вектор $\vec{D}$ практически не изменяется, получим:

$$\vec{D}_1 \vec{n}_0 \Delta S - \vec{D}_2 \vec{n}_0 \Delta S = \rho_S \Delta S.$$

Окончательно: $(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \vec{n}_0 = \rho_S$, или

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_S. \quad (1)$$

Итак, делаем вывод: **нормальная составляющая вектора электрической индукции при переходе через граничную поверхность претерпевает скачок, численно равный поверхностной плотности электрического заряда.**

Поскольку из материальных уравнений $\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}$ то, следовательно, **граничные условия для нормальной составляющей вектора напряженности электрического поля** будут иметь вид:

$$\epsilon_{a1} E_{1n} - \epsilon_{a2} E_{2n} = \rho_S. \quad (2)$$

Если граничная поверхность не заряжена, то **нормальная компонента D_n вектора электрической индукции** на основании (1) **непрерывна при переходе из среды 1 в среду 2**, а **нормальная компонента E_n вектора напряженности электрического поля терпит разрыв**, величина которого определяется соотношением диэлектрических проницаемостей сред:

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1}} \quad (\text{при } \rho_S = 0).$$

Рассмотрим теперь граничные условия для нормальных составляющих магнитного поля. Для этого по аналогии охватим обе среды цилиндром с объемом V и используем **4-ое уравнение Максвелла в интегральной форме**, согласно которому **поток вектора магнитной индукции $\vec{B}$ через любую замкнутую поверхность S равен нулю:**

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Разобьём замкнутый интеграл по поверхности на три интеграла:

$$\int_{\Delta S_1} \vec{B}_1 d\vec{S} + \int_{\Delta S_2} \vec{B}_2 d\vec{S} + \int_{S_{\text{бок}}} \vec{B}_{\text{бок}} d\vec{S} = 0.$$

Устремим высоту цилиндра $h \rightarrow 0$ тогда:

$$\int_{\Delta S_1} \vec{B}_1 d\vec{S} + \int_{\Delta S_2} \vec{B}_2 d\vec{S} = 0.$$

Наконец, учитывая постоянство $\vec{B}$ на площадке ΔS из-за малости последней, получим для нормальных составляющих:

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \vec{n}_0 = 0,$$

или

$$B_{1n} - B_{2n} = 0. \quad (3)$$

В результате делаем вывод о том, что **нормальная составляющая вектора магнитной индукции при переходе через границу раздела двух сред остается непрерывной.**

Поскольку из материальных уравнений $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$ то, граничные условия для нормальных составляющих вектора напряженности магнитного поля имеют вид:

$$\mu_{a1} H_{1n} = \mu_{a2} H_{2n}. \quad (4)$$

Таким образом, **нормальная составляющая вектора $\vec{H}$ на границе сред терпит разрыв**, величина которого равна отношению абсолютных магнитных проницаемостей сред.

$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_{a2}}{\mu_{a1}}.$$

Рассмотрим плоскую границу раздела двух сред с параметрами ϵ_{a1} , μ_{a1} , σ_1 и ϵ_{a2} , μ_{a2} , σ_2 . Охватим обе среды элементарным контуром L , плоскость которого перпендикулярна поверхности раздела двух сред (см. рис. 2).

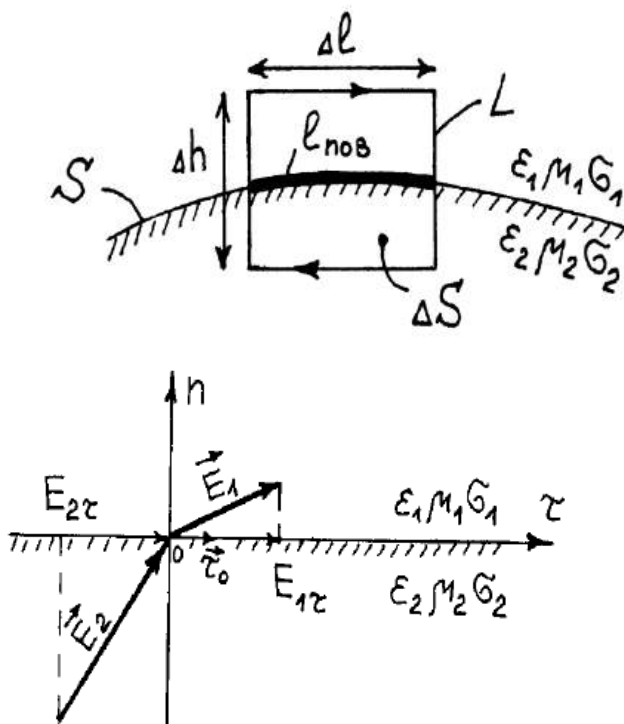


Рис. 2 –Пояснение к выводу граничных условий для касательных составляющих электрического поля

Используем 2-ое уравнение Максвелла в интегральной форме, согласно которому циркуляция вектора напряженности электрического поля E (т.е. ЭДС) по любому замкнутому контуру L равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур с обратным знаком:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S}.$$

Разобьем контур L на четыре участка, два из которых определяются вектором элементарной длины $d\vec{\ell}$, а два других – вектором элементарной высоты $d\vec{h}$, тогда интеграл по замкнутой кривой можно разбить на четыре линейных интеграла:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = \int_{\Delta\ell} \vec{E}_1 d\vec{\ell} + \int_{\Delta h} \vec{E}_{12} d\vec{h} + \int_{\Delta\ell} \vec{E}_2 d\vec{\ell} + \int_{\Delta h} \vec{E}_{21} d\vec{h} = - \int_{\Delta S} \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S}.$$

Устремим высоту контура Δh к нулю, тогда элементарная площадь, ограниченная контуром, $\Delta S = \Delta l \cdot \Delta h$ в пределе будет стремиться к нулю, а стороны AB и CD сливаются на границе, и в этом случае получаем:

$$\int_{\Delta\ell} \vec{E}_1 d\vec{\ell} + \int_{\Delta\ell} \vec{E}_2 d\vec{\ell} = 0.$$

Определим касательные составляющие вектора напряженности электрического поля:

$$\int_{\Delta\ell} \vec{E}_1 \cdot \vec{\tau}_0 d\ell + \int_{\Delta\ell} \vec{E}_2 \cdot (-\vec{\tau}_0) d\ell = 0,$$

где $\vec{\tau}_0$ - единичный касательный вектор.

Наконец, полагая, что отрезок Δl настолько мал, что вектор $\vec{E}$ на данном участке не изменяется, получим:

$$\vec{E}_1 \vec{\tau}_0 \Delta \ell - \vec{E}_2 \vec{\tau}_0 \Delta \ell = 0.$$

Окончательно: $(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \vec{\tau}_0 = 0$, или

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}. \quad (5)$$

Таким образом, *касательная составляющая вектора напряженности электрического поля непрерывна на границе раздела сред.*

Используя материальное уравнение $\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}$ определяем:

$$\frac{D_{1\tau}}{\epsilon a_1} = \frac{D_{2\tau}}{\epsilon a_2}. \quad (6)$$

В результате делаем вывод о том, что *касательные составляющие вектора $\vec{D}$ терпят разрыв*, величина которого определяется соотношением диэлектрических проницаемостей обеих сред.

$$\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\epsilon a_1}{\epsilon a_2}.$$

Рассмотрим граничные условия для касательных составляющих вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$. По аналогии с предыдущим случаем, охватим границу раздела сред контуром L и используем *1-ое уравнение Максвелла*. Согласно которому *циркуляция вектора напряженности магнитного поля H по любому замкнутому контуру L равна сумме электрического тока проводимости и тока смещения, протекающих сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:*

$$\oint_L \vec{H} d\vec{\ell} = \int_S \vec{J}_{np} d\vec{S} + \int_S \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{S}.$$

Разбиваем интеграл по замкнутому контуру L на 4-ре интеграла:

$$\int_{\Delta \ell} \vec{H}_1 d\vec{\ell} + \int_{\Delta h} \vec{H}_{12} d\vec{h} + \int_{\Delta \ell} \vec{H}_2 d\vec{\ell} + \int_{\Delta h} \vec{H}_{21} d\vec{h} = \int_{\Delta S} \vec{J}_{np} d\vec{S} + \int_{\Delta S} \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{S}.$$

Устремим высоту контура Δh к нулю, тогда элементарная площадь, ограниченная контуром, $\Delta S = \Delta \ell \Delta h$ в пределе будет стремиться к нулю, а интегралы:

$$\int_{\Delta S} \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{S} \rightarrow 0, \quad \int_{\Delta h} \vec{H}_{12} d\vec{h} \rightarrow 0, \quad \int_{\Delta h} \vec{H}_{21} d\vec{h} \rightarrow 0, \quad \int_{\Delta S} \vec{J}_{np} d\vec{S} \rightarrow \int_{\ell_{пов}} \vec{J}_S d\vec{\ell}_{пов},$$

где: $\vec{J}_S$ - вектор плотности поверхностного тока проводимости, пересекающий отрезок линии $\ell_{пов}$ (см. рис. 3.).

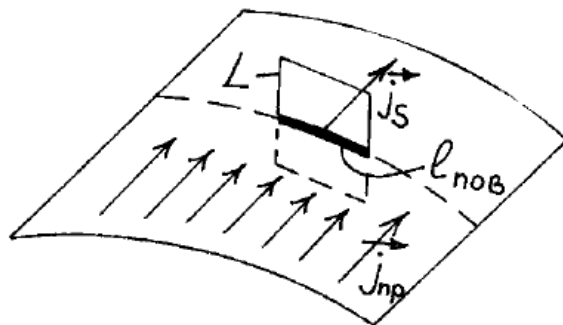


Рис. 3- Понятие вектора плотности поверхностного тока проводимости

Следовательно, получаем:

$$\int_{\Delta \ell} \vec{H}_1 d\vec{\ell} + \int_{\Delta \ell} \vec{H}_2 d\vec{\ell} = \int_{\ell_{\text{пов}}} \vec{J}_S d\vec{\ell}.$$

Наконец, учитывая постоянство $\vec{H}$ на площадке ΔS , получим для касательных составляющих:

$$\begin{aligned} \vec{H}_1 \vec{\tau}_0 - \vec{H}_2 \vec{\tau}_0 &= \vec{J}_S, \\ \text{или:} \quad H_{1\tau} - H_{2\tau} &= J_S. \end{aligned} \quad (7)$$

Итак, делаем вывод о том, что **касательная составляющая вектора напряженности магнитного поля на границе раздела сред претерпевает скачок**, численно равный поверхностной плотности тока проводимости, протекающего по границе раздела сред.

Используя материальное уравнение $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$, определим **граничные условия для касательных составляющих вектора магнитной индукции**:

$$\frac{B_{1\tau}}{\mu_{a1}} - \frac{B_{2\tau}}{\mu_{a2}} = J_S. \quad (8)$$

Если по граничной поверхности ток не протекает, т.е. $J_S = 0$, то **касательная компонента H_τ вектора напряженности магнитного поля на основании (7) непрерывна при переходе из среды 1 в среду 2**, а **нормальная компонента B_τ вектора магнитной индукции терпит разрыв**, величина которого определяется соотношением магнитных проницаемостей сред:

$$\frac{B_{1\tau}}{B_{2\tau}} = \frac{\mu_{a1}}{\mu_{a2}} \quad (\text{при } J_S = 0).$$

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с установленной системой компьютерной алгебры «Mathcad-14».

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1.1 – Исходные данные для задания 1

№ варианта	ε_1	ε_2	Угол θ , Град	поверхностный заряд σ , пКл	напряженность электрического поля E_1 , В
1	8	4	60	-5.6	1.25
2	6	3	55	-4.3	1.1
3	2	1	50	-2.1	1.05
4	7	5	45	4.5	1.5
5	5	3	60	1.2	1.11
6	4	11	55	-3.4	1.01
7	9	3	50	7.6	1.2
8	3	7	45	-2.1	1.3
9	5	5	60	-4.5	1.25
10	1	9	55	2.6	1.1
11	4	2	50	9.1	1.05

12	5	3	45	2.5	1.5
13	6	1	60	-4.1	1.11
14	3	7	55	2.3	1.015
15	9	2	50	1.5	1.2

3. Задание для работы

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Моделирование и исследование граничных условий на поверхности раздела двух сред для векторов электрического поля в системе «Mathcad».

1.1. Моделирование граничных условий вектора напряженности электрического поля.

5) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- диэлектрическая проницаемость первого и второго диэлектрика ϵ_1, ϵ_2 ;

$$\epsilon_0 := \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} = 8.842 \times 10^{-12}$$

- электрическая постоянная – ;
- абсолютная диэлектрическая проницаемость первого и второго диэлектрика ϵ_1, ϵ_2 –

$$\epsilon_{1a} := \epsilon_0 \cdot \epsilon_1 ; \epsilon_{2a} := \epsilon_0 \cdot \epsilon_2 ;$$

- напряженность электрического поля E_1 ;
- поверхностный заряд σ , пкКл
- угол падения θ (deg) согласно варианту;

6) Ввести формулы для расчета:

- тангенциальная составляющая вектора напряженности E_1 –

$$E_{1\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 \cdot \sin(\theta) \end{pmatrix} ;$$

- нормальная составляющая вектора напряженности E_1 –

$$E_{1n} := \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \times 10^6 \end{pmatrix} ;$$

Из теоретического курса известно, что $E_{1\tau} = E_{2\tau}$, но, так как мы принимаем 0 за границу раздела двух сред, то

$$E_{2\tau} := -E_{1\tau}$$

- числовое значение нормальной составляющей вектора напряженности E_2 –

$$E_{2n} := \frac{\epsilon_{1a} \cdot E_{1n} + \sigma}{\epsilon_{2a}} = 8.473 \times 10^6 ;$$

- нормальная составляющая вектора напряженности E_2 –

$$E_2 := \begin{pmatrix} 0 \\ -E_{2n} \end{pmatrix} ;$$

- тангенс угла преломления–

$$\operatorname{tg}\theta_2 := \frac{(E1 \cdot \sin(\theta))}{E\Pi n} ;$$

– угол преломления в радианах и градусах –

$$\theta_{2\text{rad}} := \operatorname{atan}(\operatorname{tg}\theta_2) , \quad \theta_2 := \theta_{2\text{rad}} \cdot \frac{180}{\pi} ;$$

– модуль вектора напряженности во второй среде –

$$E2 := \sqrt{E\Pi n^2 + (E1 \cdot \sin(\theta))^2} = 1.234 ;$$

7) Построить график вектора напряженности $E1$ при переходе из среды с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , принимая 0 за границу раздела двух сред. На рисунке для разграничения двух сред установить метку по оси Y с величиной 0.

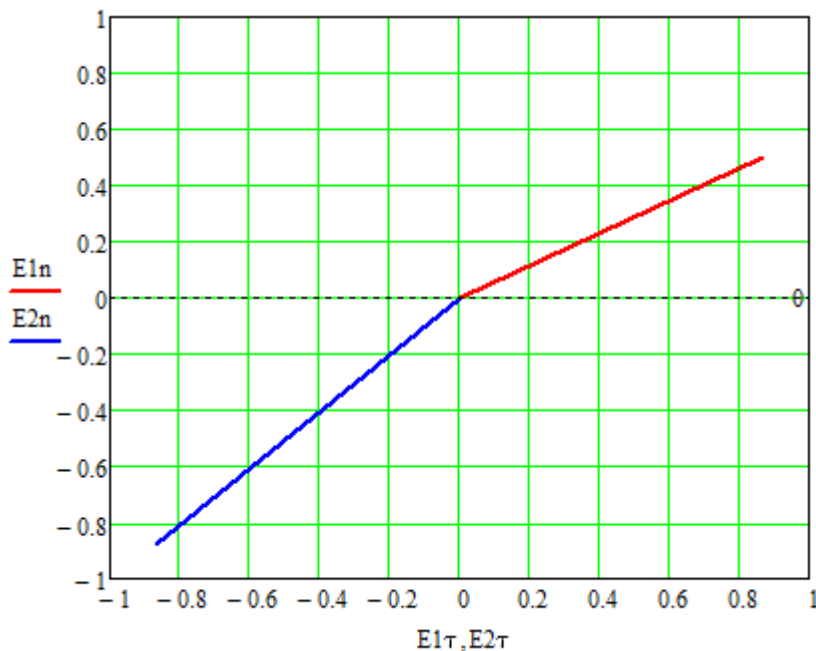


Рис. 1.1 - вектор напряженности $E1$ при переходе из среды с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_2

1.2 Моделирование граничных условий вектора смещения электрического поля.

1) Ввести формулы для расчета:

– числовое значение нормальной составляющей вектора смещения $D1$ –

$$D1n := \epsilon_1 \cdot E1 \cdot \cos(\theta) ;$$

– числовое значение нормальной составляющей вектора смещения $D2$ после прохождения границы раздела двух сред–

$$D\Pi n := \sigma + D1n ;$$

– нормальная составляющая вектора смещения $D1$ –

$$D1n := \begin{pmatrix} 0 \\ D1n \end{pmatrix} ;$$

– нормальная составляющая вектора смещения $D2$ –

$$D2n := \begin{pmatrix} 0 \\ -D\Pi n \end{pmatrix} ;$$

– числовое значение тангенциальной составляющей вектора смещения D1–
 $D1_{\tau} := \epsilon_1 a E_1 \cdot \sin(\theta);$

– числовое значение тангенциальной составляющей вектора смещения D2–
 $D2_{\tau} := E_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \epsilon_2 a ;$

– тангенциальная составляющая вектора смещения D1–

$$D1_{\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ D1_{\tau} \end{pmatrix};$$

– тангенциальная составляющая вектора смещения D2–

$$D2_{\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ -D2_{\tau} \end{pmatrix};$$

– модуль вектора смещения в первой среде –

$$D1 := \sqrt{D1_{\tau}^2 + D1_n^2};$$

– модуль вектора смещения во второй среде –

$$D2 := \sqrt{D2_{\tau}^2 + D2_n^2};$$

2) Построить график вектора смещения при переходе из среды с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , принимая 0 за границу раздела двух сред. На рисунке для разграничения двух сред установить метку по оси Y с величиной 0.

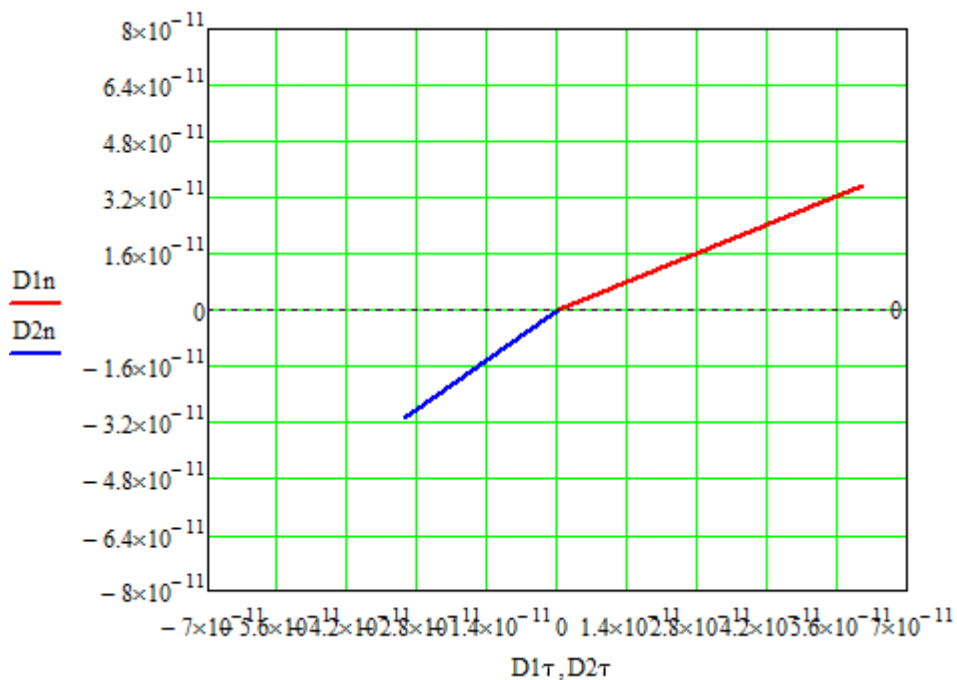


Рис. 1.2 - вектор смещения при переходе из среды с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_2

1.3. Исследование граничных условий вектора напряженности и смещения электрического поля.

Заполните таблицу зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от угла падения, диэлектрической проницаемости и поверхностного заряда. Первую строку таблицы заполните согласно исходным данным, далее изменяйте параметры согласно следующим указаниям –

1) Провести исследование зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от диэлектрической проницаемости. Для этого сначала увеличить диэлектрическую проницаемость ϵ_1 в два раза, а диэлектрическую проницаемость ϵ_2 уменьшить в два раза. Затем уменьшить диэлектрическую проницаемость ϵ_1 в два раза, а диэлектрическую проницаемость ϵ_2 увеличить в два раза. Результаты занести в таблицу 1.2

2) Провести исследование зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от угла падения. Для этого сначала увеличить угол падения на 20 градусов, затем уменьшить на 20 градусов. Результаты занести в таблицу 1.2

3) Провести исследование зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от значения поверхностного заряда. Для этого сначала увеличить значение σ в два раза, затем уменьшить в два раза, а затем изменить знак на противоположный. Результаты занести в таблицу 1.2

Таблица 1.2. зависимость угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от угла падения, диэлектрической проницаемости и поверхностного заряда

	θ_2	E2	D1	D2
согласно исходным данным				
$\epsilon_1=2\epsilon_1,$ $\epsilon_2=0.5\epsilon_2$				
$\epsilon_1=0.5\epsilon_1,$ $\epsilon_2=2\epsilon_2$				
$\theta=$ $\theta+20\text{deg}$				
$\theta= \theta-$ 20deg				
$\sigma = 2\sigma$				
$\sigma = 0.5\sigma$				
$\sigma = -\sigma$				

4) Сделать выводы по результатам проведенных исследований.

Задание 2. Моделирование и исследование граничных условий на поверхности раздела двух сред для векторов магнитного поля в системе «Mathcad».

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2.1 – Исходные данные для задания 2

№ варианта	μ_1	μ_2	Угол θ , Град	поверхностный заряд η , мКл	Индукция магнитного поля B_1 , В
1	1	2	60	-1.6	1.25
2	5	6	55	-1.3	1.1
3	3	5	50	-1.1	1.05
4	4	5	45	-1.5	1.5
5	5	6	60	-1.2	1.11
6	6	7	55	-1.4	1.01

7	2	3	50	-1.6	1.2
8	6	8	45	-1.1	1.3
9	5	6	60	-1.5	1.25
10	1	2	55	-1.6	1.1
11	5	7	50	1.1	1.05
12	3	5	45	-1.5	1.5
13	7	8	60	-1.1	1.11
14	3	6	55	-1.3	1.015
15	1	2	50	-1.5	1.2

2.1. Моделирование граничных условий вектора индукции магнитного поля.

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- Магнитная проницаемость первого и второго диэлектрика μ_1, μ_2 ;
- магнитная постоянная – $\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$;
- абсолютная магнитная проницаемость первого и второго диэлектрика–
 $\mu_{1a} := \mu_0 \cdot \mu_1$

$$\mu_{2a} := \mu_0 \cdot \mu_2;$$

- индукция магнитного поля B1;
- угол падения θ (deg);

2) Ввести формулы для расчета:

- числовое значение тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции B1–

$$BI_{\tau} := B1 \cdot \sin(\theta);$$

- числовое значение нормальной составляющей вектора магнитной индукции B1–

$$BI_n := B1 \cdot \cos(\theta);$$

- числовое значение тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции B2–

$$BII_{\tau} := \left(\frac{BI_{\tau}}{\mu_{1a}} + \eta \right) \cdot \mu_{2a};$$

- числовое значение нормальной составляющей вектора магнитной индукции B2–

$$BII_n := BI_n;$$

- нормальная составляющая вектора индукции B1–

$$B1_n := \begin{pmatrix} 0 \\ BI_n \end{pmatrix};$$

- тангенциальная составляющая вектора индукции B1–

$$B1_{\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ BI_{\tau} \end{pmatrix};$$

- нормальная составляющая вектора индукции B2–

$$B_{2n} := \begin{pmatrix} 0 \\ -B_{1n} \end{pmatrix};$$

– тангенциальная составляющая вектора индукции B_2 –

$$B_{2\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ -B_{1\tau} \end{pmatrix};$$

– тангенс угла преломления–

$$\text{tg}\theta_2 := \frac{B_{1\tau}}{B_{1n}};$$

– угол преломления в радианах и градусах –

$$\theta_{2\text{rad}} := \text{atan}(\text{tg}\theta_2), \quad \theta_2 := \theta_{2\text{rad}} \cdot \frac{180}{\pi};$$

– модуль вектора магнитной индукции во второй среде –

$$B_2 := \sqrt{B_{1n}^2 + B_{1\tau}^2};$$

3) Построить график вектора магнитной индукции при переходе из среды с магнитной проницаемостью μ_1 в среду с магнитной проницаемостью μ_2 , принимая 0 за границу раздела двух сред. На рисунке для разграничения двух сред установить метку по оси Y с величиной 0.

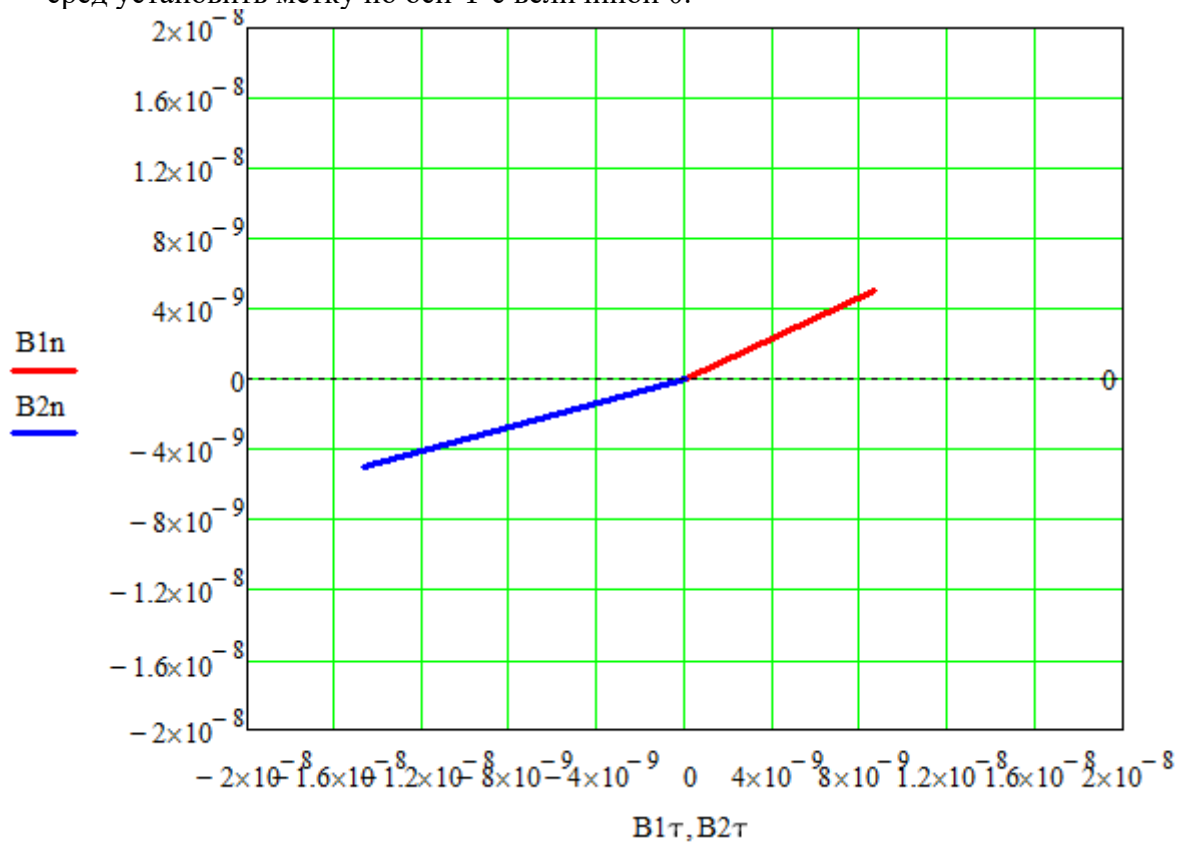


Рис. 2.1 - вектор магнитной индукции при переходе из среды с магнитной проницаемостью μ_1 в среду с магнитной проницаемостью μ_2

2.2. Моделирование граничных условий вектора напряженности магнитного поля.

1) Ввести формулы для расчета:

– числовое значение магнитной напряженности H_1 –

$$H_1 := \frac{B_1}{\mu_1 a};$$

– числовое значение тангенциальной составляющей вектора магнитной напряженности $H_{1\tau}$ –

$$H_{1\tau} := \frac{B_{1\tau}}{\mu_1 a};$$

– числовое значение нормальной составляющей вектора магнитной напряженности H_{1n} –

$$H_{1n} := H_1 \cdot \cos(\theta);$$

– числовое значение тангенциальной составляющей вектора магнитной напряженности H_2 –

$$H_{2\tau} := H_{1\tau} + \eta;$$

– числовое значение нормальной составляющей вектора магнитной напряженности H_2 –

$$H_{2n} := \frac{H_{1n} \cdot \mu_1 a}{\mu_2 a};$$

– нормальная составляющая вектора напряженности H_1 –

$$H_{1n} := \begin{pmatrix} 0 \\ H_{1n} \end{pmatrix};$$

– тангенциальная составляющая вектора напряженности H_1 –

$$H_{1\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ H_{1\tau} \end{pmatrix};$$

– нормальная составляющая вектора напряженности H_2 –

$$H_{2n} := \begin{pmatrix} 0 \\ -H_{2n} \end{pmatrix};$$

– тангенциальная составляющая вектора напряженности H_2 –

$$H_{2\tau} := \begin{pmatrix} 0 \\ -H_{2\tau} \end{pmatrix};$$

– модуль вектора напряженности во второй среде –

$$H_2 := \sqrt{H_{2n}^2 + H_{2\tau}^2};$$

2) Построить график вектора магнитной напряженности при переходе из среды с

магнитной проницаемостью μ_1 в среду с магнитной проницаемостью μ_2 , принимая 0 за границу раздела двух сред. На рисунке для разграничения двух сред установить метку по оси Y с величиной 0.

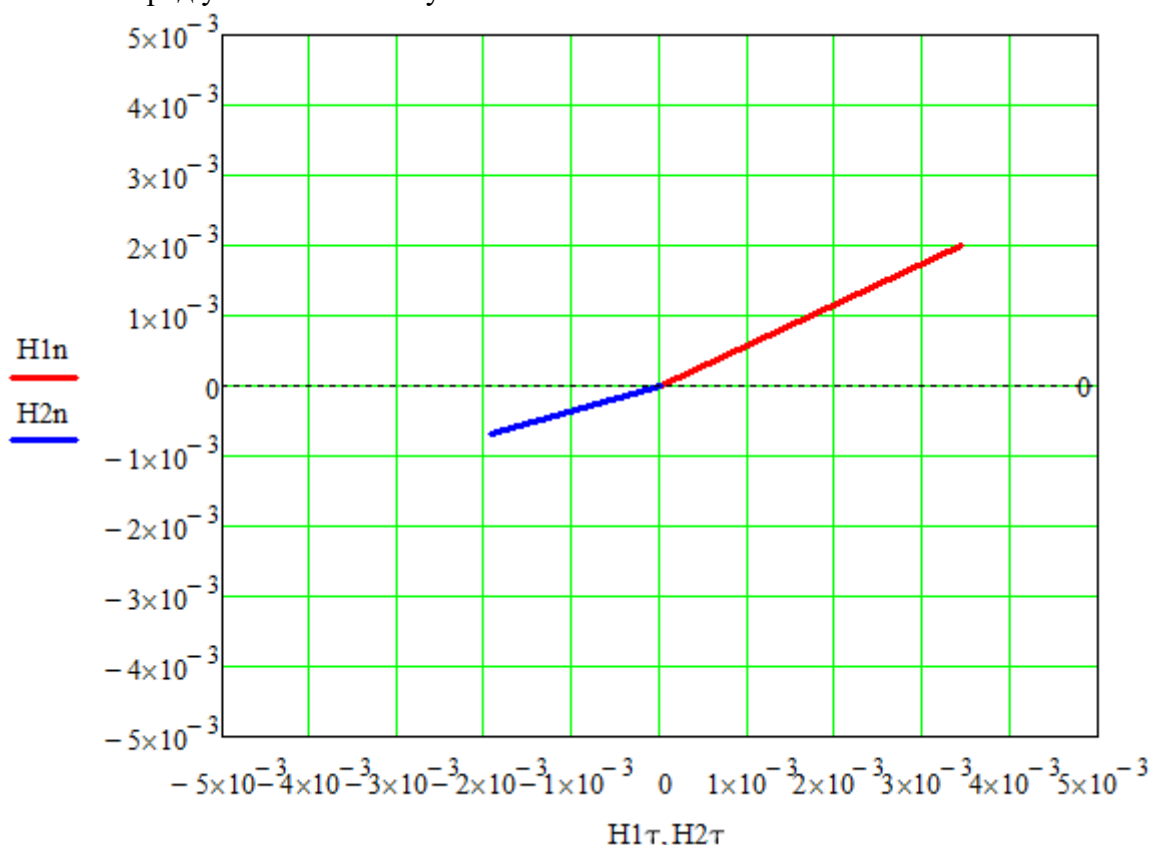


Рис. 2.3 - вектор магнитной напряженности при переходе из среды с магнитной проницаемостью μ_1 в среду с магнитной проницаемостью μ_2

2.3. Исследование граничных условий вектора напряженности и индукции магнитного поля.

Заполните таблицу зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от угла падения, магнитной проницаемости и поверхностного заряда. Первую строку таблицы заполните согласно исходным данным, далее изменяйте параметры согласно следующим указаниям –

- 1) Провести исследование зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от диэлектрической проницаемости. Для этого сначала увеличить магнитную проницаемость в полтора раза, затем уменьшить в 0.7 раз. Результаты занести в таблицу 1.2
- 2) Провести исследование зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от угла падения. Для этого сначала увеличить угол падения на 10 градусов, затем уменьшить на 10 градусов. Результаты занести в таблицу 1.2
- 3) Провести исследование зависимости угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от значения поверхностного заряда. Для этого сначала увеличить значение σ в 1.2 раза, затем уменьшить в 0.7 раз. Результаты занести в таблицу 1.2

Таблица 2.2. зависимость угла преломления, модуля вектора смещения и напряженности от угла падения, магнитной проницаемости и поверхностного заряда

	θ_2	B2	H1	H2
--	------------	----	----	----

согласно исходным данным				
$\mu_1 = 1.5 \mu_1$				
$\mu_1 = 0.7 \mu_1$				
$\theta = \theta + 10 \text{deg}$				
$\theta = \theta - 10 \text{deg}$				
$\eta = 1.2 \eta$				
$\eta = 0.7 \eta$				

4) сделать выводы по результатам проведенных исследований

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. По указанию преподавателя практически выполнить по одному из заданий каждого учебного вопроса, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в разработанной модели.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование падения плоских ЭМВ на границу раздела двух сред

Цель занятия

Выполнить исследование электромагнитных волн на границе раздела двух сред. Приобрести навыки работы с вычислительной техникой при проведении исследований и навыки анализа экспериментальных результатов.

Задание

1. Повторить материал лекционного занятия
2. Определить значения коэффициентов отражения и преломления для различных сред и условий распространения
3. Определить проекции составляющих электромагнитных волн на оси декартовой системы координат
4. Оформить и защитить отчет

Указания по выполнению задания

1. Повторение материала лекционного занятия

Повторение производится в процессе самостоятельной работы каждым студентом самостоятельно путем изучения текстов лекций. В результате повторения обучаемые должны знать ответы на контрольные вопросы работы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАБОТЫ

1. Параллельная и перпендикулярная поляризация электромагнитных волн.
2. Нормальные составляющие электромагнитного поля на границе двух сред.
3. Касательные составляющие электромагнитного поля на границе двух сред.
4. Первый и второй законы Снеллиуса.
5. Определение коэффициента отражения при параллельной поляризации.
6. Определение коэффициента преломления при параллельной поляризации.
7. Определение коэффициента отражения при перпендикулярной поляризации.
8. Определение коэффициента преломления при перпендикулярной поляризации.
9. Угол Брюстера и угол полного внутреннего отражения.
10. Приближенные граничные условия Леонтовича.

2. Определение коэффициентов отражения и преломления

Выполнение лабораторной работы осуществляется с использованием математической модели плоских электромагнитных волн на границе двух сред, составленной в интегрированной системе инженерных и научных расчетов MathCad 2001. Варианты заданий приведены в табл.1. Ввод данных осуществляется с помощью клавиатуры обычным способом в режиме исправления данных, выделенных в тексте программы желтым цветом. Характеристики первой среды соответствуют вакууму $\epsilon_1=1$, $\mu_1=1$, $\sigma_1=0$.

Таблица 1

Номер варианта	Несущая частота, Гц	E_{po} , В/м	Характеристики второй среды для первого опыта			Характеристики второй среды для второго опыта		
			ϵ_2	μ_2	σ_2	ϵ_2	μ_2	σ_2
1	$0,1 \times 10^6$	100	2,0	1	$3,34 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,937	$6,6 \cdot 10^7$
2	$0,2 \times 10^6$	110	2,6	1	$14 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,986	$5,9 \cdot 10^7$
3	$0,3 \times 10^6$	120	2,5	1	$8,34 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,922	$4,4 \cdot 10^7$
4	$0,4 \times 10^6$	130	2,74	1	$17 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,965	$3,81 \cdot 10^7$
5	$0,5 \times 10^6$	140	2,35	1	$6,53 \cdot 10^{-4}$	0,001	1,131	$2,43 \cdot 10^7$
6	$0,6 \times 10^6$	150	3,0	1	$83 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,996	$0,21 \cdot 10^7$
7	$0,7 \times 10^6$	160	6,0	1	$834 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,908	$0,9 \cdot 10^7$
8	$0,8 \times 10^6$	170	9,5	1	$5,28 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,937	$6,6 \cdot 10^7$
9	$0,9 \times 10^6$	180	9,7	1	$22 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,986	$5,9 \cdot 10^7$
10	1×10^6	190	3,82	1	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,922	$4,4 \cdot 10^7$

После проведения исследований с данными первого опыта и оформлением результатов исследований поменять местами характеристики первой и второй среды. Полученные результаты для попадания электромагнитной волны из менее в более прозрачную среду сравнить с предыдущими результатами. Произвести вычисления для данных второго опыта, характеристики первой среды должны соответствовать характеристикам вакуума.

3. Выполнение исследований плоских электромагнитных волн в различных средах

Восстановите условия проведения первого опыта. Последовательно выполните вычисления составляющих электромагнитной волны в первой и второй средах для углов падения ϕ

Номер опыта	1	2	3	4
Угол ϕ	0.1π	0.2π	0.3π	0.4π

Для каждого опыта изобразите полученные графики в отчет по лабораторной работе. Отрадите в выводах изменение длины волны во второй среде. Определите, к какому типу сред относится среда, заданная характеристиками для первого и для второго опытов. Как влияет угол падения на суммарную и преломленную электрические волны.

4. Оформление и защита отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется в печатном виде на листах формата А4. Отчет считается оформленным, если в нем отражены тема и цель лабораторной работы, приведены результаты исследований в виде числовых значений и графиков, а также сформулированы выводы. Защита отчета осуществляется путем представления аккуратно оформленного отчета и ответов на контрольные вопросы работы по выбору преподавателя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование полей элементарных излучателей

Подготовка к занятию:

1. Какие излучатели называются элементарными?
2. Что называется элементарным электрическим диполем (ЭЭД)?
3. Что называется диаграммой направленности излучателя?
4. Что такое характеристика направленности элементарного излучателя?
5. Что называется сопротивлением излучения элементарного излучателя?
6. Что называется мощностью излучения элементарного излучателя?
7. Какую форму имеет диаграмма направленности ЭЭД?
8. Что называется элементарным магнитным диполем (ЭМД)?
9. Какую форму имеет диаграмма направленности ЭМД?
10. Записать выражение для определения напряженности электрического поля в дальней зоне для ЭЭД. Пояснить входящие в него составляющие.
11. Записать выражение для определения напряженности электрического поля в дальней зоне для ЭМД. Пояснить входящие в него составляющие.
12. Записать выражение для определения напряженности магнитного поля в дальней зоне для ЭЭД. Пояснить входящие в него составляющие.
13. Записать выражение для определения напряженности магнитного поля в дальней зоне для ЭМД. Пояснить входящие в него составляющие.
14. Записать выражение для сопротивления излучения ЭЭД. Пояснить входящие в него составляющие.
15. Записать выражение для сопротивления излучения ЭМД. Пояснить входящие в него составляющие.
16. Записать выражение для мощности излучения ЭЭД. Пояснить входящие в него составляющие.
17. Записать выражение для мощности излучения ЭМД. Пояснить входящие в него составляющие.
18. Перечислите известные вам элементарные излучатели?

Задание 1.

Элементарный электрический диполь длиной ℓ располагается в начале декартовой системы координат вдоль оси z , по нему протекает ток I частотой f . На некотором расстоянии от ЭЭД располагается точка наблюдения M с координатами (x, y, z) рис.1. Определить полярные координаты точки наблюдения, амплитудные значения напряженности электрического и напряженности магнитного поля создаваемая ЭЭД в точке наблюдения, сопротивление излучения и мощность излучения ЭЭД. Начертить нормированные характеристики направленности ЭЭД в плоскостях HOY и HOZ . Провести исследование характеристик направленности излучателя. Данные для исследования в соответствии с номером курсанта по журналу взять из таблицы 1.

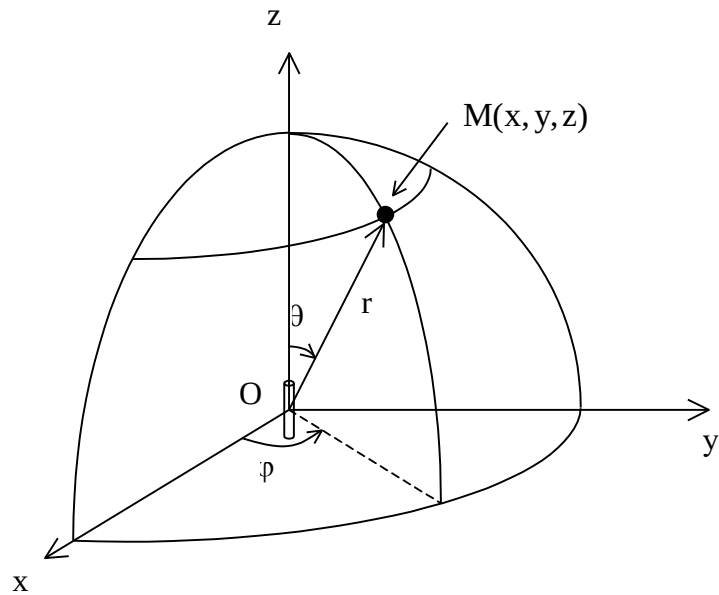


Рис. 1. Размещение ЭЭД относительно азимутальной и угломестной плоскостей.

Задание 2.

Элементарный магнитный диполь в виде квадратной рамки с током со стороной длиной ℓ располагается в начале декартовой системы координат в плоскости XOY, по нему протекает ток I частотой f . На некотором расстоянии от ЭМД располагается точка наблюдения M с координатами (x, y, z) рис.2. Условия взять из задачи номер один. Определить амплитудные значения напряженности электрического и напряженности магнитного поля создаваемая ЭМД в точке наблюдения, сопротивление излучения и мощность излучения ЭМД. Начертить нормированные характеристики направленности ЭМД в плоскостях XOY и XOZ. Провести исследование характеристик направленности излучателя.

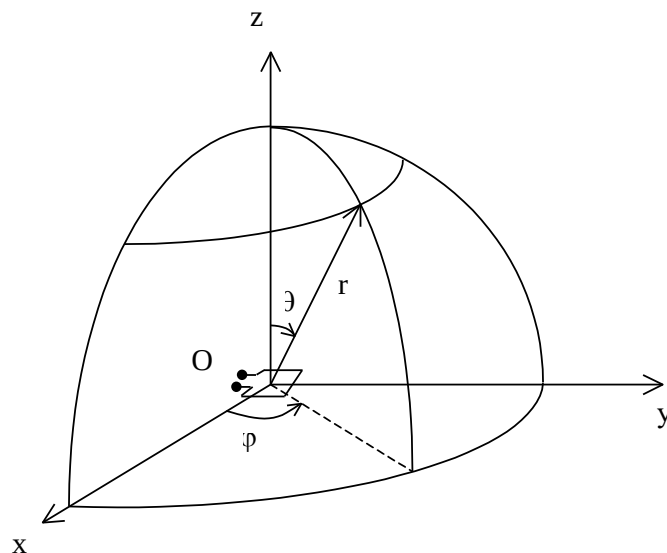


Рис. 2. Размещение ЭМД относительно азимутальной и угломестной плоскостей

Задание 3.

Провести сравнительный анализ ЭЭД и ЭМД. По сопротивлению и мощности излучения, по создаваемым напряженностям электрического и магнитного полей сделать вывод об эффективности элементарных диполей. Определить при каком значении тока

протекаемого по ЭМД он будет создавать в точке приема напряженность электрического поля такую как у ЭЭД.

Сравнить характеристики направленности ЭЭД и ЭМД.

Таблица 1.

Исходные данные

№ по журналу	x, м	y, м	z, м	ℓ , м	I, А	f, МГц
1.	1000	2000	1000	2	3.5	5
2.	300	500	200	0.5	0.2	20
3.	7000	10000	6000	10	4	2
4.	2000	2000	2000	4	0.1	6
5.	2200	1300	300	1	2	30
6.	800	2000	200	5	0.3	6
7.	1700	1400	400	10	0.8	3
8.	700	700	700	0.1	5	200
9.	300	400	500	0.2	2	120
10.	500	200	200	0.3	0.3	100
11.	1300	1200	1000	4.5	0.1	6
12.	6000	5000	300	7	5.4	3.7
13.	2300	3500	1500	9	2.6	3.1
14.	100	230	200	0.2	0.3	150
15.	3500	2500	1500	6	3.7	5
16.	950	1050	700	3.5	0.65	7.2
17.	1300	1200	4000	4.2	0.7	6
18.	500	600	300	0.8	1.3	25
19.	700	400	100	0.25	1.4	80
20.	4000	5000	7000	7.5	4.4	3.1
21.	4000	5000	2000	7.8	2.1	2
22.	1600	3600	3100	3.4	0.7	7.2
23.	6500	7000	10000	8.5	6	2.5
24.	100	100	50	0.1	0.25	270
25.	160	160	300	0.15	2	180
26.	420	100	100	0.22	2.4	110
27.	700	350	450	0.36	0.2	65
28.	1700	1100	4500	6.2	0.9	4.3
29.	3300	1000	2500	1	3.5	10
30.	2300	2000	250	5.7	3.1	5
31.	400	3000	2300	4.3	0.3	6.1
32.	8200	8000	1000	20	5	1.5
33.	4100	5200	2000	15	3.2	2
34.	400	500	2000	12	2.1	2.2
35.	500	550	200	0.6	0.3	10

Методические рекомендации:

Элементарными излучателями называют излучатели, геометрические размеры которых значительно меньше длины волны.

Изучение и исследование элементарных излучателей способствует пониманию процесса излучения антенн, так как любая сколь угодно сложная антенна может быть

представлена состоящей из некоторого множества элементарных излучателей с заданными токами. Поле создаваемое этими токами определяется как суперпозиция полей элементарных излучателей. Определение поля реальных антенн методом суперпозиции полей элементарных излучателей является одним из основных методов в теории антенн.

Исследование направленных свойств элементарных излучателей, заключается в экспериментальном измерении зависимости амплитуды напряженности ЭМП или величины вектора Пойтинга от угловых координат θ и φ при $r = \text{const}$. Здесь θ и φ – угол места и азимут соответственно, r – расстояние до точки наблюдения. Эта зависимость называется характеристикой направленности (ХН) излучателя. Графическое изображение ХН называется диаграммой направленности (ДН).

ЭЭД называют источник электромагнитного поля, представленный в виде элемента электрического тока (проводимости или смещения), длина которого много меньше длины волны источника в свободном пространстве

$$\ell \ll \lambda, \quad (1)$$

где ℓ – длина элемента тока;

λ – длина волны, а ток по всей длине имеет постоянную амплитуду и фазу.

Наибольший интерес с практической точки зрения представляют поля ЭЭД и ЭМД в дальней зоне, т.е. в точках пространства, для которых выполняется неравенство

$$k \cdot r \gg 1, \quad (2)$$

где $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ – волновое число;

r – расстояние до точки наблюдения.

Составляющие электромагнитного поля в дальней зоне для ЭЭД определяются следующими выражениями

$$E(\theta) = \frac{i \cdot k \cdot \dot{I}_m \cdot \ell \cdot Z_C}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot \sin(\theta), \quad H(\varphi) = \frac{i \cdot k \cdot \dot{I}_m \cdot \ell}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot \sin(\theta), \quad (3)$$

где $\dot{I}_m$ – ток протекающий по ЭЭД;

Z_C – волновое сопротивление среды.

Характеристика направленности ЭЭД в плоскости Е определяется выражением

$$f(\theta) = \sin(\theta). \quad (4)$$

Нормированная характеристика направленности ЭЭД

$$F(\theta) = \frac{f(\theta)}{f\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\sin(\theta)}{1} = \sin(\theta). \quad (5)$$

Характеристика направленности ЭЭД в плоскости Н

$$f(\varphi) = F(\varphi) = 1. \quad (6)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что ЭЭД создает максимальную напряженность ЭМП в плоскости Е при $\theta = \frac{\pi}{2}$ и $\theta = \frac{3\pi}{2}$, минимальную напряженность поля при $\theta = 0$ и $\theta = \pi$. В плоскости Н поле излучения ЭЭД имеет ненаправленный характер.

Одной из главных характеристик ЭЭД является сопротивление излучения R_Σ , являющееся коэффициентом пропорциональности между током, возбуждающим ЭЭД и мощностью излучения

$$P_\Sigma = \frac{I^2}{2} \cdot R_\Sigma. \quad (7)$$

Сопротивление излучения ЭЭД в свободном пространстве может быть определено из выражения

$$R_\Sigma = 80 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2. \quad (8)$$

ЭМД называют источник электромагнитного поля, представленный в виде элемента "магнитного" тока, размеры которого много меньше длины волны источника в свободном пространстве.

Рамку небольших размеров, обтекаемую током проводимости, можно считать ЭМД. Для определения поля, создаваемого ЭМД, пользуются принципом перестановочной двойственности уравнений Максвелла.

Составляющие электромагнитного поля в дальней зоне для ЭМД определяются следующими выражениями

$$E(\varphi) = \frac{k^2 \cdot \dot{I}_B \cdot S \cdot Z_C}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot \sin(\theta), \quad H(\theta) = -\frac{k^2 \cdot \dot{I}_B \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot \sin(\theta), \quad (9)$$

где S – площадь рамки;

$\dot{I}_B$ – ток протекающий по витку ЭМД.

Характеристика направленности ЭМД в плоскости (Н) определяется выражением

$$f(\varphi) = \sin(\varphi), \quad (10)$$

а нормированная характеристика направленности

$$F(\varphi) = \frac{f(\varphi)}{f(0)} = \frac{\sin(\varphi)}{1} = \sin(\varphi). \quad (11)$$

ХН в плоскости (Е) определяется выражением

$$f(\theta) = F(\theta) = 1$$

Сопротивление излучения ЭМД определяется из выражения

$$R_\Sigma = \frac{2\pi}{3} \cdot \left(\frac{k \cdot S}{\lambda} \right)^2 \cdot Z_B. \quad (13)$$

Поляризация изучаемых антенной волн определяется типом передающей антенны и ее положением в пространстве. Знание поляризационных характеристик антенн необходимо для обеспечения надежной радиосвязи в различных диапазонах волн.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Расчет поля элементарных излучателей

Подготовка к занятию:

19. Какие излучатели называются элементарными?
20. Что называется элементарным щелевым излучателем?
21. Что называется диаграммой направленности излучателя?
22. Что такое характеристика направленности элементарного излучателя?
23. Что называется сопротивлением излучения элементарного излучателя?
24. Что называется мощностью излучения элементарного излучателя?
25. Какую форму имеет диаграмма направленности элементарного щелевого излучателя?
26. Что называется элементом Гюйгенса?
27. Какую форму имеет диаграмма направленности элемента Гюйгенса?
28. Записать выражение для определения напряженности электрического поля в дальней зоне для элементарного щелевого излучателя. Пояснить входящие в него составляющие.
29. Записать выражение для определения напряженности электрического поля в дальней зоне для элемента Гюйгенса. Пояснить входящие в него составляющие.
30. Записать выражение для определения напряженности магнитного поля в дальней зоне для элементарного щелевого излучателя. Пояснить входящие в него составляющие.
31. Записать выражение для сопротивления излучения элементарного щелевого излучателя. Пояснить входящие в него составляющие.
32. Записать выражение для мощности излучения элементарного щелевого излучателя. Пояснить входящие в него составляющие.
33. Записать выражение для мощности излучения элемента Гюйгенса. Пояснить входящие в него составляющие.
34. Перечислите известные вам элементарные излучатели?

	Содержание вопросов	
	Учебные вопросы занятия	
	Расчет поля элементарного щелевого излучателя.	
	Расчет поля элемента Гюйгенса.	
	Сравнительный расчет полей элементарных излучателей.	

Задание на лабораторное занятие.

Задание 1.

Задан элементарный щелевой излучатель длиной $\ell = \sqrt{N}$ см и шириной $a = \frac{\ell}{100}$ с напряженностью электрического поля между краями щели $E_m = \sqrt{N} \left[\frac{B}{M} \right]$ и частотой поля $f = N \cdot 10^7$ Гц располагается в начале системы координат. Определить амплитудные значения напряженности электрического и магнитного полей создаваемые ЭЩИ в направлении максимума излучения на расстоянии $r = N \cdot 10^2$ м. Определить сопротивление излучения и мощность излучения ЭЩИ. Начертить нормированные характеристики направленности ЭЩИ в плоскостях XOY и XOZ.

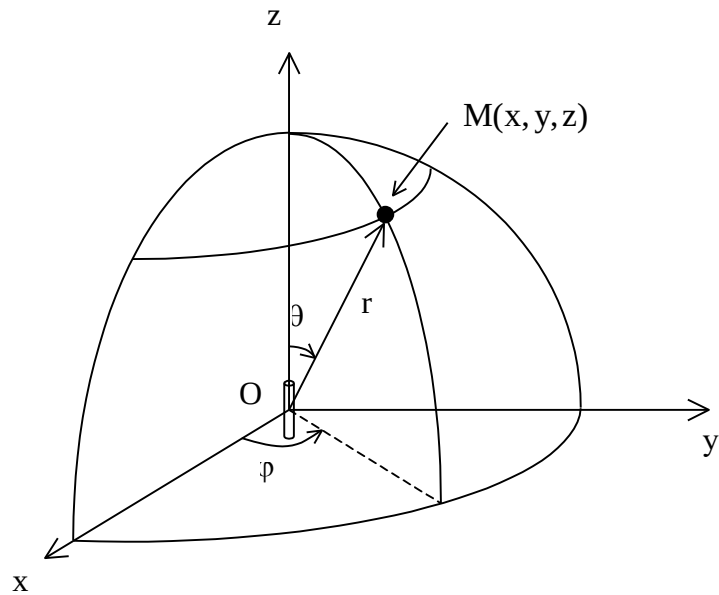


Рис. 1. Размещение ЭЦИ относительно азимутальной и угломестной плоскостей.

Задание 2.

Элемент Гюйгенса в виде квадратной площадки со стороной ℓ , с поверхностной напряженностью электрического поля $E_s = E_m$ и частотой поля f располагается в начале декартовой системы координат в плоскости XOY . Определить амплитудные значения напряженности электрического и магнитного полей создаваемые элементом Гюйгенса в направлении максимума излучения на расстоянии r . Условия взять из задачи номер один. Начертить нормированные характеристики направленности элемента Гюйгенса в плоскостях XOY и XOZ .

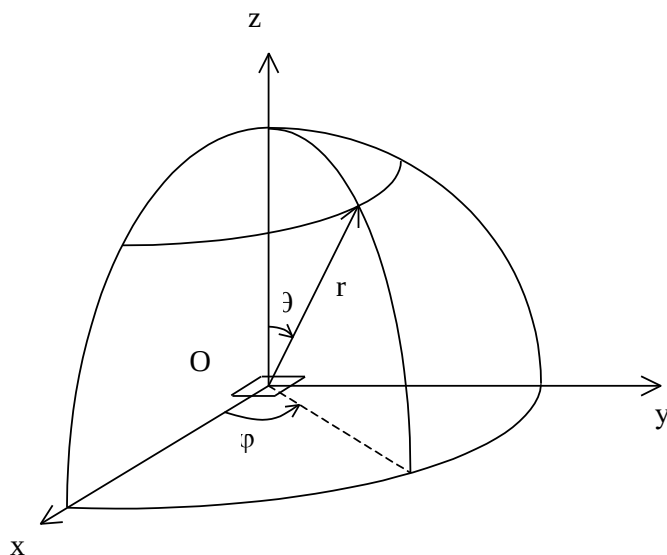


Рис. 2. Размещение элемента Гюйгенса относительно азимутальной и угломестной плоскостей

Задание 3.

Провести сравнительный анализ ЭЦИ и элемента Гюйгенса по создаваемым напряженностям электрического и магнитного полей в направлении максимума излучения. Сделать вывод об эффективности элементарных диполей.

Определить при какой напряженности электрического поля между краями щели на расстоянии r будет создаваться такая же напряженность электрического поля как у элемента Гюйгенса. Сравнить характеристики направленности ЭЩИ и элемента Гюйгенса.

Методические рекомендации:

Элементарный щелевой излучатель представляет из себя щель, длиной ℓ и шириной a , прорезанную в бесконечной идеально проводящей плоскости, по которой протекает поверхностный переменный ток причем выполняется условие $a \ll \ell \ll \lambda$, где λ - длина волны тока.

Из-за протекания переменного тока по плоскости на краях щели появляются переменные во времени заряды, которые индуцируют переменное электрическое поле. Это поле согласно 1-ому уравнению Максвелла в свою очередь индуцирует переменное магнитное поле. Таким образом элементарная щель излучает переменное ЭМП.

Проведя сравнение структуры поля элементарной щели и ЭМД аналогичное проведенному для элементарной рамки нетрудно убедиться в идентичности структуры поля перечисленных излучателей. Соответственно, аналогичный вид имеют диаграммы направленности и выражения, описывающие поле элементарной щели в дальней зоне:

$$\dot{E}_{\varphi} = \frac{ikU_{щ}\ell}{4\pi r} \cdot e^{-ikr} \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

$$\dot{H}_{\theta} = -\frac{ikU_{щ}\ell}{4\pi r Z_B} \cdot e^{-ikr} \cdot \sin \theta. \quad (2)$$

Таким образом, для того, чтобы напряженность поля элементарной щели была равна напряженности поля ЭЭД, должно выполняться соотношение:

$$U_{щ} = 0.5 \cdot I \cdot Z_B. \quad (3)$$

Выражения для мощности излучения и сопротивления излучения элементарной щели могут быть получены на основании соответствующих выражений для ЭЭД и выражений :

$$R_{\Sigma} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot Z_B \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2, \quad (4)$$

$$P_{\Sigma CP} = \frac{4}{3} \pi \frac{U_{щ}^2}{Z_B} \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2. \quad (5)$$

Элемент Гюйгенса

Для многих типов антенн, особенно используемых в СВЧ диапазонах, затруднительно определить распределение токов в элементах антенны, при этом, для определения поля таких антенн не пригодны знания о полях создаваемых ЭЭД, ЭМД и элементарной щелью. Однако, в большинстве случаев для таких антенн можно определить распределение поля в плоскости раскрытия антенны. Напряженность поля указанных антенн в дальней зоне может быть определена на основании принципа Гюйгенса-Кирхгофа, в соответствии с которым каждый элемент фронта волны является источником вторичных сферических волн. Такой элемент фронта волны называется элементом Гюйгенса. Таким образом, знание параметров и характеристик элемента Гюйгенса позволяет аналогично ранее рассмотренным элементарным излучателям, на основании принципа суперпозиции определять поля более сложных излучателей - антенн.

Рассмотрим прямоугольный участок фронта волны с размерами $\ell_1 \ll \lambda$ и $\ell_2 \ll \lambda$ на котором заданы напряженности ЭМП $\vec{E}_S$ и $\vec{H}_S$ (рисунок 3 а). Пользуясь граничными

условиями для касательных составляющих векторов поля, (СРП №1), для $\vec{E}_S$ и $\vec{H}_S$ можно записать:

$$\vec{H}_S = \frac{\vec{I}}{\ell_2} \quad (6)$$

$$\vec{E}_S = \frac{\vec{I}_M}{\ell_1} \quad (7)$$

где в правой части 6, 7 стоят плотности поверхностных токов проводимости и магнитного тока соответственно.

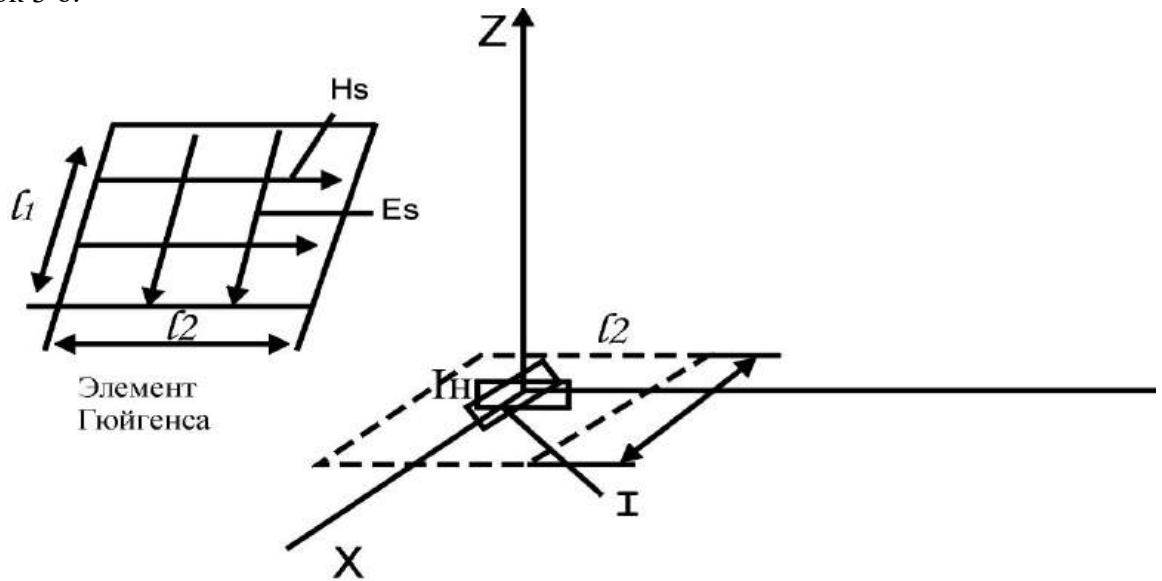
Перепишав 6, 7 в виде:

$$\vec{I} = \vec{H}_S \cdot \ell_2, \quad (8)$$

$$\vec{I}_M = \vec{E}_S \cdot \ell_1. \quad (9)$$

Элемент Гюйгенса можно рассматривать как два взаимно перпендикулярных элементарных излучателя ЭЭД и ЭМД длиной соответственно ℓ_1 и ℓ_2 и токами $\vec{I}$ и $\vec{I}_M$.

Расположим указанные излучатели в начале системы координат, как это показано на рисунок 3 б.



ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ №8

Исследование дифракции плоской волны на цилиндре

Задание на исследование:

Исследовать зависимость модуля комплексной амплитуды напряженности вторичного электрического поля E_m в дальней зоне ($r \gg a, r \gg \lambda$) в зависимости от угла φ при постоянном значении переменной r (отношение $E_m(r, \varphi) / E_m(r, 0)$) для различных значений ka .

Таблица 1 – Исходные данные по вариантам:

№ по списку	ka1	ka2	ka3	ka4
1	0.45	1.5	4.2	8.5
2	0.48	1.52	4.0	8.0
3	0.5	1.54	4.78	9.2
4	0.52	1.56	4.55	9.8
5	0.47	1.58	4.95	8.2
6	0.55	1.6	4.8	9.4
7	0.54	1.62	4.1	10.0
8	0.49	1.64	4.64	8.1
9	0.5	1.66	5.0	8.6
10	0.46	1.68	4.72	9.6
11	0.51	1.7	4.5	8.9
12	0.53	1.72	4.25	9.5
13	0.52	1.74	4.94	8.4
14	0.54	1.76	4.3	9.7
15	0.5	1.78	4.48	8.8
16	0.46	1.8	4.05	8.0
17	0.49	1.82	4.12	9.0
18	0.45	1.84	4.56	9.3
19	0.51	1.86	4.9	8.7
20	0.55	1.8	4.64	9.9
21	0.47	1.84	4.38	9.3
22	0.53	1.88	5.0	8.7
23	0.52	1.92	4.0	8.3
24	0.48	1.96	4.85	9.4
25	0.45	2	4.62	9.8

1. Значение m установить от 1 до 20
2. kr задаем равное 100
3. согласно варианту выбираем значения ka

Методические рекомендации:

Пусть плоская линейно поляризованная электромагнитная волна падает на идеально проводящий круговой цилиндр радиуса a перпендикулярно его оси (рис. 11.1). Введем цилиндрическую систему координат r, φ, z , ось Z которой совпадает с осью цилиндра, а угол φ отсчитывается от оси X , противоположной направлению распространения волны.

При решении задачи можно ограничиться рассмотрением двух типов поляризации падающей волны относительно оси цилиндра:

- а) вектор $\vec{E}^0$ параллелен оси Z ;
- б) вектор $\vec{H}^0$ параллелен оси Z .

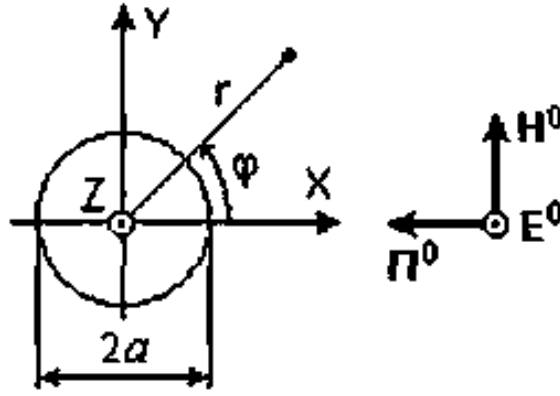


Рисунок 11.1

Любую другую ориентацию векторов $\dot{\vec{E}}^0$ и $\dot{\vec{H}}^0$ первичного поля можно представить как суперпозицию этих случаев. Остановимся подробнее на первой задаче, так как вторая решается аналогично. Напряженность электрического поля падающей волны имеет только составляющую по оси Z ($\dot{\vec{E}}^0 = \vec{z}_0 \dot{E}^0(r, \varphi)$)

$$\dot{E}^0(r, \varphi) = E_0 \exp(ikx) = E_0 \exp(ikr \cos \varphi). \quad (11.2)$$

Рассматриваемая задача является двумерной (отсутствует зависимость от переменной z), поэтому уравнение для напряженности вторичного электрического поля, которая также будет иметь лишь составляющую по оси Z ($\dot{\vec{E}}_m = \vec{z}_0 \dot{E}_m(r, \varphi)$), принимает вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{E}_m}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{E}_m}{\partial \varphi^2} + k^2 \dot{E}_m = 0; \quad r \geq a; \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (11.3)$$

Функция E_m на поверхности S должна удовлетворять граничному условию (11.1), которое в рассматриваемом случае принимает вид

$$\dot{E}_m(a, \varphi) = -E_0 \exp(ika \cos \varphi), \quad (11.4)$$

а в бесконечно удаленных точках - условию излучения. Это условие, по существу, состоит в следующем. При $r \rightarrow \infty$ в выражение для функции $\dot{E}(r, \varphi)$ должны входить составляющие с фазовым множителем вида $\exp(-ikr)$, которые соответствуют волне, уходящей в бесконечность от оси Z ; составляющие же с фазовым множителем $\exp(ikr)$, которые соответствуют волне, распространяющейся из бесконечности к оси Z , должны отсутствовать.

Для решения задачи применим метод Фурье. Представим функцию искомую $\dot{E}_m(r, \varphi)$ в виде

$$\dot{E}_m(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi). \quad (11.5)$$

Подставим эту формулу в уравнение (11.3) и умножим обе его части на r^2 . Выполним дифференцирование и разделим затем получающееся уравнение почленно на произведение $R(r)\Phi(\varphi)$

$$\frac{r \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR(r)}{dr} \right)}{R(r)} + k^2 r^2 = \frac{d^2 \Phi(\varphi)/d\varphi^2}{\Phi(\varphi)}. \quad (11.6)$$

Левая часть полученного уравнения зависит только от переменной r , а правая - только от переменной φ . Переменные r и φ являются независимыми. Следовательно,

уравнение (11.6) представляет собой равенство двух независимых функций. Это возможно только при условии, что каждая из функций равна постоянной. Обозначая последнюю через m^2 , приходим к двум независимым дифференциальным уравнениям:

$$\frac{d^2\Phi(\varphi)}{d\varphi^2} + m^2\Phi(\varphi) = 0, \quad (11.7)$$

$$\frac{d^2R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \left(k^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R(r) = 0. \quad (11.8)$$

Очевидно, что при изменении угла φ на 2π значение искомой функции $\dot{E}_m(r, \varphi)$ должно остаться прежним

$$\dot{E}_m(r, \varphi + 2\pi) = \dot{E}_m(r, \varphi). \quad (11.9)$$

Условие (11.9) можно переписать для функции $\Phi(\varphi)$:

$$\Phi(\varphi + 2\pi) = \Phi(\varphi). \quad (11.10)$$

Решение уравнения (11.7) имеет вид

$$\Phi(\varphi) = A \sin m\varphi + B \cos m\varphi, \quad (11.11)$$

где A и B - произвольные постоянные.

Условие (11.10) выполняется, если m -целое число ($m=0,1,2, \dots$).

Напряженность первичного электрического поля - четная функция относительно угла φ . Поэтому можно предположить, что функция E , а следовательно, и функция Φ также должны быть четными относительно угла φ . Таким образом, постоянная $A=0$, отсюда получаем

$$\Phi(\varphi) = B \cos m\varphi. \quad (11.12)$$

Уравнение (11.8) является уравнением Бесселя. Его решение можно представить в виде

$$R(r) = C'J_m(kr) + D'N_m(kr), \quad (11.13)$$

где $J_m(kr)$ и $N_m(kr)$ -функции Бесселя m -го порядка первого и второго рода соответственно (функцию $N_m(kr)$ часто называют также функцией Неймана m -го порядка), а C' и D' - произвольные постоянные.

В рассматриваемом случае решение уравнения (11.8) удобнее выразить через функции Бесселя третьего рода-функции Ханкеля:

$$R(r) = CH_m^{(1)}(kr) + DH_m^{(2)}(kr), \quad (11.14)$$

где $H_m^{(1)}(kr)$ и $H_m^{(2)}(kr)$ -функции Ханкеля m -го порядка первого и второго рода соответственно;

C и D - произвольные постоянные.

Функции Бесселя, Неймана и Ханкеля часто называют также цилиндрическими функциями первого, второго и третьего рода соответственно. Функции $H_m^{(1)}(kr)$ и $H_m^{(2)}(kr)$ выражаются через функции $J_m(kr)$ и $N_m(kr)$ соотношениями

$$\begin{aligned} H_m^{(1)}(kr) &= J_m(kr) + iN_m(kr); \\ H_m^{(2)}(kr) &= J_m(kr) - iN_m(kr). \end{aligned} \quad (11.15)$$

При $r \rightarrow \infty$ справедливы следующие асимптотические представления:

$$\left. \begin{aligned} H_m^{(1)}(kr) \\ H_m^{(2)}(kr) \end{aligned} \right\} \cong \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} \exp \left\{ \pm i \left[kr - \frac{\pi}{4} (2m+1) \right] \right\}. \quad (11.16)$$

Иными словами, функция $H_m^{(1)}(kr)$ соответствует цилиндрической волне, распространяющейся из бесконечности к оси Z , а функция $H_m^{(2)}(kr)$ -цилиндрической волне, распространяющейся от оси Z к бесконечности вдоль радиусов r . Следовательно, для выполнения условия излучения необходимо считать, что постоянная $C = 0$, при этом формула (11.14) принимает вид

$$R(r) = DH_m^{(2)}(kr), (11.17)$$

Таким образом, решением уравнения (11.3), удовлетворяющим условию излучения, может служить функция

$$\dot{E}_m = D_m H_m^{(2)}(kr) \cos m\varphi. (11.18)$$

где D_m - некоторая постоянная.

Осталось выполнить граничное условие (11.4). Для этого - представим искомое решение $\dot{E}_m(r, \varphi)$ в виде суперпозиции всех возможных функций (11.12):

$$\dot{E}_m(r, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} D_m H_m^{(2)}(kr) \cos m\varphi. (11.19)$$

Очевидно, выражение (11.19) является четной функцией, периодической по углу φ с периодом 2π , которая удовлетворяет условию излучения и уравнению (11.3). Коэффициенты D_m - пока произвольные постоянные. Требуется определить их таким образом, чтобы выполнялось условие (11.4). Подставим функцию (11.13) в (11.4) и воспользуемся известной из теории бесселевых функций формулой:

$$e^{ika \cos \varphi} = J_0(ka) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (i)^m J_m(ka) \cos m\varphi. (11.20)$$

Соотношение (11.20) можно получить, например, разлагая функцию $e^{ika \cos \varphi}$ в обычный ряд Фурье. Подставляя (11.19) и (11.20) в (11.4), приходим к равенству

$$\sum_{m=0}^{\infty} D_m H_m^{(2)}(ka) \cos m\varphi = -E_0 \left[J_0(ka) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (i)^m J_m(ka) \cos m\varphi \right]. (11.21)$$

Левую и правую части этого равенства можно рассматривать как разложение одной и той же функции в ряд Фурье. Так как такое разложение единственно, то коэффициенты разложения должны быть равны и, следовательно,

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= -E_0 \frac{J_0(ka)}{H_0^{(2)}(ka)}, \\ D_m &= -2i^m E_0 \frac{J_m(ka)}{H_m^{(2)}(ka)}, \quad m \geq 1 \end{aligned} \right\} (11.22)$$

Подставляя формулы (11.22) в (11.19), получаем окончательное выражение для напряженности вторичного электрического поля, возникающего при падении плоской волны на идеально проводящий цилиндр радиуса a :

$$\dot{E}_m = -z_0 E_0 \left[\frac{J_0(ka)}{H_0^{(2)}(ka)} H_0^{(2)}(kr) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (i)^m \frac{J_m(ka)}{H_m^{(2)}(ka)} H_m^{(2)}(kr) \cos m\varphi \right]. (11.23)$$

Ряд в выражении (11.23) является абсолютно сходящимся, его можно почленно дифференцировать. Поэтому данное выражение позволяет также найти напряженность вторичного магнитного поля

$$\dot{H}_m = \frac{i \cdot \text{rot}(\dot{E}_m)}{\omega \mu}, \quad (11.24)$$

и распределение токов на поверхности цилиндра.

На рисунке 11.2 показана зависимость модуля комплексной амплитуды напряженности вторичного электрического поля E_m в дальней зоне ($r \gg a, r \gg \lambda$) в зависимости от угла φ при постоянном значении переменной r (отношение $E_m(r, \varphi) / E_m(r, 0)$) для различных значений ka . Пунктирная кривая соответствует данным, рассчитанным на основе геометрической оптики.

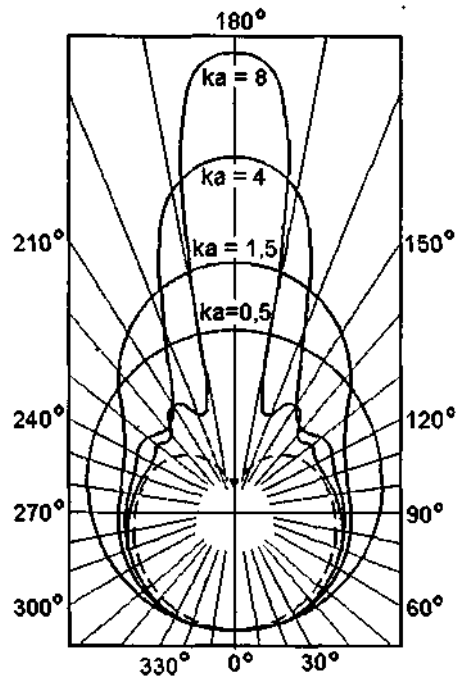


Рисунок 11.2

Как видно из графиков, в результате дифракции появляется вторичное поле с четко выраженным максимумом в направлении $\varphi = 180^\circ$.

Решение задачи в форме (11.16) в принципе пригодно для цилиндра любого радиуса. Однако при больших значениях параметра ka , т.е. если диаметр цилиндра велик по сравнению с длиной волны ($ka = 2\pi a / \lambda$), ряд в (11.23) сходится медленно и решение становится неудобным для анализа. Поэтому в случае $ka \gg 1$ обычно стремятся получить более простые (но достаточно точные для практических целей) асимптотические формулы.

Изложенный строгий метод решения задачи дифракции называют *методом Фурье*. Однако такое решение удастся получить лишь для тел простейшей конфигурации (например, круговой и эллиптический цилиндры, полуплоскость, клин, бесконечно протяженная бесконечно тонкая полоса конечной ширины, сфера, круговой конус, эллипсоид вращения, бесконечно тонкий диск и др.). Это связано с ограничениями, лежащими в основе метода Фурье. Для его применения необходимо, чтобы поверхность рассматриваемого тела полностью совпадала с какой-либо координатной поверхностью системы координат, в которой возможно разделение переменных в уравнении Гельмгольца. Если указанное условие не выполняется, для решения дифракционной задачи необходимо использовать другие методы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8.

Моделирование и исследование явления дифракции Френеля на круглом отверстии и полуплоскости

Подготовка к занятию

1. Основные теоретические сведения:

Дифракция электромагнитных волн на круглом отверстии может быть описана в рамках принципа Гюйгенса–Френеля с использованием скалярной теории дифракции Кирхгофа. При этом напряжённость поля дифрагировавшего на некотором отверстии S может быть определена в точке приема на основании формулы Кирхгофа

$$E_2 = \frac{i \cdot k}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{30 \cdot P_A \cdot G_1} \cdot \int_S f_1(\theta, \varphi) \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\exp(-i \cdot k \cdot (r_1 + r_2))}{r_1 \cdot r_2} dS, \quad (1)$$

где P_A – мощность подводимая к источнику ЭМВ;

G_1 – коэффициент усиления передающей антенны;

$f_1(\theta, \varphi)$ – характеристика направленности передающей антенны;

α – угол между нормалью к поверхности S и направлением на точку наблюдения;

r_1, r_2 – расстояние от передающей антенны до экрана и от экрана до точки наблюдения соответственно.

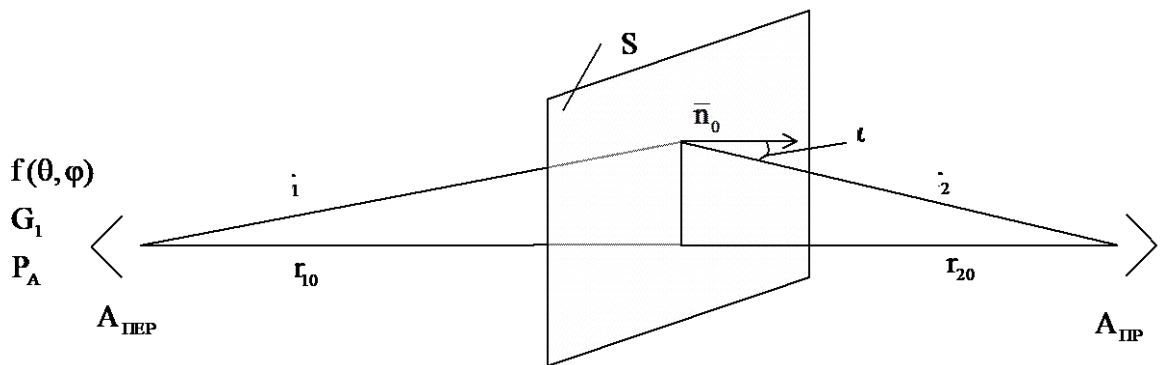


Рис.1. Пояснение принципа Гюйгенса–Френеля.

В соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля поверхность разбивается на зоны Френеля из условия:

$$(r_{1(n-1)} + r_{2(n-1)}) - (r_{1n} + r_{2n}) \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

где $r_{1n}, (r_{1(n-1)})$ – расстояние от передающей антенны до границы n -й, $(n-1)$ зоны;

$r_{2n}, (r_{2(n-1)})$ – расстояние от границы n -й, $(n-1)$ зоны до точки, где находится приемная антенна.

В соответствии с (2) радиус n -й зоны:

$$\rho_n = \sqrt{n \cdot \lambda \cdot \frac{r_{10} \cdot r_{20}}{r_{10} + r_{20}}} \quad (3)$$

Радиус области существенной для распространения составляет

$$\rho_c = \sqrt{\lambda \cdot \frac{r_{10} \cdot r_{20}}{3 \cdot (r_{10} + r_{20})}} \quad (4)$$

Результаты расчетов $E_2 = f(\pi \cdot \rho^2) = f(S)$ приведены в нормированном виде в пятом столбце таблицы 2.

Задача дифракции плоской электромагнитной волны на полуплоскости была решена Зоммерфельдом. Нормированная напряженность дифрагировавшего на полуплоскости поля за полуплоскостью описывается выражением

$$F(U) = 1 - \sqrt{2} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} \cdot \int_0^U e^{j\frac{\pi}{2}t^2} dt, \quad (5)$$

где

$$U = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{H}{\rho_c}, \quad (6)$$

где H – просвет – расстояние от линии соединяющей приемную и передающую антенна до кромки непрозрачной полуплоскости. Если полуплоскость не пересекает линию $H > 0$, если пересекает $H < 0$;

ρ_c – определяется соотношением (4).

Теоретические значения Функции $F(U)$ приведены в 6 столбце таблицы 3.

2.ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ:

Лабораторная установка предназначена для исследования законов дифракции электромагнитных волн на круглом отверстии и полуплоскости.

Лабораторная установка представляет собой передающую и приемную рупорную антенны с размещенным между ними экраном с набором круглых отверстий или экраном полуплоскостью.

Лабораторная установка представлена на рисунке (1), она включает в себя:

1. Генератор высокочастотный Г4–111а или Г4–111б;
2. Передающая рупорная антенна;
3. Экран с набором круглых отверстий или экран полуплоскость;
4. Приемную рупорную антенну;
5. Измеритель мощности: вольтметр В7–22А или блок ватметра измерительный Я2М–66.

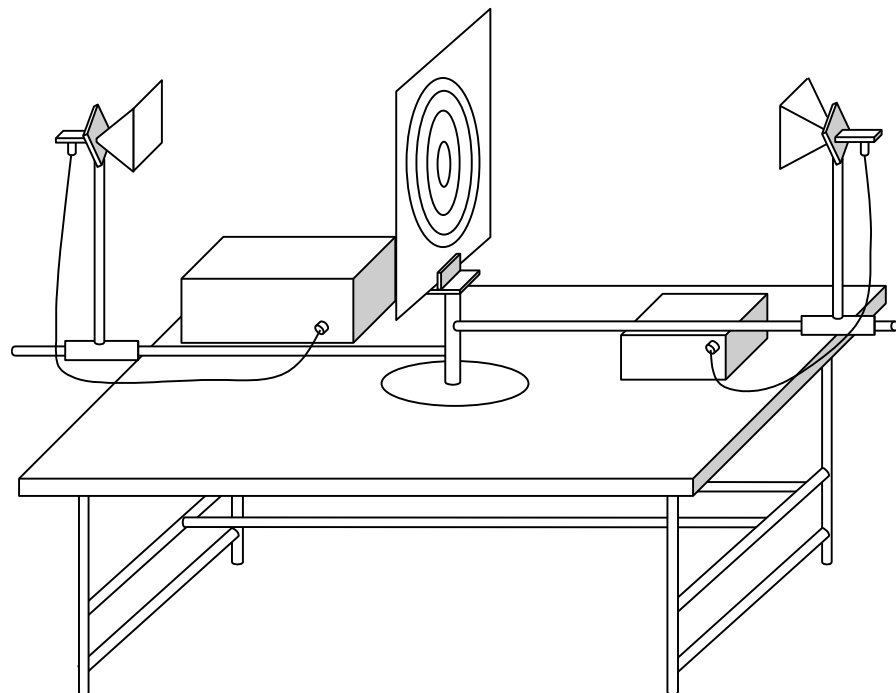


Рис.2. Лабораторная установка к пункту 1 и 2 программы.

Генератор Г4–111 предназначен для формирования высокочастотных колебаний, которые через коаксиальный фидер поступают на передающую рупорную антенну. Передающая антенна формирует электромагнитное поле, которое падает на экран с набором круглых отверстий или экран полуплоскость. Приемная рупорная антенна принимает дифрагировавшую электромагнитную волну и преобразует её в

электромагнитные колебания, которые поступают в волноводную секцию с детектором, а далее на измеритель мощности. Приемная и передающая рупорная антенна установлены на стойки, которые закреплены на направляющих штангах прижимными винтами. Направляющие штанги с помощью муфт установлены на оси–стойке. На торце оси–стойки винтом крепится держатель с фиксирующими винтами, служащий для крепления экрана с набором круглых отверстий или экрана полуплоскости.

3.Инструкция по пользованию контрольно-измерительной аппаратурой:

Установить органы управления КИА в указанное ниже положение

4.Правила и меры безопасности при выполнении работы:

1.Электрический ток, проходящий по организму человека, представляет опасность для его здоровья и даже жизни.

2.При поражении человека электрическим током необходимо освободить пострадавшего от соприкосновения с токоведущими частями аппаратуры. Для чего необходимо снять напряжение питающего источника (отключить автомат защиты, расположенный в левом углу аудитории).

3.Немедленно вызвать врача и оказать первую доврачебную помощь.

4.О чрезмерном нагреве элементов и появлении запаха гари немедленно доложить преподавателю.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

1.Включать лабораторные установки и приборы без разрешения преподавателя.

2.Работать с незаземленной аппаратурой.

3.Вскрывать панели приборов и лабораторных установок.

4.Подавать питающие напряжения без разрешения преподавателя.

5.Изменять порядок выполнения работы, предусмотренной методикой проведения измерений.

6.Покидать рабочее место без разрешения преподавателя.

5.Задание на подготовку к занятию:

1.Изучить учебный материал по теме “Дифракция электромагнитных волн на различного рода препятствиях” и основные теоретические сведения данного руководства.

2.Накануне занятия оформить бланки выполнения лабораторной работы:

- заполнить титульный лист с указанием номера бригады;
- записать цель и программу работы, измерительные приборы;
- начертить принципиальную схему лабораторной установки;
- заполнить раздел “Краткие теоретические сведения”;
- начертить таблицы для результатов измерений.

Ознакомиться с лабораторной установкой.

4.Ознакомиться с правилами пользования КИА.

5.Подготовиться к письменному опросу.

Перечень контрольных вопросов:

- 1.Сформулируйте теорему Гюйгенса.
- 2.Поясните значение дополнения Френеля к теореме Гюйгенса.
- 3.Поясните значение величин входящих в интеграл Кирхгофа.
- 4.Поясните, как разбирается поверхность дифракции на зоны Френеля.
- 5.Каковы фазы полей создаваемых соседними и четными (нечетными) зонами?
- 6.Как распределяется мощность излучения по зонам Френеля и почему?
- 7.Что вы знаете о радиусе области существенной для отражения?
- 8.Поясните зависимость напряженности дифрагировавшего поля от количества открытых зон Френеля.

9.Опишите и поясните график зависимости напряженности дифрагировавшего поля на полуплоскости от величины просвета.

10.Опишите методику определения области существенной для отражения радиоволн.

11.Опишите методику определения области существенной для преломления радиоволн.

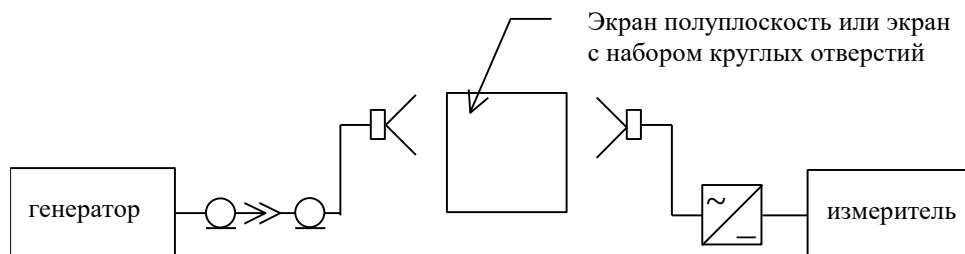


Рис.3. Рабочая схема к пунктам 1 и 2 программы.

Задание на исследование:

- 1.Исследование дифракции радиоволн на круглом отверстии.
- 2.Исследование дифракции радиоволн на полуплоскости.

Методические пояснения и рекомендации:

1.По пункту 1 программы.

1.1.Измерить радиус первой зоны Френеля в лабораторной установке.

1.2.Определить расстояние $r_{10} = r_{20}$ от передающего рупора до экрана и от экрана до приемного рупора, пользуясь соотношением (4) и зная рабочую частоту

$$r_{10} = r_{20} = \frac{6 \cdot \rho_c}{\lambda}.$$

1.3.Установить приемный и передающий рупора на определенных таким образом расстояниях.

1.4.Включить генератор и измеритель мощности. Откалибровать измеритель мощности.

1.5.Провести экспериментальные исследования от номера открытой зоны и от площади отверстия.

1.6.Для измерения зависимости приходящей мощности от положения открытой зоны необходимо измерить мощность проходящего через экран, в котором последовательно открывать только одну зону, начиная с зоны соответствующей области существенной для распространения. Результаты отсчетов мощности занести во второй столбец таблицы 1. в соответствии с номером открытой зоны, который помещен в 1 столбце таблицы.

Таблица 1.

Результаты измерений и расчетов по пункту 1.6.

S	P	$\frac{P}{P_{MAX}}$
$\frac{1}{3} \cdot S_1$		
S_1		
S_2		
S_3		

S_4		
S_5		
S_6		

1.7.Пронормировать по максимальному значению результаты измерений мощности, полученные данные занести в третий столбец таблицы. Построить дискретный график зависимости $\frac{P}{P_{MAX}} = f(S_n)$. Сделать выводы о распределении мощности радиоволн по зонам Френеля.

1.8.Для определения зависимости мощности ЭМВ проходящей через отверстия в экране от площади отверстия произвести измерения проходящей мощности последовательно открывая зоны Френеля в экране начиная с $S = \frac{1}{3}S_1$.

Результаты измерений занести во второй столбец таблицы 2 в соответствии с количеством открытых зон. Пронормировать результаты измерения мощности по мощности полученной для $S = \frac{1}{3}S_1$, нормированные результаты занести в третий столбец таблицы 2. По данным третьего столбца рассчитать нормированные значения напряженности ЭМП в точке приема в зависимости от количества открытых зон Френеля. Данные занести в четвертый столбец таблицы 2. В пятый столбец таблицы 2 занесены теоретические данные соответствующие полученным в четвертом столбце. По данным столбцов 4 и 5 построить теоретические и экспериментальные нормированные графики зависимости напряженности поля в точке приема от количества открытых зон. Сделать выводы о величине ρ_c и фазах ЭМП в соседних зонах Френеля.

Таблица 2.

Результата измерений и расчетов к пункту 1.8.

S	P	$\frac{P}{P_{\frac{1}{3}S_1}}$	$\sqrt{\frac{P}{P_{\frac{1}{3}S_1}}}$	$\frac{E}{E_{св}}$
$\frac{1}{3} \cdot S_1$				
S_1				
S_1, S_2				
$S_1 \div S_3$				
$S_1 \div S_4$				
$S_1 \div S_5$				
$S_1 \div S_6$				

2.По пункту 2.

2.1.Пользуясь соотношением (4) определить радиус области существенной для распространения в лабораторной установке.

2.2.Определить значение просвета соответствующее значениям функции U (6) занесенным в первый столбец таблицы 3 по выражению

$$H = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot U \cdot \rho_c.$$

Занести полученные значения во второй столбец таблицы 3.

Таблица 3.

Результаты измерений и расчетов к пункту 2.2.

U	H[см]	P	$\frac{P}{P_{U0.82}}$	$\sqrt{\frac{P}{P_{U0.82}}}$	$F_{\text{ТЕОР}}(U)$
4					1
3					1.07
2					1
1					1.13
0.82					1
0					0.5
-1					0.2
-2					0.1
-3					0.04
-4					0.02

2.3. Включить генератор и измеритель мощности. Откалибровать измеритель мощности.

2.4. Перемещая экран устанавливать значение просвета H в соответствии со вторым столбцом таблицы 3. Измерять при этих положениях экрана значения мощности ЭМВ дифрагировавших на полуплоскости. Измеренные значения мощности заносить в соответствующие графы третьего столбца таблицы 3. Рассчитать нормированные относительно $P_{U0.82}$ значения проходящей мощности и занести их в четвертый столбец таблицы 3. Рассчитать нормированные значения напряженности дифрагировавшего поля и занести их в пятый столбец таблицы 3. В шестом столбце таблицы 3 помещены соответствующие теоретические значения напряженности дифрагировавшего поля. По данным столбцов 5 и 6 построить графики зависимости напряженности дифрагировавшего поля от f_n и U, сделать вывод о зависимости напряженности поля от величины просвета.

Отчетность за занятие:

1. Заполнить бланк отчета.
2. Оформить отчет.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
4. Результаты расчетов и измерений в виде таблиц.
5. Теоретические и экспериментальные графики зависимости.
6. Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных.
7. В выводах отразить:
 - зависимость распределения мощности радиоволн по зонам Френеля;
 - значение величины ρ_c и фаз ЭМП в соседних зонах Френеля;
 - зависимость напряженности поля от величины просвета.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование электромагнитных волн в прямоугольном волноводе

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

– применять основные законы и математический аппарат электродинамики для компьютерного моделирования и анализа электромагнитных полей и волн в различных средах и направляющих системах.

Владеть:

– навыками определения характеристик электромагнитных полей, необходимых при решении практических задач для расчетов радиопокрытия, радиорелейных и спутниковых трасс.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронных схем «Electronics Workbench» и системой компьютерной математики «Mathcad»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Рассмотрим волну магнитного типа H_{10} , которая в силу ряда обстоятельств получила основное распространение среди других типов волн при использовании прямоугольного волновода в качестве линии передачи. Выясним эти обстоятельства, для чего обратимся сначала к $\lambda_{крmn}$. Как мы выяснили, $\lambda_{крmn}$ как E , так и H – волн вычисляются с помощью одного и того же уравнения (7.12):

$$\lambda_{крmn} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

Условием распространения волн как E , так и H – типа является неравенство $\lambda < \lambda_{крmn}$.

Вычислим $\lambda_{кр}$ некоторых типов магнитных и электрических волн:

- волна $H_{10} \Rightarrow \lambda_{кр} = 2a$;
- волна $H_{01} \Rightarrow \lambda_{кр} = 2b$;
- волна $H_{20} \Rightarrow \lambda_{кр} = a$;
- волна $H_{02} \Rightarrow \lambda_{кр} = b$;

$$\lambda_{кр} = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

- волна $H_{11} = E_{11} \Rightarrow$; и т.д.

Если предположить, что $a > b$ (a – размер широкой стенки, b – узкой стенки волновода), то видно, что:

1. Волна H_{10} обладает наибольшей критической длиной волны;
2. $\lambda_{кр}$ некоторых типов волн совпадают (в частности E_{11} и H_{11}). Такие волны называются *вырожденными*.

Изобразим на рис.7.10 шкалу критических длин волн и критических частот прямоугольного волновода (для определенности зададимся $a = 23 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$):

Заштрихованная область соответствует полной отсечке, по волноводу в этой области частот (или длин волн) не могут распространяться никакие типы волны. В области от $f_{\text{кр}10}$

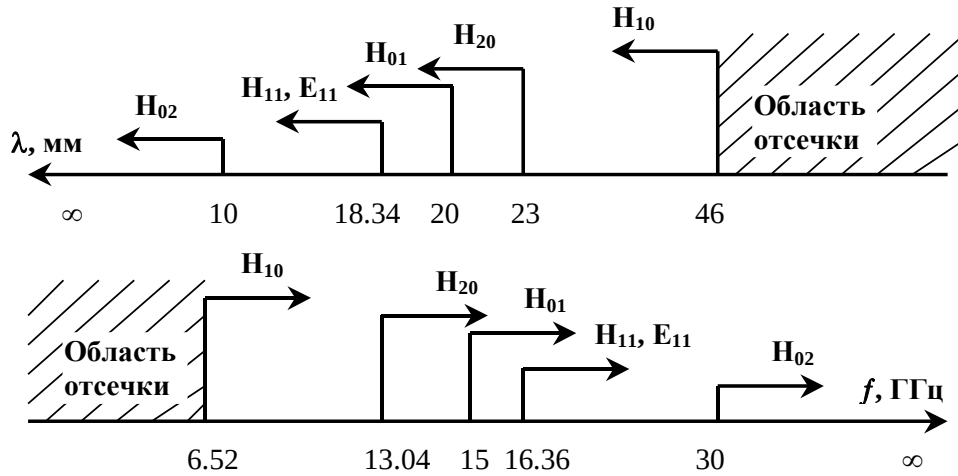


Рисунок 7.10- Шкала $\lambda_{\text{кр}}$ и $f_{\text{кр}}$ прямоугольного волновода $23 \times 10 \text{ мм}$

до $f_{\text{кр}20}$ может распространяться только волна H_{10} . В области от $f_{\text{кр}20}$ до $f_{\text{кр}01}$ — распространяться могут одновременно две волны H_{10} и H_{20} . Таким образом, чем больше f , тем больше волн одновременно могут распространяться в прямоугольном волновод.

В связи с этим различают:

- Одномодовый режим, когда по волноводу может распространяться только один тип волны.
- Многомодовый режим, когда по волноводу могут распространяться несколько типов волн.

Принципиальное отличие этих режимов работы прямоугольного волновода заключается в следующем: при одномодовом режиме вся мощность от генератора в нагрузку переносится по волноводу одним типом волны H_{10} . При многомодовом режиме эта мощность распределена между всеми типами волн, способными распространяться в волновод. Поскольку оконечные устройства, служащие для вывода электромагнитной энергии из волновода, могут быть рассчитаны только на строго определенный тип волны, то часть мощности, переносимая остальными типами волн, будет попросту теряться.

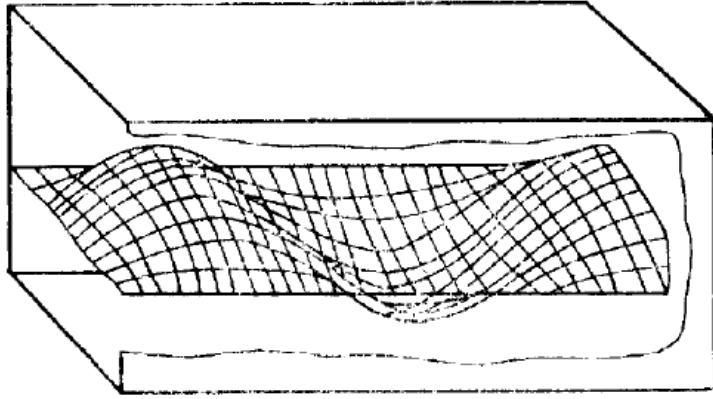
В связи с этим, при практической реализации линии передачи на практике прямоугольные волноводы используются только в одномодовом режиме с волной H_{10} .

Рассмотрим основные характеристики волны H_{10} .

1. Структура поля волны H_{10}

Поскольку индексы $m = 1$ и $n = 0$, то из уравнений (7.21) легко получить выражения для составляющих электромагнитной волны H_{10} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_y = H_o \frac{-j\omega\mu_a\gamma_1}{\gamma^2} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{j(\omega t - \beta z)} = E_{yo} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \dot{H}_x = H_{xo} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \dot{H}_z = H_{zo} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \dot{E}_x = \dot{E}_z = \dot{H}_y = 0 \end{array} \right. \quad (7.22)$$



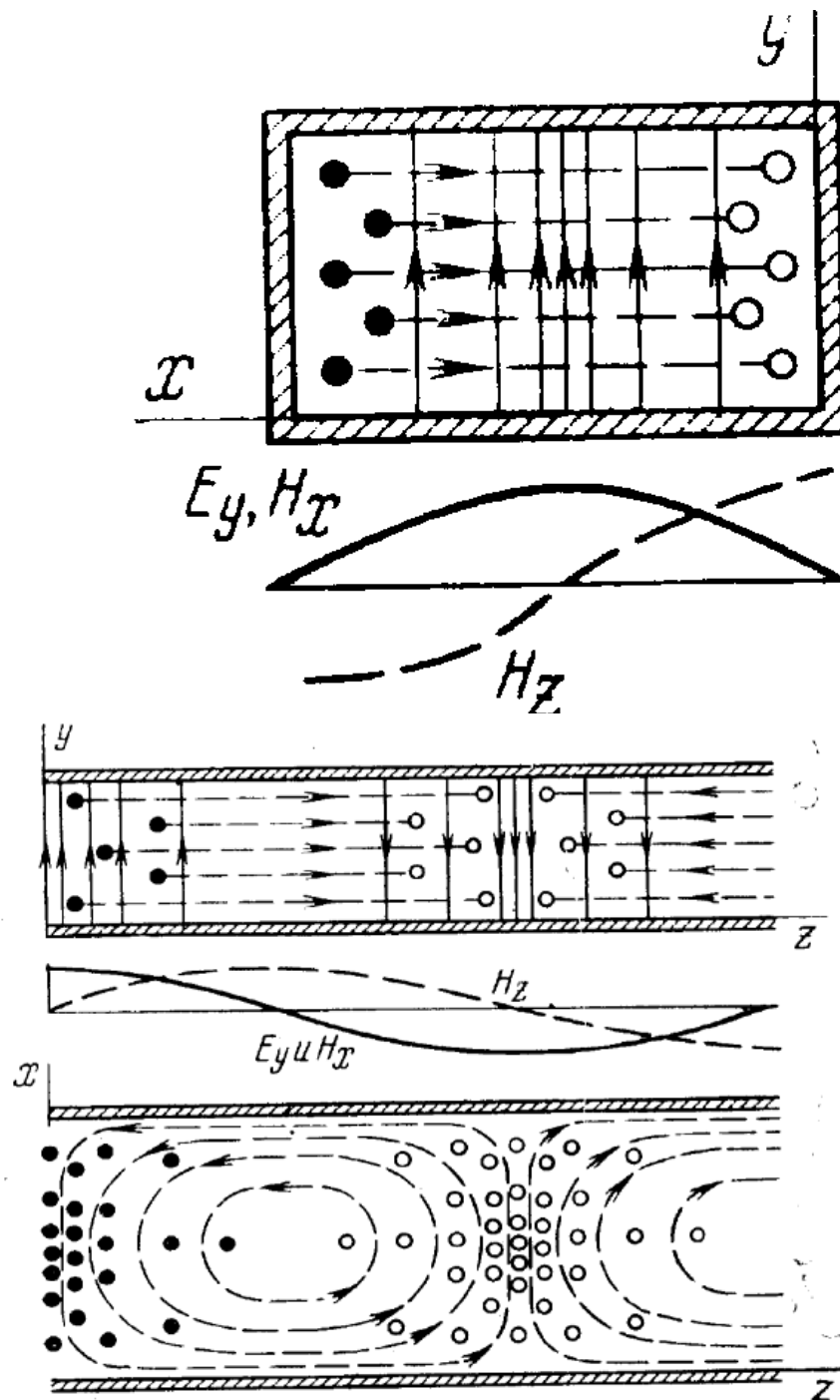


Рисунок 7.11- Структура поля волны H_{10}

Пользуясь этими уравнениями, изобразим структуру волны H_{10} в прямоугольном волноводе в фиксированный момент времени $t = 0$, (см.рис. 7.11). При этом будем иметь ввиду что:

- напряженность электрического поля волны H_{10} :

$$\dot{\vec{E}} = \vec{x}_0 \dot{E}_x + \vec{y}_0 \dot{E}_y + \vec{z}_0 \dot{E}_z = \vec{y}_0 E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) e^{-j\beta z}$$

$$E = \operatorname{Re}[\dot{\vec{E}}] = E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cos(\beta z)$$

мгновенное значение:

- напряженность магнитного поля:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{H}} &= \vec{x}_0 \dot{H}_x + \vec{y}_0 \dot{H}_y + z_0 \dot{H}_z = \vec{x}_0 H_{x0} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-j\beta z} + \vec{z}_0 H_{z0} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-j\beta z} = \\ &= H_m \underbrace{\left(\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) + \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \right)}_{\text{уравнение окружности}} e^{-j\beta z}\end{aligned}$$

$$\text{где: } H_m = \sqrt{H_{x0}^2 + H_{z0}^2},$$

$$H = \text{Re}[\dot{\vec{H}}] = H_m \left(\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) + \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \right) \cos\beta z$$

мгновенное значение:

2. Вектор Пойнтинга и мощность, переносимая по прямоугольному волноводу.

Из системы уравнений (7.22) следует, что вектор Пойнтинга имеет две составляющие Π_x и Π_z :

$$\Pi_x = \frac{1}{2} \left[\dot{E}_y \dot{H}_z^* \right] = \frac{1}{2} E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) H_{z0} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) = \frac{1}{4} E_{y0} H_{z0} \sin\left(2\frac{\pi}{a}x\right)$$

Следовательно, среднее значение вектора Пойнтинга вдоль оси x : $\Pi_x = 0$.

$$\Pi_z = \frac{1}{2} \left[\dot{E}_y \dot{H}_x^* \right] = \frac{1}{2} E_{y0} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) H_{x0} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) = \frac{1}{2} E_{y0} H_{x0} \sin^2\left(\frac{\pi}{a}x\right)$$

Следовательно, среднее значение вектора Пойнтинга вдоль оси z : $\Pi_z \neq 0$, а это, в свою очередь, означает, что мощность переносится по волноводу вдоль оси z . Определим эту мощность. Поскольку Π – плотность потока мощности, переносимой через единичную площадку, то полная мощность:

$$P = \int_S \vec{\Pi}_z d\vec{S} \quad (7.23)$$

где: S – площадь поперечного сечения волновода. Учитывая ортогональность векторов $\vec{\Pi}_z$ и $d\vec{S}$, уравнение (7.23) можно представить как:

$$P = \int_0^a \int_0^b \dot{\Pi}_z dx dy = \frac{1}{2} \int_0^a E_{y0} H_{x0} \sin^2\left(\frac{\pi}{a}x\right) dx \int_0^b dy$$

Чтобы вычислить данный интеграл, определим связь между E_{y0} и H_{x0} . По аналогии со свободным пространством отношение поперечных составляющих E_y и H_x называют *волновым сопротивлением* прямоугольного волновода.

$$\begin{aligned}Z_B = \frac{E_{y0}}{H_{x0}} &= (\text{из ур.7.22}) = \frac{\omega\mu_a}{\beta} = \frac{2\pi f\mu_a}{2\pi/\lambda_B} = \mu_a \frac{f \cdot \lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \\ &= \mu_a \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}\end{aligned} \quad (7.24)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} - \text{скорость света,}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi - \text{характеристическое (волновое) сопротивление вакуума.}$$

$$H_{xo} = \frac{E_{yo}}{Z_B}.$$

Из выражения (7.24) получаем:
Тогда:

$$P = \frac{1}{2} \int_0^a \frac{E_{yo}^2}{Z_B} \sin^2\left(\frac{\pi}{a}x\right) dx \int_0^b dy = \frac{1}{2} \frac{E_{yo}^2}{Z_B} \underbrace{\int_0^a \sin^2\left(\frac{\pi}{a}x\right) dx}_{a/2} \underbrace{\int_0^b dy}_b =$$

$$= \frac{ab}{4} \frac{E_{yo}^2}{Z_B} = E_{yo}^2 \frac{ab}{4Z_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \quad (7.25)$$

Исходя из (7.25), построим график зависимости P от длины волны (см. рис.7.12).

1. Затухание в прямоугольном волноводе. Выбор геометрических размеров волновода для одномодового режима.

Вычисление затухания (потерь) в прямоугольном волноводе достаточно трудоемкая задача, поэтому приведем лишь конечное выражение для волны H_{10} :

$$\alpha = \frac{R_s \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{Z_0 b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}} \right)^2}} \quad [1/м] \quad (7.26)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\sigma}}$$

где:
 σ - удельная проводимость стенок волновода;
 b – размер узкой стенки волновода.

На основании (7.25) построим график зависимости α от длины волны (см. рис. 7.12). Рост α с увеличением частоты (уменьшением λ) связан с двумя обстоятельствами:

- Увеличивается R_s с увеличением частоты;
- Появляется возможность распро-странения высших типов волн.

Зная теперь зависимость $P(\lambda)$ и $\alpha(\lambda)$ несложно определить требова-ния к прямоугольному волноводу для практического использования в ка-честве линий передачи:

- Передача энергии должна осу-ществляться только одним типом волны.
- Возможность передачи по волноводу большой мощности.
- Потери α должны быть минимальны.
- Геометрические размеры и вес волновода должны быть минимальны.

Определим размеры прямоугольного волновода удовлетворяющие этим требованиям:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{раб}} < \lambda_{\text{крH10}} = 2a \\ \lambda_{\text{раб}} > \lambda_{\text{крH20}} = a \\ \lambda_{\text{раб}} > \lambda_{\text{крH01}} = 2b \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{\lambda_{\text{раб}}}{2} < a < \lambda_{\text{раб}} \\ 0 < b < \frac{\lambda_{\text{раб}}}{2} \end{aligned} \right\}$$

Из уравнений (7.24) и (7.25) следует, что чем меньше размер b , тем меньше P и больше α , поэтому размер b выбирают на практике лишь немногим меньше, чем $\lambda_{\text{раб}}/2$, т.е. $b \approx (0,35 \div 0,45)\lambda_{\text{раб}}$. Теперь о размере a . При приближении a к $\lambda_{\text{раб}}/2$ резко увеличивается α и уменьшается P , а при приближении a к $\lambda_{\text{раб}}$ монотонно увеличивается α и имеется возможность возбуждения высших типов волн. Поэтому размер a выбирают в большинстве случаев в пределах $a \approx (0,7 \div 0,8)\lambda_{\text{раб}}$.

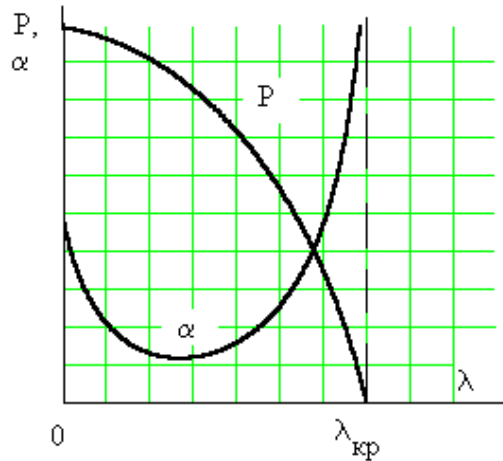


Рисунок 7.12- Зависимость P и α в прямоугольном волноводe от длины волны

1) Определение комплексных амплитуд поперечных составляющих вектора $\vec{H}$, а затем из уравнений Максвелла определим комплексные амплитуды составляющих вектора $\vec{E}$, используя соотношение

$$\vec{H}_{\perp} = \vec{x}_0 \dot{H}_{xm} + \vec{y}_0 \dot{H}_{ym} = -\frac{-j\beta}{\gamma_{\perp}^2} [\text{grad} H^0(x, y)] \exp(-j\beta z) \quad (1)$$

,

Найдем комплексные амплитуды составляющих вектора $\vec{H}$, воспользовавшись вышеприведённым соотношением:

$$\begin{aligned} \text{grad}H^0(x, y) = \vec{x}_0 \frac{\partial H^0}{\partial x} + \vec{y}_0 \frac{\partial H^0}{\partial y} + \vec{z}_0 \frac{\partial H^0}{\partial z} = -\vec{x}_0 \frac{\pi H_0 \sin(\frac{\pi x}{a}) \cos(\frac{\pi y}{b})}{a} - \\ - \vec{y}_0 \frac{\pi H_0 \cos(\frac{\pi x}{a}) \sin(\frac{\pi y}{b})}{b} \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значение из (2) в (1) найдём комплексную форму вектора $\vec{H}$:

$$\dot{\vec{H}}_m = \frac{j\beta}{\gamma_{\perp}^2} \left[\vec{x}_0 \frac{\pi H_0 \sin(\frac{\pi x}{a}) \cos(\frac{\pi y}{b})}{a} + \vec{y}_0 \frac{\pi H_0 \cos(\frac{\pi x}{a}) \sin(\frac{\pi y}{b})}{b} \right] \exp(-j\beta z)$$

Запишем проекции комплексной амплитуды вектора $\vec{H}$ на оси координат:

$$\dot{H}_{mx} = H_0 \frac{\beta\pi}{\gamma_{\perp}^2 a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp\left(j\left(\frac{\pi}{2} - \beta z\right)\right) \quad (3)$$

$$\dot{H}_{my} = H_0 \frac{\beta\pi}{\gamma_{\perp}^2 b} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp\left(j\left(\frac{\pi}{2} - \beta z\right)\right) \quad (4)$$

$$\dot{H}_{zm} = H_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z) \quad (5)$$

Воспользуемся первым уравнением Максвелла в комплексной форме для определения комплексной амплитуды вектора $\vec{E}$:

$$\text{rot}\dot{\vec{H}}_m = j\omega\varepsilon_a \dot{\vec{E}}_m, \text{ где } \varepsilon_a - \text{ абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,}$$

$$\omega = 2\pi f, \quad f - \text{ частота электромагнитных колебаний, тогда отсюда } \dot{\vec{E}}_m = \frac{\text{rot}\dot{\vec{H}}_m}{j\omega\varepsilon_a}$$

$$\dot{E}_{mx} = \frac{(\text{rot}\dot{\vec{H}}_m)_x}{j\omega\varepsilon_a}$$

$$\dot{E}_{my} = \frac{(\text{rot}\dot{\vec{H}}_m)_y}{j\omega\varepsilon_a}$$

$$\dot{E}_{mz} = \frac{(\text{rot}\dot{\vec{H}}_m)_z}{j\omega\varepsilon_a}$$

Найдем $\text{rot}\dot{\vec{H}}_m$:

$$\text{rot}\dot{\vec{H}}_m = \begin{vmatrix} \vec{x}_0 & \vec{y}_0 & \vec{z}_0 \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ \dot{H}_{mx} & \dot{H}_{my} & \dot{H}_{mz} \end{vmatrix} = \vec{x}_0 \left(\frac{\partial \dot{H}_{mz}}{\partial y} - \frac{\partial \dot{H}_{my}}{\partial z} \right) - \vec{y}_0 \left(\frac{\partial \dot{H}_{mz}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_{mx}}{\partial z} \right) + \vec{z}_0 \left(\frac{\partial \dot{H}_{my}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_{mx}}{\partial y} \right)$$

Тогда составляющие комплексной амплитуды вектора $\vec{E}$ равны соответственно:

$$\dot{E}_{mx} = \frac{1}{j\omega\epsilon_a} \left(\frac{\partial \dot{H}_{mz}}{\partial y} - \frac{\partial \dot{H}_{my}}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\dot{E}_{my} = \frac{-1}{j\omega\mu_a} \left(\frac{\partial \dot{H}_{mz}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_{mx}}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$\dot{E}_{mz} = \frac{1}{j\omega\epsilon_a} \left(\frac{\partial \dot{H}_{my}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_{mx}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Найдем выражения для частных производных составляющих комплексной амплитуды вектора $\vec{E}$ по соответствующим координатам:

$$\frac{\partial \dot{H}_{mz}}{\partial y} = -H_0 \frac{\pi}{b} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z)$$

$$\frac{\partial \dot{H}_{mz}}{\partial x} = -H_0 \frac{\pi}{b} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z)$$

$$\frac{\partial \dot{H}_{my}}{\partial z} = -H_0 \frac{\pi\beta^2}{\gamma_{\perp}^2 b} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z + i\frac{\pi}{2}) \exp(j\frac{\pi}{2})$$

$$\frac{\partial \dot{H}_{my}}{\partial x} = -H_0 \frac{\pi^2 \beta}{\gamma_{\perp}^2 ab} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z + j\frac{\pi}{2})$$

$$\frac{\partial \dot{H}_{mx}}{\partial y} = -H_0 \frac{\pi^2 \beta}{\gamma_{\perp}^2 ab} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z + j\frac{\pi}{2})$$

$$\frac{\partial \dot{H}_{mx}}{\partial z} = -H_0 \frac{\pi\beta^2}{\gamma_{\perp}^2 a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j\beta z + j\frac{\pi}{2}) \exp(j\frac{\pi}{2})$$

Подставляя найденные значения частных производных в (7), (8) и (9), получим **итоговые выражения для комплексных амплитуд составляющих вектора $\vec{E}$** :

$$\dot{E}_{mx} = -H_0 \frac{\pi(\gamma_{\perp}^2 + \beta^2)}{\gamma_{\perp}^2 b \omega \varepsilon_a} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp\left(-i\left(\beta z + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (10)$$

$$\dot{E}_{my} = -H_0 \frac{\pi(\gamma_{\perp}^2 + \beta^2)}{\gamma_{\perp}^2 a \omega \varepsilon_a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp\left(-i\left(\beta z + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (11)$$

$$\dot{E}_{mz} = 0 \quad (12)$$

2) Определение диапазона частот, в котором β – действительное число, т.е. рассматриваемое поле – бегущая волна.

По условию задачи $\beta = k\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}$. Значит, β будет действительным в случае, если

$$1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2 \geq 0, \text{ т.е. при } \lambda \leq \lambda_{кр}$$

$$\lambda_{кр} = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} = 0.067 \text{ м} = 6.7 \text{ см}$$

Этому диапазону длин волн соответствует диапазон частот:

$$f \in [f_{кр}, \infty), \text{ где } f_{кр} = \frac{C}{\lambda_{кр}} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}} = 3,005 \text{ ГГц, где } C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}},$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_o \varepsilon_r$$

$$\mu_a = \mu_o \mu_r$$

Таким образом, если частота волны не принадлежит рассчитанному диапазону частот, то β является мнимой величиной. Для этого случая произведем замену: $\beta = -j\alpha$, $\alpha = |\beta|$, при этом $\exp(-j\beta z) = \exp(-\alpha z)$, $\alpha = k\sqrt{(\lambda/\lambda_{кр})^2 - 1}$

3) Определение мгновенных значений всех составляющих векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ для двух случаев:

а) когда f принадлежит найденному в п. 2 диапазону частот

б) когда f не принадлежит этому диапазону.

Для получения выражений для мгновенных значений составляющих векторов поля необходимо домножить их комплексные амплитуды на выражение $\exp(j\omega t)$ и, выделить действительную часть, то есть:

$$E = \text{Re}(\dot{E}_m \cdot e^{j\omega t}); \quad H = \text{Re}(\dot{H}_m \cdot e^{j\omega t})$$

В первом случае выражения для комплексных амплитуд составляющих остаются без изменений. Во втором случае необходимо произвести замену, описанную в п. 2.

При $f > f_{кр}$ выражения для комплексны амплитуд составляющих магнитного и электрического полей имеют вид:

$$H_x = H_0 \frac{\beta\pi}{\gamma_{\perp}^2 a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

$$H_y = H_0 \frac{\beta\pi}{\gamma_{\perp}^2 b} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2}) \quad (14)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos(\omega t - \beta z) \quad (15)$$

$$E_x = -H_0 \frac{\pi(\gamma_{\perp}^2 + \beta^2)}{\gamma_{\perp}^2 b} \frac{1}{\omega \varepsilon_a} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos(\omega t - \beta z - \frac{\pi}{2}) \quad (16)$$

$$E_y = -H_0 \frac{\pi(\gamma_{\perp}^2 + \beta^2)}{\gamma_{\perp}^2 b} \frac{1}{\omega \varepsilon_a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos(\omega t - \beta z - \frac{\pi}{2}) \quad (17)$$

$$E_z = 0 \quad (18)$$

При $f < f_{кр}$ выражения для комплексны амплитуд составляющих магнитного и электрического полей имеют вид:

$$H_x = H_0 \frac{\alpha\pi}{\gamma_{\perp}^2 a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-\alpha z} \cos(\omega t) \quad (19)$$

$$H_y = H_0 \frac{\alpha\pi}{\gamma_{\perp}^2 b} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-\alpha z} \cos(\omega t) \quad (20)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-\alpha z} \cos(\omega t) \quad (21)$$

$$E_x = H_0 \frac{\pi(\alpha^2 - \gamma_{\perp}^2)}{\gamma_{\perp}^2 \cdot b \cdot \omega \cdot \varepsilon_a} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (22)$$

$$E_y = H_0 \frac{\pi(\alpha^2 - \gamma_{\perp}^2)}{\gamma_{\perp}^2 \cdot a \cdot \omega \cdot \varepsilon_a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-\alpha z} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (23)$$

$$E_z = 0 \quad (24)$$

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с установленной системой компьютерной алгебры «Mathcad-14».

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для задания 1

№ варианта	Но, В/м	a, м	b, м	x	y	z
1	3	0.06	0.04	0,4a	0,2b	0,8z0
2	2	0.05	0.03	0,3a	0,9b	0,5z0
3	4	0.055	0.035	0,6a	0,4b	1,3z0
4	2.5	0.045	0.025	0,8a	0,2b	1,2z0
5	5	0.07	0.05	0,5a	0,75b	0,9z0
6	2.2	0.075	0.055	0,3a	0,4b	1,4z0
7	3.1	0.08	0.06	0,2a	0,25b	1,2z0
8	3.3	0.045	0.025	0,9a	0,6b	0,75z0
9	2.8	0.07	0.05	0,4a	0,15b	0,4z0
10	3.15	0.06	0.04	0,2a	0,6b	1,2z0
11	2.6	0.05	0.03	0,75a	0,4b	0,65z0
12	4.2	0.055	0.035	0,4a	0,2b	0,6z0
13	2	0.06	0.04	0,25a	0,65b	0,8z0
14	4	0.05	0.03	0,6a	0,4b	0,5z0
15	2.5	0.055	0.035	0,15a	0,25b	1,3z0

3. Задание для работы

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Моделирование и исследование волны Н10 в прямоугольном волноводе.

1.1. Моделирование волны Н в прямоугольном волноводе в системе «Mathcad».

Моделирование волны Н ведется для частоты больше критической

8) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- диэлектрическая проницаемость среды ε_r согласно варианту;
- магнитная проницаемость среды μ_r согласно варианту;
- электрическая постоянная –

$$\epsilon_0 := \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} = 8.842 \times 10^{-12} ;$$

– магнитная постоянная–

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} ;$$

– абсолютная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_a := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$;

– абсолютная магнитная проницаемость среды $\mu_a := \mu_0 \cdot \mu_r$;

– амплитуда вектора магнитного поля Но согласно варианту;

– скорость света в среде –

$$C := \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \cdot \mu_a}} ;$$

– критическая длина волны–

$$\lambda_{кр} := \frac{2a \cdot b}{\sqrt{a^2 + b^2}} ;$$

– критическая частота–

$$f_{кр} := \frac{C}{\lambda_{кр}} ;$$

– частота –

$$f_1 := f_{кр} + 1 \cdot 10^9 ;$$

– круговая частота–

$$\omega_1 := 2 \cdot \pi \cdot f_1 ;$$

– длина волны в среде–

$$\lambda_1 := \frac{C}{f_1} ;$$

– поперечное волновое число –

$$\gamma_1 := \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} ;$$

– постоянная распространения волны в неограниченном пространстве–

$$k_1 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_1} ;$$

– постоянная распространения волны в направляющей системе–

$$\beta := k_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{кр}} \right)^2} ;$$

$$z_0 := \frac{4 \cdot \pi}{\beta} ;$$

– коэффициенты волны Н $m=1, n=1$;

9) Ввести формулы для комплексных амплитуд составляющих магнитного и

электрического поля:

$$E_{mx}(x, y, z) := -H_0 \cdot \frac{\pi(\gamma I^2 + \beta^2)}{\gamma I^2 \cdot b \cdot \omega_1 \cdot \epsilon a} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot \cos(\beta \cdot z) ;$$

$$E_{my}(x, y, z) := -H_0 \cdot \frac{\pi(\gamma I^2 + \beta^2)}{\gamma I^2 \cdot a \cdot \omega_1 \cdot \epsilon a} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot \cos(\beta \cdot z) ;$$

$$H_{mx}(x, y, z) := H_0 \cdot \frac{\beta \cdot \pi}{\gamma I^2 \cdot a} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot \cos(\beta \cdot z) ;$$

$$H_{my}(x, y, z) := H_0 \cdot \frac{\beta \cdot \pi}{\gamma I^2 \cdot b} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot \cos(\beta \cdot z) ;$$

$$H_{mz}(x, y, z) := H_0 \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot \cos(\beta \cdot z) ;$$

10) Для проверки результатов моделирования построим графики зависимостей амплитуд составляющих поля вдоль осей x и y :

- Построить график H_{my} , H_{mx} вдоль оси x . В качестве координат взять $y=0.3 \cdot b$, $z=z_0$;
- Построить график H_{my} , H_{mx} , H_{mz} вдоль оси y . В качестве координат взять $x=0.1 \cdot a$, $z=z_0$;

Примеры графиков приведены на рисунках 1.1 и 1.2

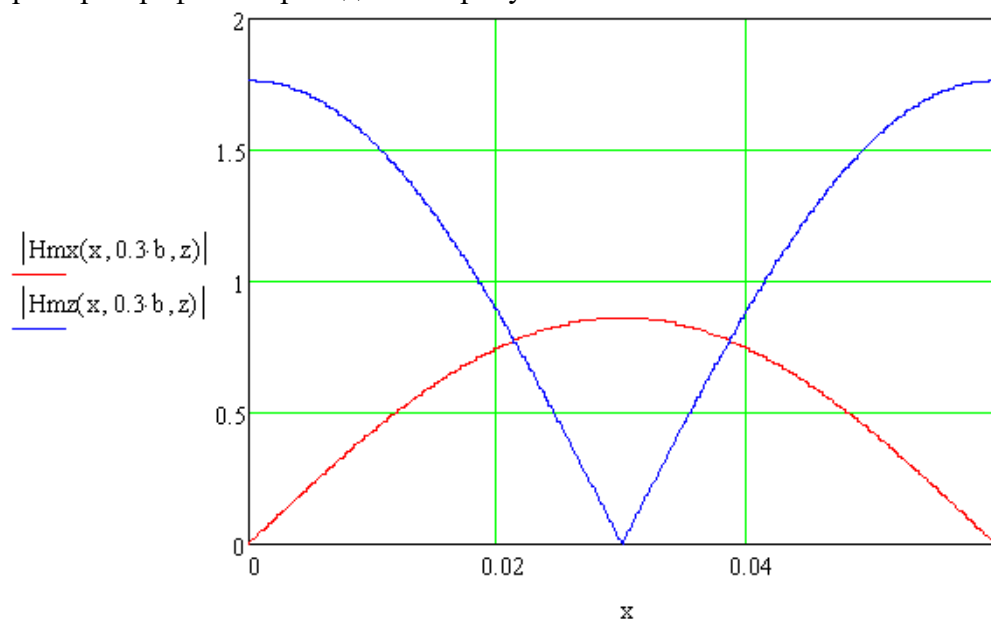


Рис. 1.1 - амплитуды составляющих магнитного поля вдоль оси x

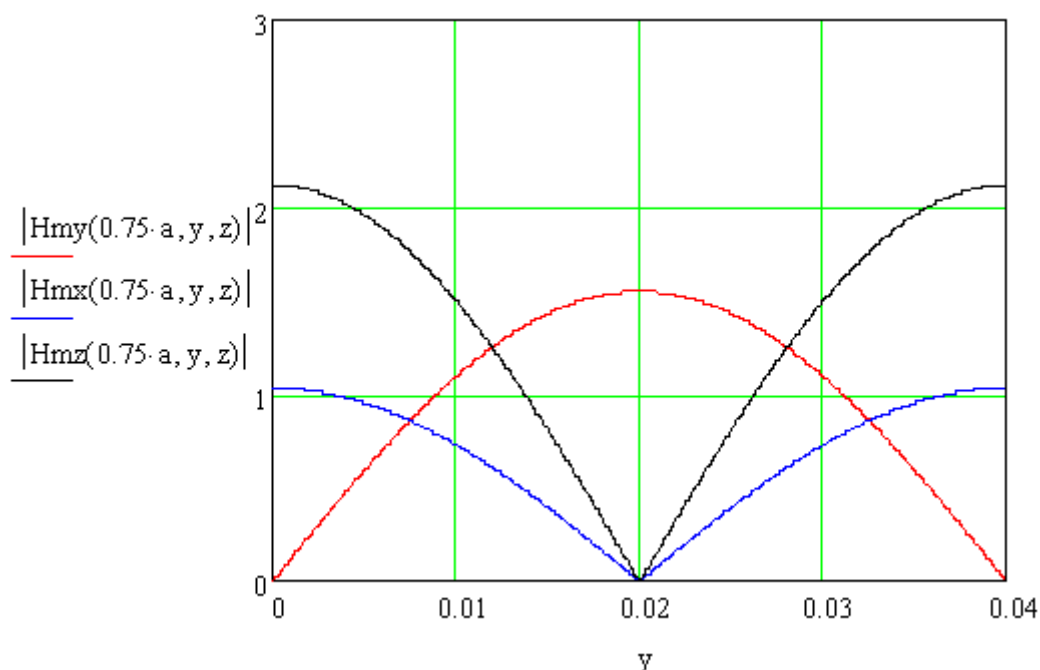


Рис. 1.2 - амплитуды составляющих магнитного поля вдоль оси y

1.2. Отобразить графически результаты моделирования волны H10 в системе «Mathcad».

- 1) Построить графики зависимостей амплитуд составляющих поля на частоте f_1
 - Для моделирования волны H10 установить коэффициенты волны H10 $m=1, n=0$;
 - для построения графиков в плоскостях x и y установить текущую координату z согласно варианту
 - построить график амплитуд составляющих электрического и магнитного поля вдоль оси x . Значение координаты y установить согласно варианту. Примеры графиков приведены на рисунках 1.3, 1.4

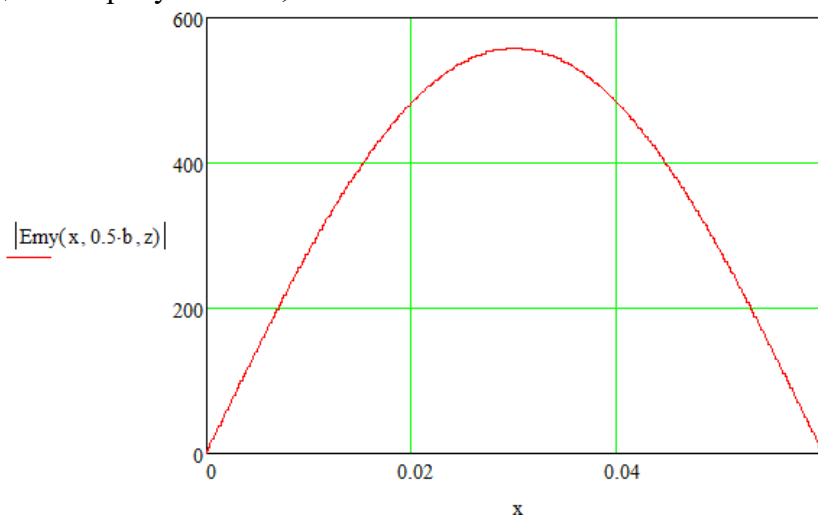


Рис. 1.3 - амплитуда поперечной составляющей электрического поля вдоль оси x

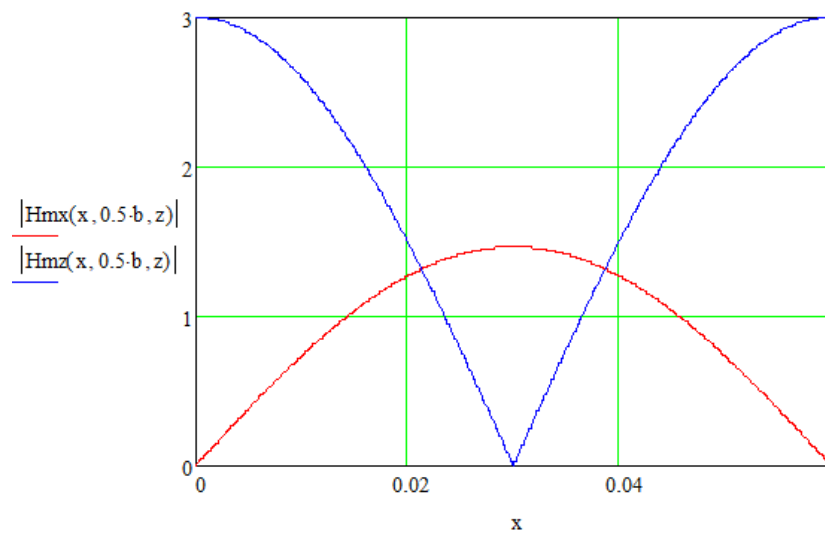


Рис. 1.4 - амплитуды продольной и поперечной составляющих магнитного поля вдоль оси x

- построить график амплитуд составляющих электрического и магнитного поля вдоль оси y . Значение координаты x установить согласно варианту. Примеры графиков приведены на рисунках 1.5, 1.6

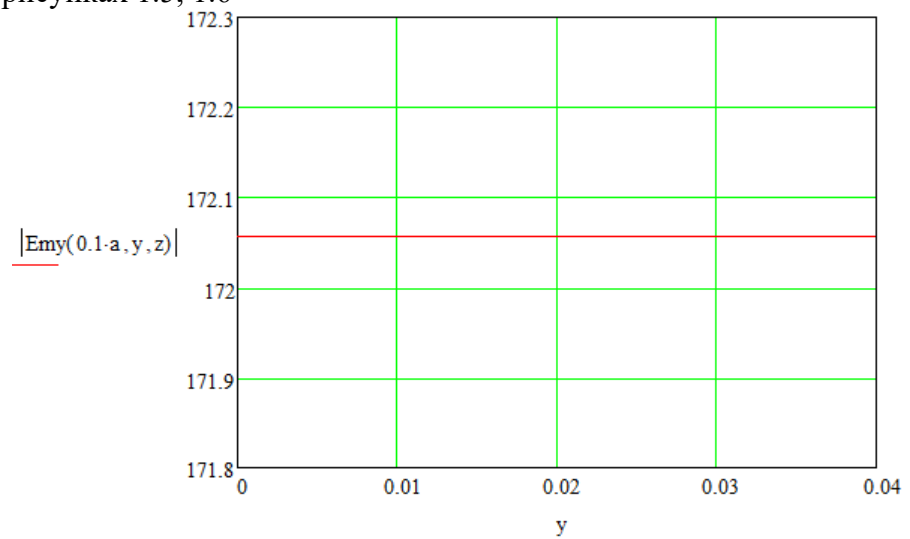


Рис. 1.5 - амплитуда поперечной составляющей электрического поля вдоль оси y

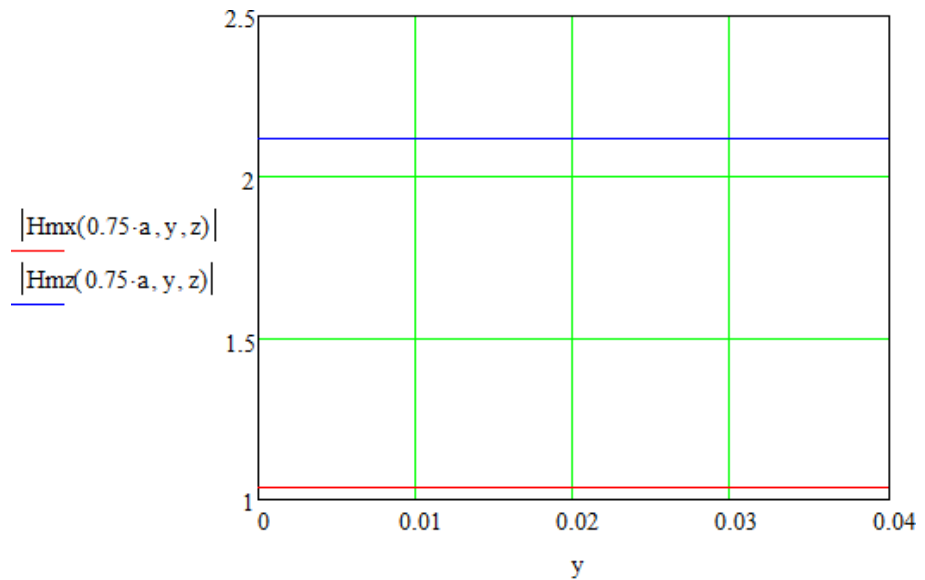


Рис. 1.6 - амплитуды продольной и поперечной составляющих магнитного поля вдоль оси у

2) Построить векторные диаграммы составляющих амплитуд электрического и магнитного поля в плоскости х у на частоте f_1 . Для этого ввести формулы:

– Подготовительные циклы для задания координат х и у $i := 0..10 \quad j := 0..10$;

– шаг приращения координат $dx := \frac{a}{10} \quad dy := \frac{b}{10}$;

– циклы текущих координат $xx_i := i \cdot dx \quad yy_j := j \cdot dy$

– векторное представление амплитуды H_x –

$$H_{hx_{i,j}} := H_0 \cdot \frac{\beta \cdot \pi}{\gamma I^2 \cdot a} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot xx_i}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot yy_j}{b}\right) ;$$

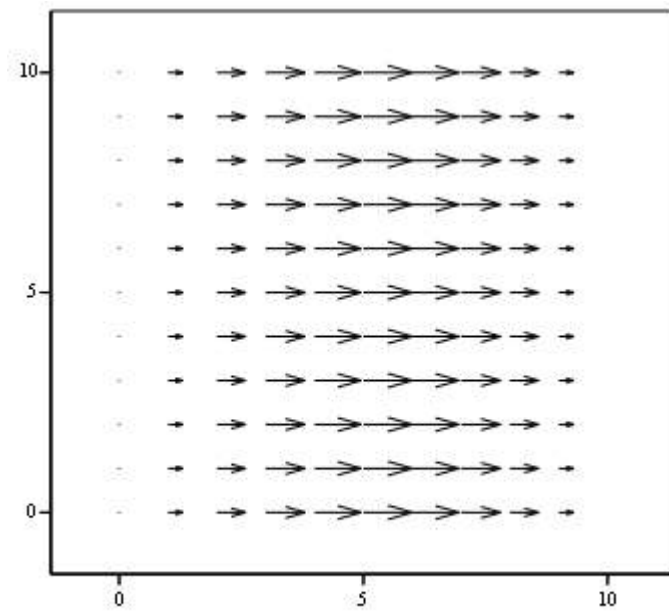
– векторное представление амплитуды H_z –

$$H_{hz_{i,j}} := H_0 \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot xx_i}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot yy_j}{b}\right) ;$$

– векторное представление амплитуды E_y –

$$E_{ey_{i,j}} := \left| -H_0 \cdot \frac{\pi (\gamma I^2 + \beta^2)}{\gamma I^2 \cdot a \cdot \omega 1 \cdot \epsilon a} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot xx_i}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot yy_j}{b}\right) \right| ;$$

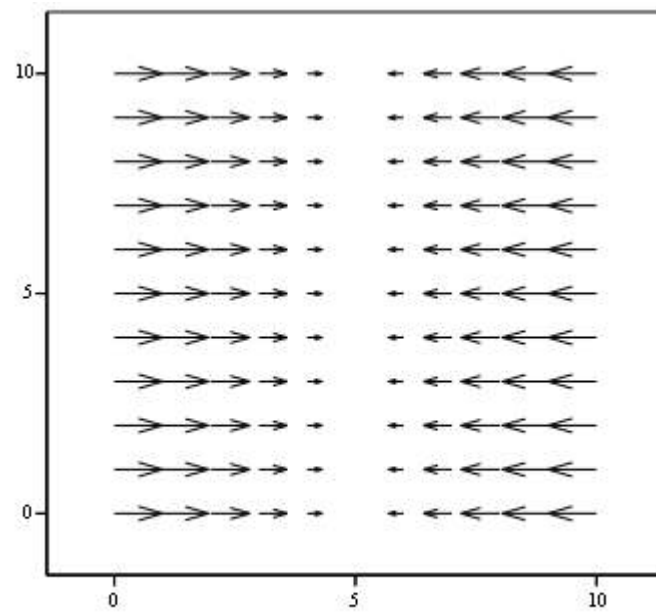
– векторная диаграмма H_x в плоскости х у. Для ее построения необходимо выбрать вставка > график > векторное поле. В поле ввода функции ввести H_{hx}



H_x

Рис. 1.7 - векторная диаграмма H_x в плоскости $x-y$

— векторная диаграмма H_z в плоскости $x-y$.



H_z

Рис. 1.8 - векторная диаграмма H_z в плоскости $x-y$

— векторная диаграмма E_y в плоскости $x-y$.

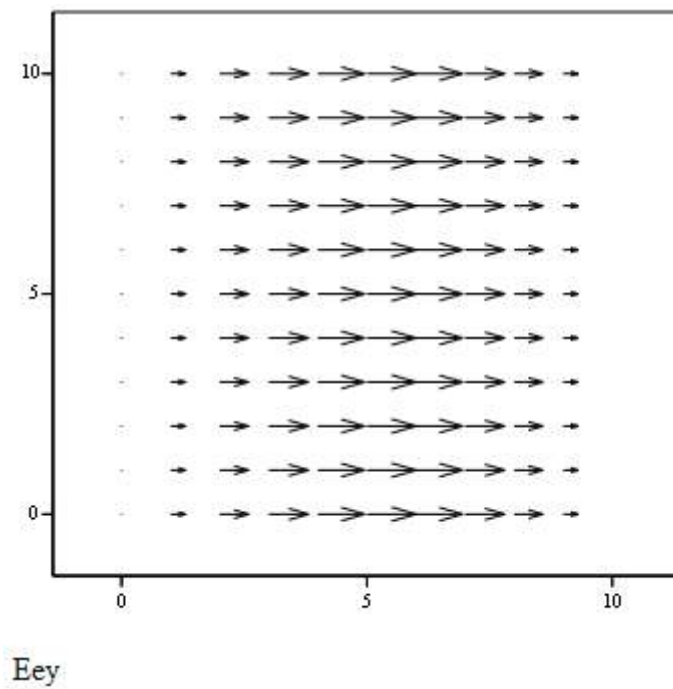


Рис. 1.9 - векторная диаграмма E_y в плоскости x, y

- 3) Сравнить векторные диаграммы в плоскости x, y с графиками составляющих комплексных амплитуд и сделать выводы по результатам сравнения
- 4) Построить график распространения бегущей волны. Для построения графиков вдоль оси z задать $z := 0,0001 \dots 2 \cdot z_0$, координаты x и y согласно варианту. Примеры графиков приведены на рисунках

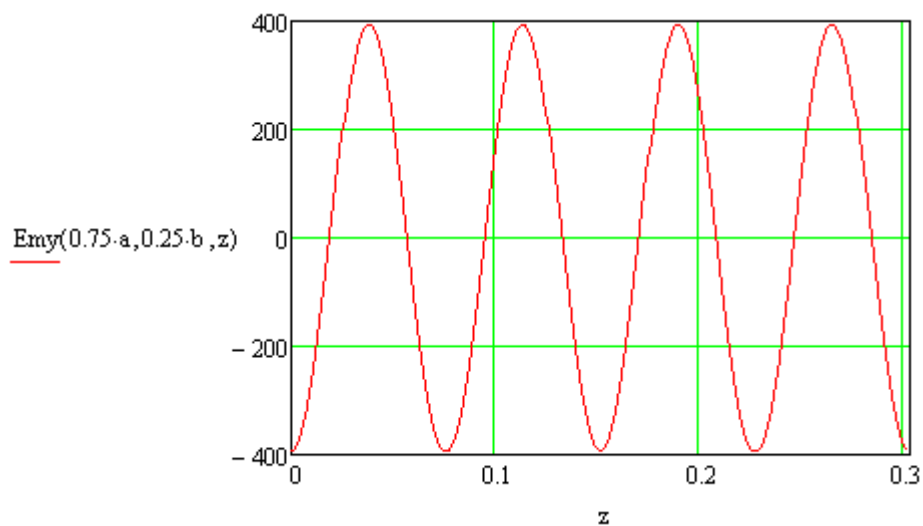


Рис. 1.10 - амплитуда поперечной составляющей электрического поля вдоль оси z

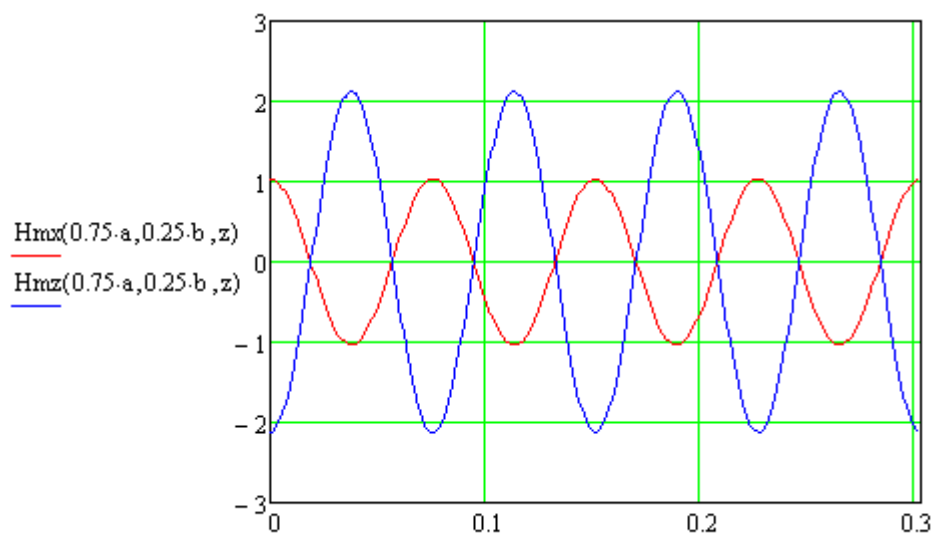


Рис. 1.11 - амплитуды продольной и поперечной составляющих магнитного поля вдоль оси z

- 5) Построить график зависимости среднего значения вектора Умова-Пойтинга от координаты z . Для построения графика ввести формулу продольной составляющей вектора Умова-Пойтинга, задать координаты x и y согласно варианту

$$P_{cp}(x, y, z) := \frac{\pi^2 \cdot H_0^2 \cdot \beta \cdot (\beta^2 + \gamma I^2)}{2 \cdot \gamma I^4 \cdot \omega \cdot \epsilon a} \cdot \left(\frac{1}{b^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{b}\right)^2 + \frac{1}{a^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right)^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot y}{b}\right)^2 \right)^2 ;$$

Пример графика приведен на рисунке 1.12

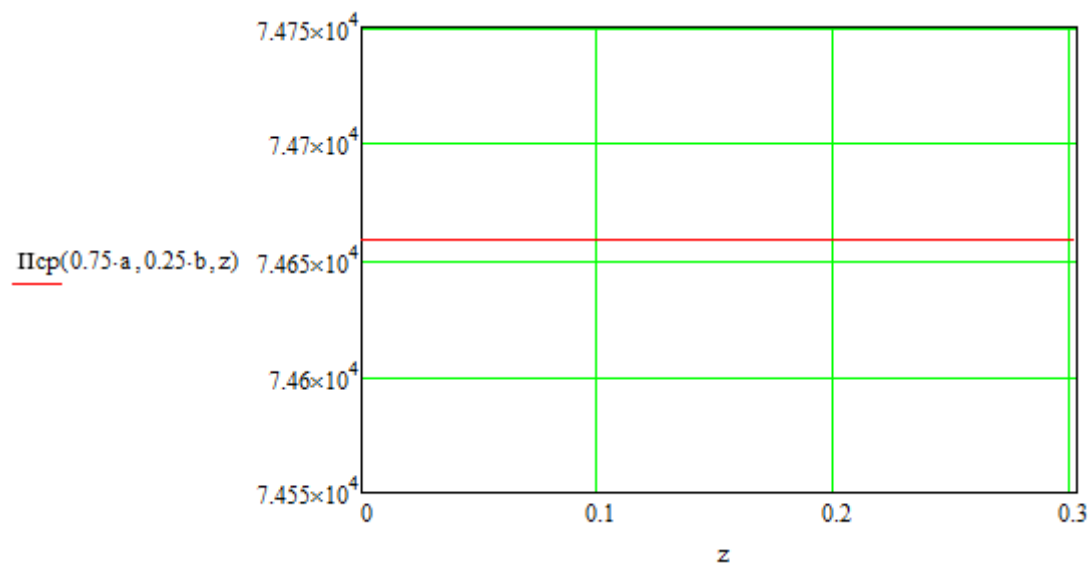


Рис. 1.12 - график зависимости среднего значения вектора Умова-Пойтинга от координаты z

1.3 Моделирование волны H10 в прямоугольном волноводе при частоте меньше критической в системе «Mathcad».

- 1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

— частота f_2 —

$$f2 := f_{кр} - 1 \cdot 10^9;$$

– круговая частота –

$$\omega2 := 2 \cdot \pi \cdot f2;$$

– длина волны в среде –

$$\lambda2 := \frac{C}{f2};$$

– постоянная распространения волны в неограниченном пространстве –

$$k2 := \omega2 \cdot \sqrt{\epsilon a \cdot \mu a} = 62.832;$$

– постоянная распространения волны в направляющей системе –

$$\alpha := k2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\lambda2}{\lambda_{кр}}\right)^2 - 1};$$

$$z01 := \frac{4 \cdot \pi}{\alpha} = 0.178$$

– ;

2) Ввести формулы для комплексных амплитуд составляющих магнитного и электрического полей для Случая 2, f меньше $f_{кр}$:

$$E_{mx}(x, y, z) := H_0 \cdot \frac{\pi(\alpha^2 - \gamma I^2)}{\gamma I^2 \cdot b \cdot \omega2 \cdot \epsilon a} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot e^{-\alpha \cdot z};$$

$$E_{my}(x, y, z) := H_0 \cdot \frac{\pi(\alpha^2 - \gamma I^2)}{\gamma I^2 \cdot a \cdot \omega2 \cdot \epsilon a} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot e^{-\alpha \cdot z};$$

$$H_{mx}(x, y, z) := H_0 \cdot \frac{\alpha \cdot \pi}{\gamma I^2 \cdot a} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot e^{-\alpha \cdot z};$$

$$H_{my}(x, y, z) := H_0 \cdot \frac{\alpha \cdot \pi}{\gamma I^2 \cdot b} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot e^{-\alpha \cdot z};$$

$$H_{mz}(x, y, z) := H_0 \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi y}{b}\right) \cdot e^{-\alpha \cdot z};$$

3) Повторить пункты 1,4 задания 1.2. Вместо $z0$ использовать $z01$. Для построения графиков бегущей продольной волны (пункт 4 задания 1.2), в окне ввода функции

$$|H_{my}(0.75 \cdot a, 0.25 \cdot b, z)|$$

$$|H_{mx}(0.75 \cdot a, 0.25 \cdot b, z)|$$

необходимо взять функцию по модулю

4) Сравнить полученные графики с графиками из задания 1.2. Сделать выводы о их схожести или различии.

Задание 2. Моделирование и исследование параметров прямоугольного волновода при распространении волны H10

1) Отобразить графически зависимости фазовой скорости и скорости распространения от частоты. Для этого ввести следующие формулы:

– фазовая скорость на частоте f_1 –

$$V_{\phi} := \frac{\omega_1}{\beta};$$

– скорость распространения на частоте f_1 –

$$V_{\varepsilon} := \frac{C^2}{V_{\phi}};$$

– функция зависимости фазовой скорости от частоты –

$$V_{1\phi}(f) := \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}};$$

– функция зависимости скорости распространения от частоты –

$$V_{1\varepsilon}(f) := \frac{C^2}{V_{1\phi}(f)};$$

– построить график зависимости фазовой скорости и скорости распространения от частоты. На графике метками обозначить критическую частоту и скорость света

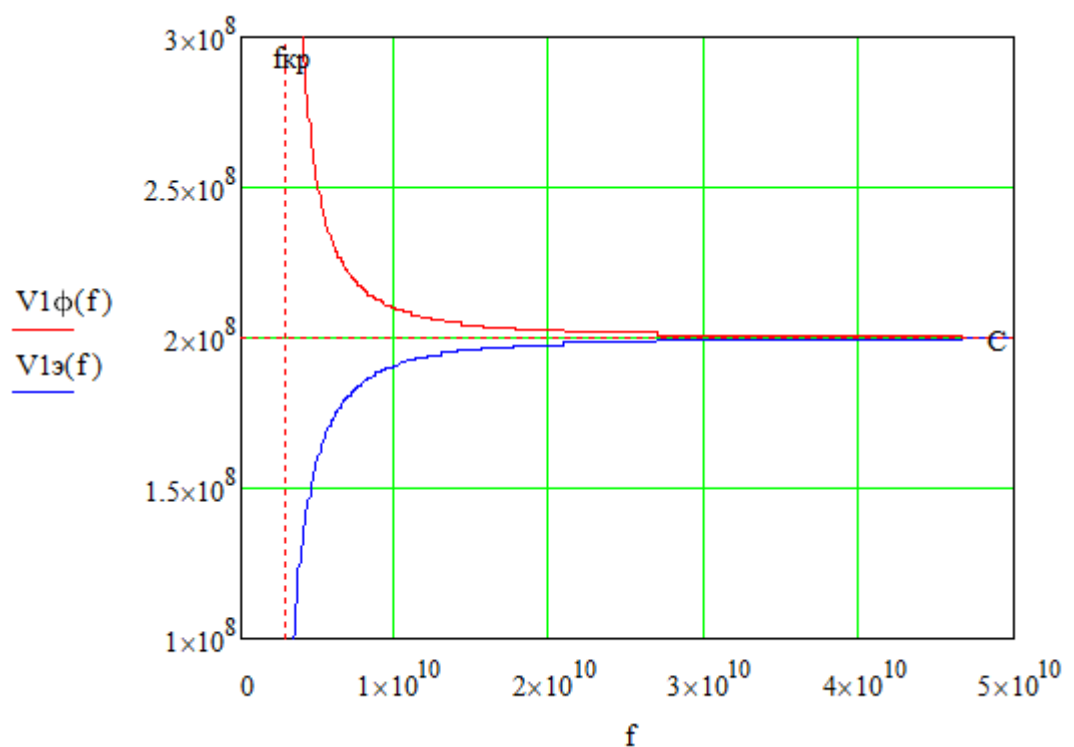


Рис. 2.1 - график зависимости фазовой скорости и скорости распространения от частоты

2) Отобразить графически зависимости средней мощности и коэффициента затухания от частоты. Для этого ввести следующие формулы:

- проводимость волновода(Сим/м)– $\sigma := 3.7 \cdot 10^7$;
- функция зависимости активной части поверхностного сопротивления волновода от частоты –

$$R_s(f) := \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu a}{\sigma}} ;$$

- функция зависимости постоянной распространения от частоты –

$$\beta(f) := \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2} ;$$

- функция зависимости коэффициента затухания от частоты –

$$am(f) := \frac{1}{2} \cdot R_s(f) \cdot \frac{\frac{32 \cdot \pi^4}{\lambda_{кр}^4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon a \cdot (a + b) \cdot \left[1 + \frac{\lambda_{кр}^4 \cdot (\beta(f))^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot b}\right]}{\pi^2 \cdot \left(1 - \frac{f_{кр}}{f}\right) \cdot \left[(\beta(f))^2 + \frac{4 \cdot \pi^2}{\lambda_{кр}^2}\right] \cdot \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)} ;$$

- функция зависимости средней мощности от частоты –

$$P_{cp}(f) := \frac{\beta(f) \pi^2 \cdot H_0^2 \cdot \left[\beta(f)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2\right]}{8 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon a} \cdot \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) ;$$

- построить график зависимости коэффициента затухания и средней мощности от частоты. На графике меткой обозначить критическую частоту.

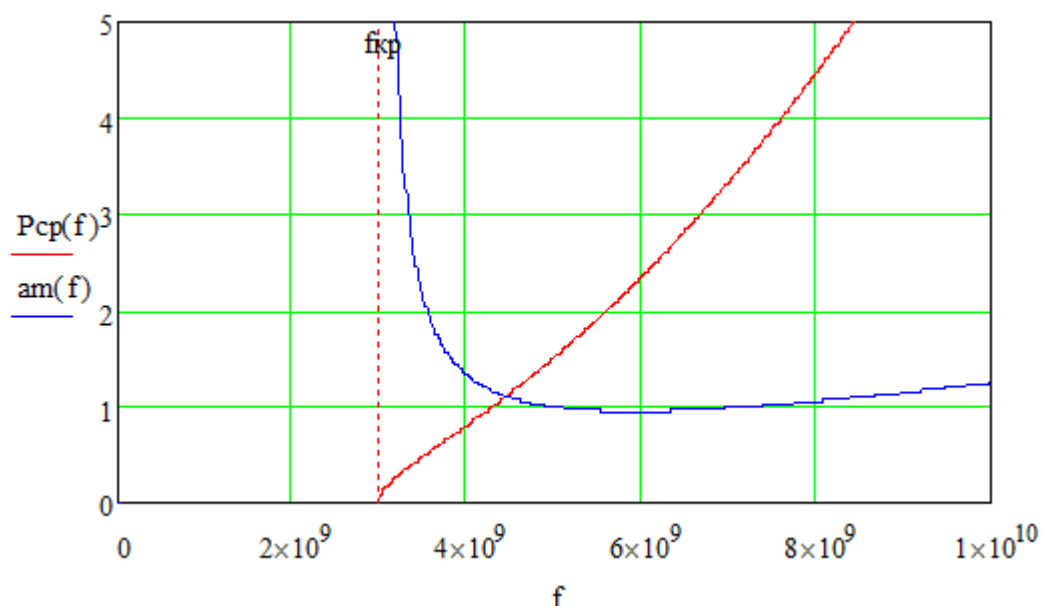


Рис. 2.2 - график зависимости коэффициента затухания и средней мощности от частоты

3) Сделать выводы по результатам проведенных исследований

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. По указанию преподавателя практически выполнить по одному из заданий каждого учебного вопроса, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в разработанной модели.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Направляемые электромагнитные волны в круглом и коаксиальном волноводах

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

– применять основные законы и математический аппарат электродинамики для компьютерного моделирования и анализа электромагнитных полей и волн в различных средах и направляющих системах.

Владеть:

– навыками определения характеристик электромагнитных полей, необходимых при решении практических задач для расчетов радиопокрытия, радиорелейных и спутниковых трасс.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронных схем «Electronics Workbench» и системой компьютерной математики «Mathcad»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Полая металлическая труба круглого поперечного сечения называется круглым волноводом.

Обозначим радиус круглого волновода через R . Будем полагать, что волновод заполнен одно-родной изотропной средой без потерь ($\sigma \approx 0$). Сторонние токи отсутствуют. В этом случае 1-ое и 2-ое уравнения Максвелла примут вид:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \varepsilon_a \frac{d\vec{E}}{dt} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} = -\mu_a \frac{d\vec{H}}{dt} \end{cases}$$

Для круглого волновода удобнее ввести цилиндрическую систему координат (r, φ, z) и искать решение данных уравнений в этой системе координат. Порядок же их решения аналогичен тому, как мы это делали в случае прямоугольного волновода:

1. Раскрывается операция rot в цилиндрической системе координат.
2. Все поперечные составляющие поля (т.е. $E_r, E_\varphi, H_r, H_\varphi$) выражаются через продольные E_z и H_z .
3. Составляется дифференциальное уравнение для продольных составляющих и находится его решение.

Как и в прямоугольном волноводе, в круглом волноводе могут существовать как E , так и H – волны. Рассмотрим сначала E – волны. По определению, для таких волн: $H_z = 0$, все остальные составляющие не равны 0.

Составим дифференциальное уравнение для амплитудного значения продольной составляющей E_{zm} :

$$\nabla^2 E_{zm} + \gamma^2 E_{zm} = 0,$$

где: $\gamma^2 = k^2 - \beta^2$ – поперечное волновое число;
 k – постоянная распространения волны в неограниченном (свободном) пространстве;

β – постоянная распространения волны в круглом волноводе;

∇^2 – поперечный оператор Лапласа.

Раскрывая ∇^2 в цилиндрической системе координат, получим:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_{zm}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_{zm}}{\partial \varphi^2} + \gamma^2 E_{zm} = 0$$

Решая это дифференциальное уравнение методом разделения переменных, получим:

$$E_{zm} = E_0 J_n(\gamma r) \cos(n\varphi),$$

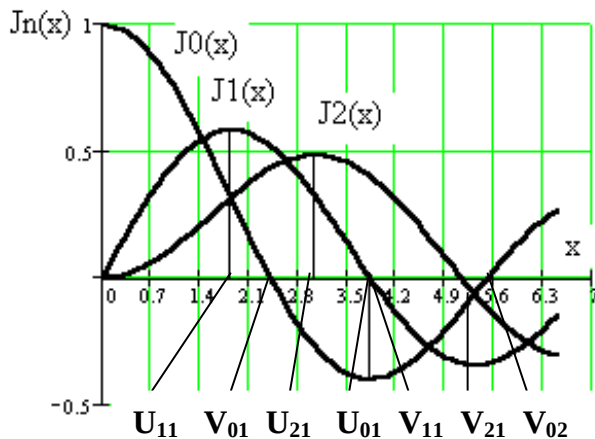
где: E_0 – некоторая постоянная;

J_n – функция Бесселя n – го порядка, $n = 0, 1, 2, \dots$

Теперь накладываем граничные условия: касательная составляющая электрического поля должна быть равна 0 на стенках волновода, т.е. $E_\varphi = 0$ при $r = R$. Это означает, что и E_{zm} должна быть равна нулю при $r = R$, т.е:

$$E_0 J_n(\gamma R) \cos(n\varphi) = 0$$

Чтобы данное требование выполнялось при любом угле φ , необходимо, чтобы выполнялось условие:



$$J_n(\gamma R) = 0. \quad (a)$$

Функцию Бесселя различного порядка изображена на графике рис. 1. Из графиков видно, что для выполнения условия (а) необходимо, чтобы:

$$\gamma R = V_{nm}, \quad (1 б)$$

где: V_{nm} – m – ый корень функции Бесселя n – го порядка.

Из (1 б) получаем, что поперечное волновое число:

$$\gamma = \frac{V_{nm}}{R}$$

Рисунок 1.- Функции Бесселя

Следовательно, амплитудное значение продольной составляющей:

$$E_{zm} = E_0 J_n \left(\frac{V_{nm}}{R} r \right) \cos(n\varphi),$$

а мгновенное значение:

$$\dot{E}_z = E_{zm} e^{j(\omega t - \beta z)} = E_0 J_n \left(\frac{V_{nm}}{R} r \right) \cos(n\varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2)$$

При известной E_z , далее определяются все остальные составляющие поля E – волны: E_z , E_φ , H_r , H_φ .

Проведем анализ полученного уравнения 2.

1. Направляемая волна E – типа распространяется по круглому волноводу вдоль оси z с постоянной распространения β . Каждой паре чисел m и n соответствует своя структура электромагнитного поля, которая обозначается как E_{nm} . Из графиков на рис.1 видно, что наименьшим корнем функции Бесселя является корень V_{01} , следовательно простейшей волной E – типа является волна E_{01} .

2. Определим постоянную распространения β для E_{nm} волн.
Поскольку:

$$\gamma^2 = k^2 - \beta^2 = \frac{V_{nm}^2}{R^2},$$

то отсюда:

$$\beta = \sqrt{k^2 - \gamma^2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{V_{nm}}{R}\right)^2}.$$

Аналогично, как и для прямоугольного волновода получаем:

- если $k^2 > \gamma^2$, то β – вещественная величина и, следовательно, электромагнитная волна E_{nm} будет распространяться в круглом волноводе;
- если $k^2 < \gamma^2$, то β – мнимая величина, поэтому электромагнитный процесс будет экспоненциально затухать вдоль круглого волновода;
- граничный случай возникает когда:

$$k^2 = \gamma^2 \quad \text{или} \quad \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{V_{nm}}{R} = \gamma.$$

Длина волны, отвечающая этому условию, называется критической длиной волны в круглом волноводе:

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi R}{V_{nm}}.$$

Определим длину волны в круглом волноводе. Поскольку $\beta = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$, или:

$$\frac{2\pi}{\lambda_{в}} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{крnm}}\right)^2},$$

то:

$$\lambda_{в} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{крnm}}\right)^2}} \quad (3)$$

Заметим, что (3) имеет тот же вид, что и для прямоугольного волновода.

Определим фазовую V_{ϕ} и групповую $V_{гр}$ скорости E – волны в круглом волноводе:

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda_{в}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}.$$

$$V_{гр} = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}.$$

Так как $V_{\phi} \cdot V_{гр} = c^2$, то:

Рассмотрим теперь Н – волны в круглом волноводе. Для этих волн по определению составляющая $E_z=0$, все остальные составляющие не равны нулю. Составим дифференциальное уравнение для амплитудного значения продольной составляющей H_{zm} :

$$\nabla^2 H_{zm} + \gamma^2 H_{zm} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$H_{zm} = H_0 J_n(\gamma r) \cos(n\varphi).$$

Накладываем граничные условия: $E_\varphi = 0$ при $r = R$. Это означает, что производная составляющей H_{zm} при $r = R$ должна быть равна нулю, т.е:

$$\frac{dH_{zm}}{dr} = H_0 J'_n(\gamma R) \cos(n\varphi) = 0.$$

Чтобы данное условие выполнялось при любом φ , необходимо чтобы:

$$J'_n(\gamma R) = 0. \quad (4)$$

Первая производная любой функции – это есть точки максимума или минимума этой функции. Поэтому (см.рис.1), чтобы выполнялось условие (4), необходимо потребовать:

$$\gamma R = U_{nm}, \quad (5)$$

где: U_{nm} – m-ый корень производной функции Бесселя n-го порядка.

Следовательно, из (5) волновое число γ для Н – волн в круглом волноводе:

$$\gamma = \frac{U_{nm}}{R}.$$

Тогда мгновенное значение продольной составляющей H_z равно:

$$H_z = H_{zm} e^{j(\omega t - \beta z)} = H_0 J_n\left(\frac{U_{nm}}{R} r\right) \cos(n\varphi) e^{j(\omega t - \beta z)}.$$

Анализ полученного уравнения показывает, что каждой паре чисел m и n соответствует своя структура поля Н – волны в круглом волноводе, которая обозначается как H_{mn} . Из графиков на рис.1 видно, что первым корнем является корень U_{11} , Поэтому простейшей волной Н – типа будет волна H_{11} .

Критическая длина волны Н – типа определяется из условия: $k^2 = \gamma^2$.

Или $\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} = \frac{U_{nm}}{R}$, откуда: $\lambda_{кр} = \frac{2\pi R}{U_{nm}}$. Поскольку корень U_{11} является наименьшим из всех возможных корней функции Бесселя, то $\lambda_{кр}$ волны H_{11} будет наибольшей из всех H_{nm} и E_{nm} типов волн. Это означает, что одномодовый режим работы круглого волновода возможен только на волне H_{11} . Вывод формул для λ_v , V_ϕ , и $V_{гр}$ аналогичен тому, как это проводилось для Е – волн и не представляется сложным при самостоятельном изучении.

В круглом волноводе, в отличие от прямоугольного волновода, в качестве основного типа колебания, используется один из трех типов волн: H_{11} , E_{01} или H_{01} . Рассмотрим особенности этих волн, обуславливающих их применение на практике.

а) Обратимся к структуре электромагнитных волн этих волн, изображенных на рис. 2, и распределению линий поверхностного тока, показанных на рис. 3. Отметим, что у

волны H_{01} в отличие от волн H_{11} и E_{01} отсутствует продольная составляющая тока проводимости (существуют только поперечные, кольцевые токи).

б) Критическая длина волны для колебаний Е– и Н–типа в круглом волноводе определяется выражениями:

$$\lambda_{кр}^E = \frac{2\pi R}{V_{mn}}, \quad \lambda_{кр}^H = \frac{2\pi R}{U_{mn}}$$

где: R – радиус круглого волновода;

V_{mn} – m -ый корень функции Бесселя n -го рода;

U_{mn} – m -ый корень производной функции Бесселя n -го рода.

В табл.7.1 приведены значения $\lambda_{кр}$ первых шести типов колебаний в круглом волноводе.

Таблица 1

Тип волны	11	01	21	11	11	31
$\lambda_{кр}/R$	,42	,61	,06	,64	,64	,46

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента затухания α в круглом волноводе от частоты и допустимой мощности P от частоты для рассматриваемых трех типов волн. На основании рис.2, 3, 4 и табл.1 несложно сформулировать следующие особенности волн H_{11} , E_{01} и H_{01} :

Волна H_{11}

1. Данный тип колебаний обладает наибольшей $\lambda_{кр}$. Следовательно, только на волне H_{11} возможен одномодовый режим работы круглого волновода без применения каких-либо дополнительных мер;

2. Структура электромагнитного поля данной волны является несимметричной относительно произвольной поперечной оси (см.рис.2). В следствии этого, при движении волны вдоль круглого волновода происходит изменение поляризации волны, как показано на рис.5.

3. Чтобы зафиксировать плоскость поляризации, на практике прибегают к изменению поперечного сечения круглого волновода, используя эллипс, и переходя таким образом к эллиптическим волноводам (см.рис.6);

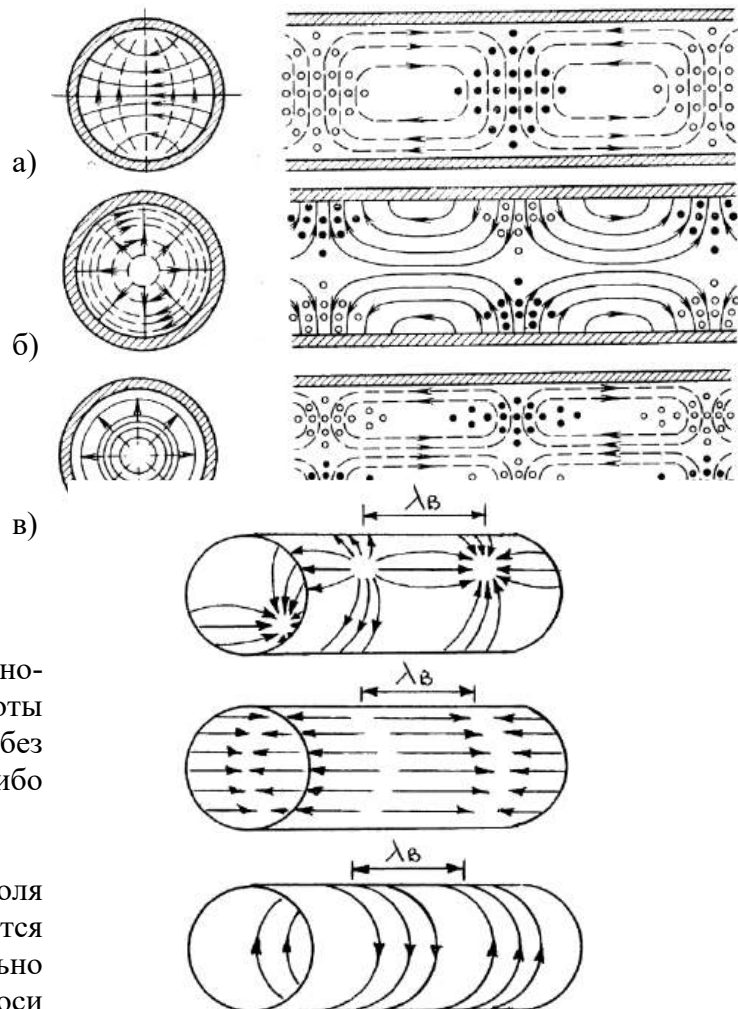


Рисунок 3 - Распределение линий поверхностного тока для волн H_{11} (а), E_{01} (б) и H_{01} (в).

4. Из всех трех типов волн, волна H_{11} обладает наибольшей допустимой рабочей мощностью.

Волна E_{01}

1. Волна является осесимметричной (см.рис.2), поэтому является чрезвычайно удобной в качестве волны, используемой для передачи электромагнитной энергии в круглом волноводе или для применения в функциональных устройствах на основе круглого волновода (СВЧ фильтры, вращающиеся соединения и т.д.);

2. Волна существует наряду с H_{11} , следовательно, для предотвращения потерь электромагнитной энергии требуется принятие специальных мер для подавления волны H_{11} .

Волна H_{01}

1. У данной волны отсутствуют поперечные составляющие поверхностного тока на стенках волновода (имеются только круговые токи), см.рис.3. Это приводит к тому, что при увеличении произведения $R \cdot f$ коэффициент затухания α данной волны стремится к нулю (см.рис.1);

2. Наряду с волной H_{01} существуют еще по крайней мере четыре типа колебаний (см.табл.7.1). В этой связи весьма сложно обеспечить подавления этих паразитных типов колебаний, чтобы добиться тем самым режима с наименьшим коэффициентом затухания электромагнитной энергии в круглом волноводе с волной H_{01} .

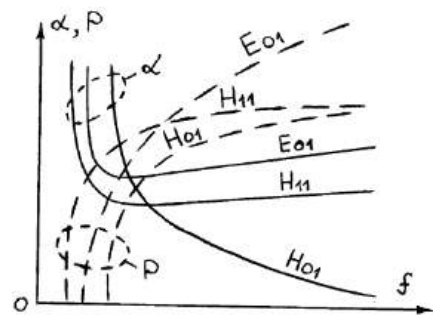


Рисунок 4- Зависимость α и P от частоты

Коаксиальным волноводом называется направляющая система, образованная двумя

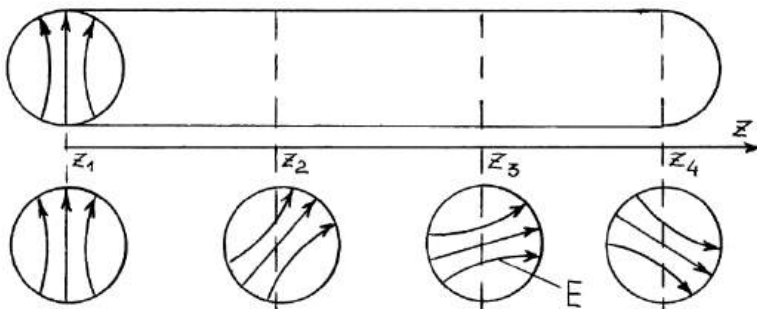


Рисунок 5- Изменение плоскости поляризации волны H_{11}

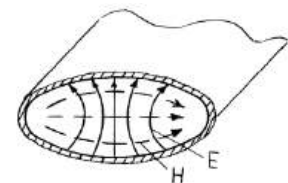


Рисунок 6 - Эллиптический волновод

изолированными друг от друга соосными, металлическими круглыми проводниками диаметрами $2a$ и $2b$ (см.рис.7).

Предположим, что волновод заполнен однородной изотропной средой с параметрами ϵ_a , μ_a и без потерь ($\sigma=0$). Пусть сторонние токи отсутствуют, в этом случае 1-ое и 2-ое уравнения Максвелла принимают вид:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \epsilon_a \frac{d\vec{E}}{dt} = j\omega\epsilon_a \vec{E} \\ \text{rot} \vec{E} = -\mu_a \frac{d\vec{H}}{dt} = -j\omega\mu_a \vec{H} \end{cases}$$

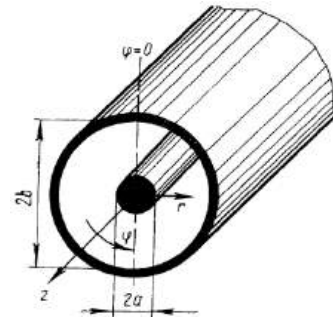


Рисунок 7 - Коаксиальный волновод

Из этих уравнений несложно получить волновые уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

где: – оператор Лапласа;

$k = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}$ – постоянная распространения в неограниченной среде с параметрами ϵ_a , μ_a .

Выберем в качестве направления распространения волны в коаксиальном волноводе ось z , тогда:

$$\vec{E} = E_m(x, y)e^{-j\beta z}; \quad \vec{H} = H_m(x, y)e^{-j\beta z}, \quad (6)$$

где: β – постоянная распространения в коаксиальном волноводе.

Подставив (6) в уравнение Гельмгольца, получим для напряженности электрического поля следующие выражения:

$$\frac{d^2 E_m}{dx^2} e^{-j\beta z} + \frac{d^2 E_m}{dy^2} e^{-j\beta z} + (-j\beta)(-j\beta) E_m e^{-j\beta z} + k^2 E_m e^{-j\beta z} = 0$$

$$\text{Или:} \quad \nabla_{\perp}^2 E_m + (k^2 - \beta^2) E_m = 0, \quad (7)$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

где: – поперечный оператор Лапласа;

$(k^2 - \beta^2) = \gamma^2$ – поперечное волновое число.

Характерной особенностью коаксиального волновода является то, что в отличие от прямоугольного и круглого волноводов, в нем могут распространяться три вида направляемых волн:

1. Поперечные (ТЕМ – волны)
2. Электрические (Е – волны)
3. Магнитные (Н – волны)

Для существования ТЕМ – волн в коаксиальном волноводе (т.е. волн, у которых отсутствуют составляющие E_z и H_z), как следует из уравнения (7), необходимо выполнение условия:

$$\gamma^2 = k^2 - \beta^2 = 0. \quad (8)$$

Из этого условия следуют два важных вывода:

$$1) \beta^2 = k^2, \text{ или } \frac{2\pi}{\lambda_B} = \frac{2\pi}{\lambda}, \text{ или } \lambda_B = \lambda,$$

где: λ_B – длина волны в коаксиальном волноводе;

λ – длина волны в неограниченной среде с параметрами ϵ_a и μ_a .

Таким образом, длина волны в коаксиальном волноводе равна длине волны в неограниченном пространстве.

$$2) \text{ Т.к. } \gamma = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} = 0, \text{ то } \lambda_{кр} = \infty (f_{кр} = 0),$$

где: $\lambda_{кр}$, $f_{кр}$ – критическая длина волны и критическая частота в коаксиальном волноводе.

Это означает, что в коаксиальном волноводе, в отличие от прямоугольного и круглого волновода, сигнал с любой частотой может переноситься ТЕМ-волной.

Поэтому, выбором геометрических размеров a и b коаксиального волновода, на практике всегда добиваются того, чтобы мощность сигнала переносилась только ТЕМ – волной. В связи с этим, рассмотрим более подробно распространение ТЕМ – волн в коаксиальном волноводе.

Из (7) с учетом (8) имеем:

$$\nabla_{\perp} E_m = 0. \quad (9)$$

Для коаксиального волновода решение данного уравнения проще всего искать в цилиндрической системе координат (r, φ, z) . Уравнение вида (9) в математике называется уравнением Лапласа, которое имеет следующее решение:

$$E_m(r, \varphi) = -\text{grad}U = -\left(\underbrace{\frac{dU}{dr}}_{E_{mr}} + \underbrace{\frac{dU}{d\varphi}}_{E_{m\varphi}} \right) = -(E_{mr} + E_{m\varphi}),$$

где: U – некоторая скалярная функция, подлежащая определению. Определим ее, используя известное из математики тождество: $\text{div grad } U = 0$. Раскрывая операцию div grad в цилиндрической системе координат, получим:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{d^2 U}{d\varphi^2} \right) = 0.$$

Накладываем граничные условия: касательная составляющая электрического поля

$$E_{\varphi} = -\frac{dU}{d\varphi}, \text{ то это означает, что } \frac{dU}{d\varphi} = 0$$

E_{φ} должна быть равна нулю при $r = a$ и $r = b$. Т.к. при $r = a$ и $r = b$. Тогда имеем:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) = 0, \text{ или } r \frac{dU}{dr} = \text{const} = A.$$

$$\frac{dU}{dr} = \frac{A}{r}$$

Отсюда: $\frac{dU}{dr} = \frac{A}{r}$, соответственно $U = A \ln r$.

При найденном U определяем комплексные значения составляющих электрического поля ТЕМ – волны в коаксиальном волноводе:

$$\begin{cases} \dot{E}_r = E_{rm} e^{j(\omega t - \beta z)} = -\frac{dU}{dr} e^{j(\omega t - \beta z)} = -\frac{A}{r} e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \dot{E}_\varphi = E_{\varphi m} e^{j(\omega t - \beta z)} = -\frac{dU}{d\varphi} e^{j(\omega t - \beta z)} = -\frac{d(A \ln r)}{d\varphi} e^{j(\omega t - \beta z)} = 0 \end{cases}$$

Составляющие магнитного поля определяем с помощью второго уравнения Максвелла:

$$\text{rot} \dot{E} = -j\omega\mu_a \dot{H}, \quad \text{отсюда:} \quad \dot{H} = -\frac{1}{j\omega\mu_a} \text{rot} \dot{E}$$

Раскрывая операцию rot в цилиндрической системе координат, получим:

$$\begin{cases} \dot{H}_r = 0 \\ \dot{H}_\varphi = -\frac{1}{j\omega\mu_a} \frac{A}{r} j\beta e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \dot{H}_z = 0 \text{ — по определению} \end{cases}$$

Таким образом, составляющие электромагнитного поля ТЕМ – волны в коаксиальном волноводе имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{E}_r = -\frac{A}{r} e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \dot{H}_\varphi = -\frac{\beta}{\omega\mu_a} \frac{A}{r} e^{j(\omega t - \beta z)} \end{cases} \quad (10)$$

На основании уравнений (10) на рис.8 изображена структура поля ТЕМ–волны в коаксиальном волноводе.

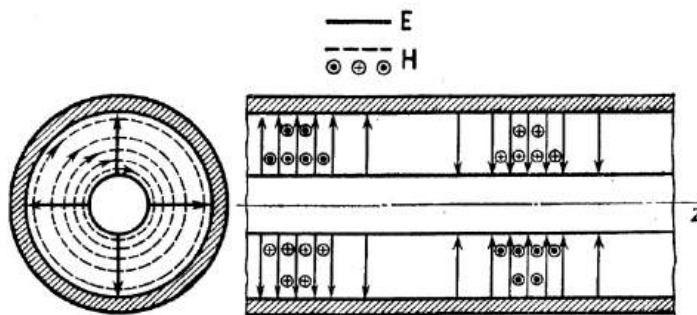


Рисунок 8 Структура поля ТЕМ–волны в коаксиальном волноводе

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с системой компьютерной математики «Mathcad – 14»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для задания 1

№ варианта	Но мА/м	R,м	r	t	z
1	3	0.008	0,4R	0,2	0,8z0
2	2	0.009	0,3R	0,09	0,5z0
3	4	0.01	0,6R	0,4	1,3z0
4	2.5	0.0085	0,8R	0,2	1,2z0
5	5	0.007	0,5R	0,75	0,9z0
6	2.2	0.0075	0,3R	0,4	1,4z0
7	3.1	0.008	0,2R	0,25	1,2z0
8	3.3	0.0125	0,9R	0,6	0,75z0
9	2.8	0.0079	0,4R	0,15	0,4z0
10	3.15	0.011	0,2R	0.6	1,2z0
11	2.6	0.008	0,75R	0,4	0,65z0
12	4.2	0.009	0,4R	0,2	0,6z0
13	2	0.01	0,25R	0,65	0,8z0
14	4	0.007	0,6R	0,4	0,5z0
15	2.5	0.0075	0,15R	0,25	1,3z0

3. Задание для работы

1. Моделирование и исследование волны H11 в круглом волноводе.
2. Моделирование и исследование волн H01 и E01 в круглом волноводе в системе «Mathcad».
3. Моделирование и исследование TEM волны в коаксиальном волноводе.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Моделирование и исследование волны H11 в круглом волноводе.

1.1. Моделирование волны H11 в круглом волноводе в системе «Mathcad».

11) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- коэффициенты волны H11 $m = 1$ $n = 1$;
- диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_r = 1$;
- магнитная проницаемость среды $\mu_r = 1$;
- электрическая постоянная –

$$\epsilon_0 := \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} = 8.842 \times 10^{-12} ;$$

- магнитная постоянная –

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} ;$$

- абсолютная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_a := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$;
- абсолютная магнитная проницаемость среды $\mu_a := \mu_0 \cdot \mu_r$;
- Радиус волновода согласно варианту;
- амплитуда вектора магнитного поля H0 согласно варианту;
- скорость света в среде –

$$C := \frac{1}{\sqrt{\epsilon a \cdot \mu a}};$$

- первый корень первой производной функции Бесселя первого порядка первого рода
- $U_{11} := 1.8412$;

- критическая длина волны–

$$\lambda_{кр} := \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{U_{11}} = 0.034 ;$$

- критическая частота–

$$f_{кр} := \frac{C}{\lambda_{кр}};$$

- частота –

$$f1 := f_{кр} + 1 \cdot 10^9;$$

- круговая частота–

$$\omega1 := 2 \cdot \pi \cdot f1 ;$$

- длина волны в среде–

$$\lambda1 := \frac{C}{f1} ;$$

- поперечное волновое число –

$$\gamma := \frac{U_{11}}{R} ;$$

- постоянная распространения волны в неограниченном пространстве–

$$k1 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda1} ;$$

- постоянная распространения волны в направляющей системе–

$$\beta1 := \sqrt{k1^2 - \gamma^2} ;$$

- $r := 0,0001 \cdot R$;

- $\varphi := 0, \frac{2 \cdot \pi}{360} \dots 2 \cdot \pi$;

- $z0 := 0.01$;

12) Ввести формулы амплитуд составляющих магнитного и электрического полей:

$$H_{zm}(r, \varphi, z) := H_0 \cdot J_1(\gamma \cdot r) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$E_{rm}(r, \varphi, z) := H_0 \cdot \frac{m}{r} \cdot \frac{\omega_1 \cdot \mu a}{\gamma^2} \cdot J_1(\gamma \cdot r) \cdot \sin(m \cdot \varphi) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$E_{\varphi m}(r, \varphi, z) := H_0 \cdot \frac{\omega_1 \cdot \mu a}{\gamma} \cdot \frac{d}{dr}(J_1(\gamma \cdot r)) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$H_{rm}(r, \varphi, z) := \frac{-\beta_1}{\omega_1 \cdot \mu a} \cdot E_{\varphi m}(r, \varphi, z)$$

$$H_{\varphi m}(r, \varphi, z) := \frac{\beta_1}{\omega_1 \cdot \mu a} \cdot E_{rm}(r, \varphi, z)$$

- 13) Для проверки результатов моделирования построим графики зависимостей составляющих $H_{\varphi m}$, H_{zm} поля в полярной системе координат. Координату z задать равной нулю. Примеры графиков приведены на рисунках 1.1 и 1.2

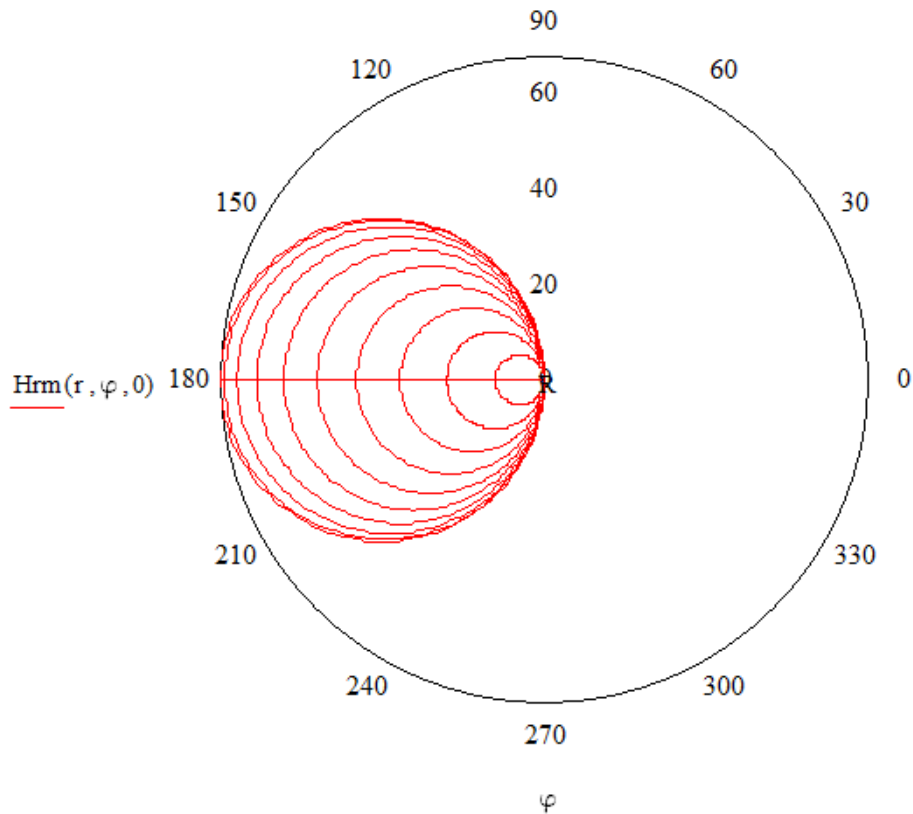


Рис. 1.1 – график распределения радиальной составляющей амплитуды магнитного поля в полярной системе координат

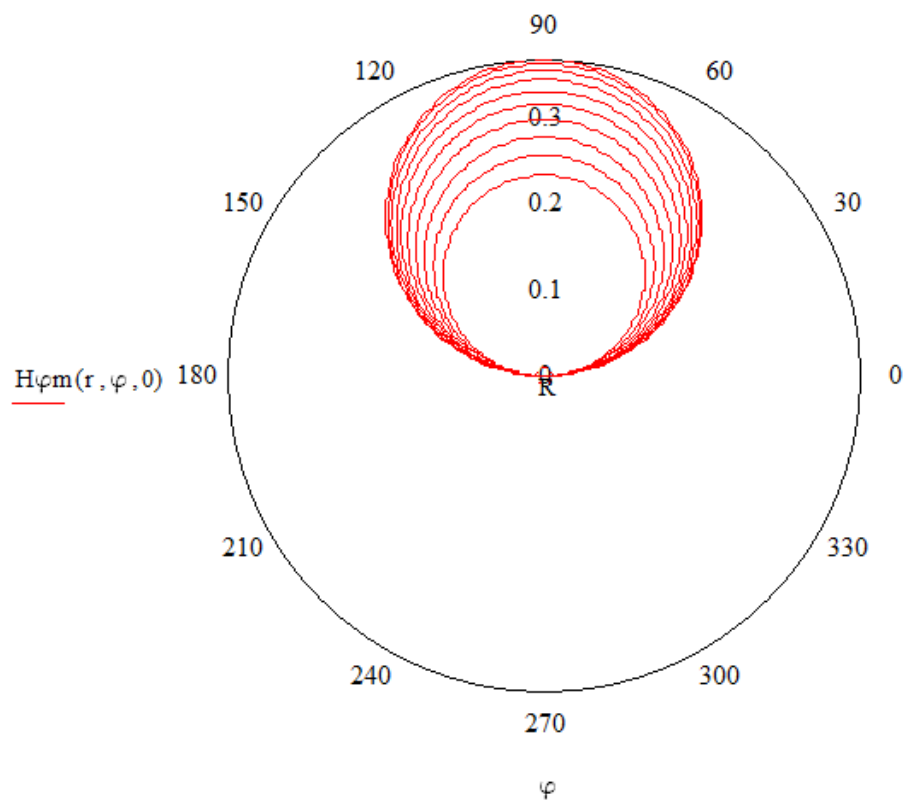


Рис. 1.2 - график распределения угловой составляющей амплитуды магнитного поля в полярной системе координат

1.2. Отобразить графически результаты моделирования волны H_{11} в системе «Mathcad».

- 6) Ввести формулы расчета мгновенных значений составляющих электрического и магнитного полей

$$H_z(r, \varphi, t, z) := H_{zm}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$H_\varphi(r, \varphi, t, z) := H_{\varphi m}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$H_r(r, \varphi, t, z) := H_{rm}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$E_\varphi(r, \varphi, t, z) := E_{\varphi m}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$E_r(r, \varphi, t, z) := E_{rm}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

- 3) Отобразить на одном графике продольные и поперечные составляющие магнитного поля. Для построения графика в месте ввода функции в качестве аргументов взять t , z и r согласно варианту. Пример графика приведен на рисунке 1.3 Для корректного отображения всех составляющих на одном графике, радиальной составляющей добавлен масштабный множитель $1/100$.

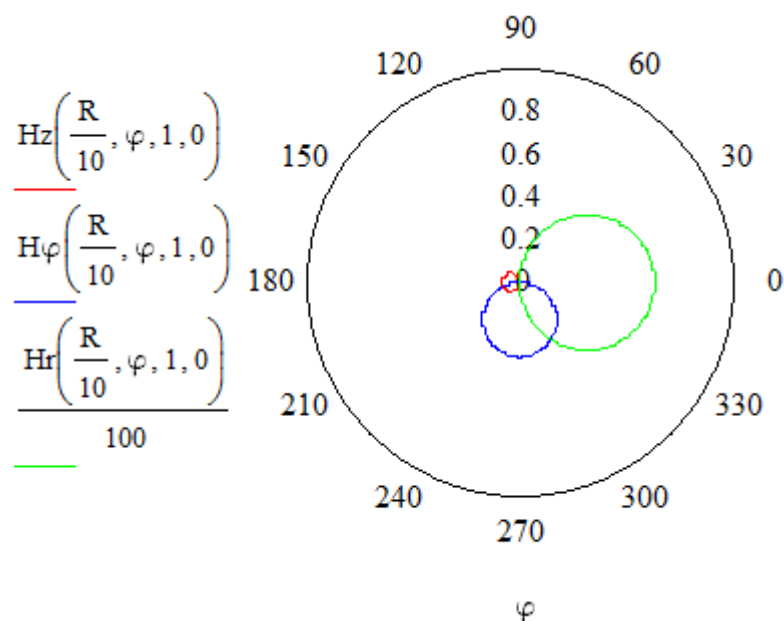


Рис. 1.3 – график распределения составляющих магнитного поля в полярной системе координат

- 4) Отобразить на одном графике продольные и поперечные составляющие электрического поля. Для построения графика в месте ввода функции в качестве аргументов взять t , z и g согласно варианту. Пример графика приведен на рисунке 1.4. Для корректного отображения всех составляющих на одном графике, угловой составляющей добавлен масштабный множитель $1/100$.

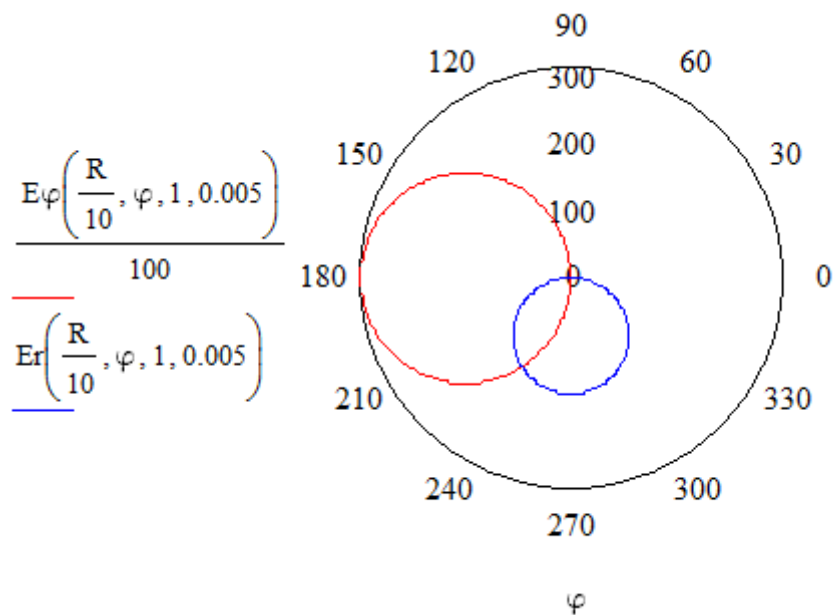


Рис. 1.4 - график распределения составляющих электрического поля в полярной системе координат

- 5) Построить в Декартовой системе координат график распространения бегущей волны. Для построения графиков вдоль оси z в месте ввода функции в качестве аргументов задать $\varphi = \pi$, t и g согласно варианту.

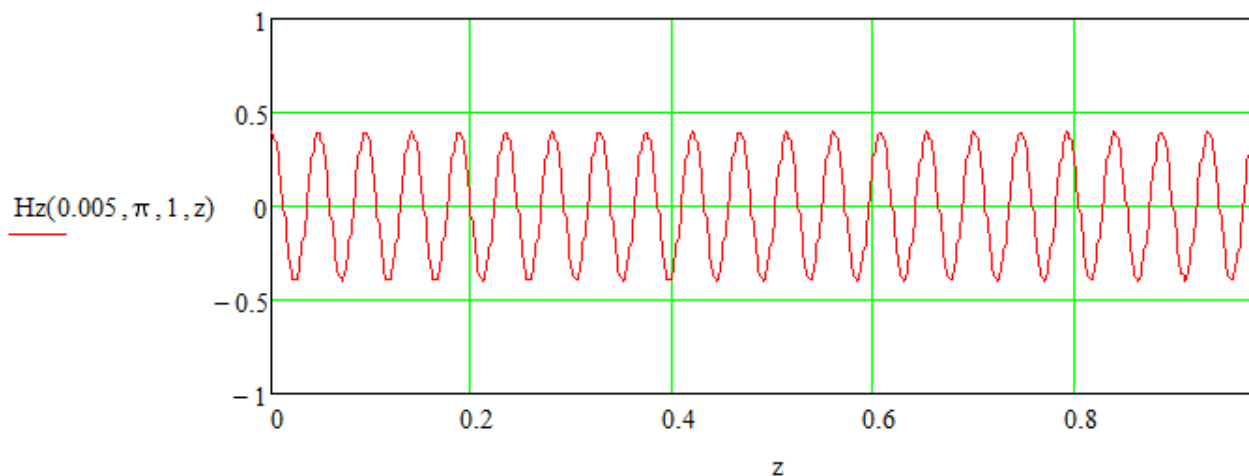


Рис. 1.5 – график распространения продольной составляющей магнитного поля
вдоль оси z

1.3. Исследование зависимости составляющих волны H_{11} от времени и координат в системе «Mathcad».

- 1) Анимировать график распределения составляющих магнитного поля при изменении радиуса. Для этого в месте ввода функции в качестве аргумента необходимо добавить переменную FRAME, как показано на рисунке ниже. t, z взять согласно варианту.

$$\frac{\begin{array}{l} \text{Hz}\left(\frac{\text{R} \cdot \text{FRAME}}{10}, \varphi, 1, 0\right) \\ \text{H}\varphi\left(\frac{\text{R} \cdot \text{FRAME}}{10}, \varphi, 1, 0\right) \\ \text{Hr}\left(\frac{\text{R} \cdot \text{FRAME}}{10}, \varphi, 1, 0\right) \end{array}}{100}$$

Выполните команду Инструменты | Анимация | Запись. В диалоговом окне Animate задайте номер первого кадра в поле С: 0, номер последнего кадра в поле По: 30 и скорость анимации в поле Частота: 10 в кадрах в секунду. Выделите протаскиванием указателя мыши область в документе, которая станет роликом анимации (график распределения составляющих магнитного поля). Затем нажмите кнопку "анимировать". Несколько скриншотов воспроизведения анимации занесите в отчет. Пример приведен на рисунке ниже

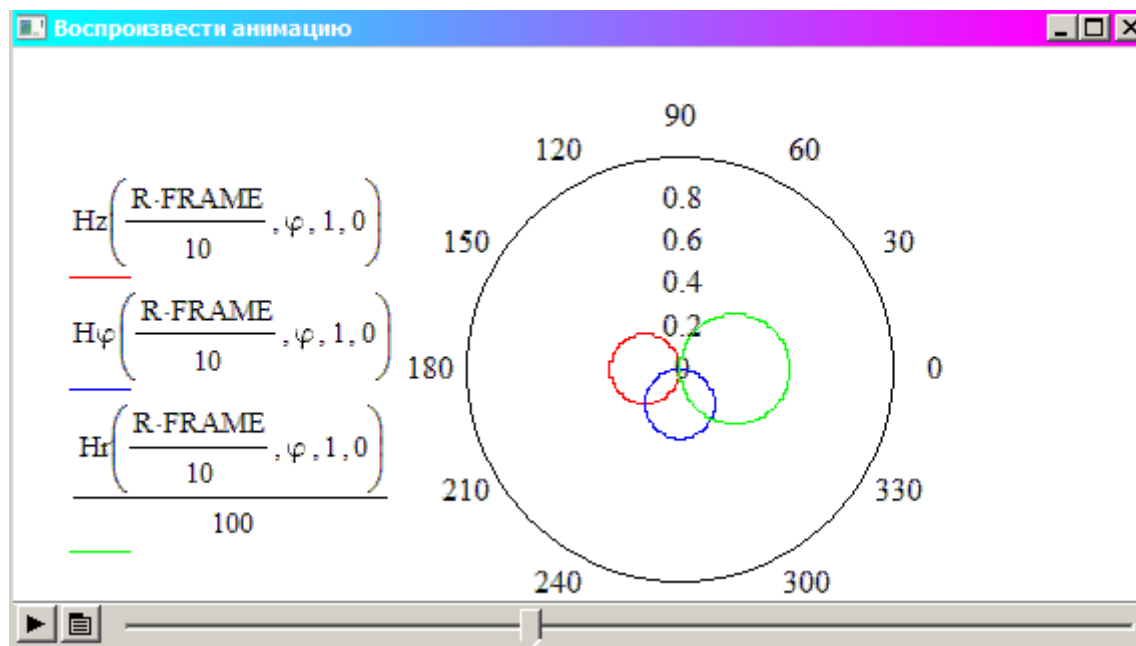


Рис. 1.13- анимация бегущей волны

- 2) Анимировать график распределения составляющих магнитного поля при изменении времени. Для этого в месте ввода функции в качестве аргумента необходимо добавить переменную FRAME, как показано на рисунке ниже. r, z взять согласно варианту. Несколько скриншотов воспроизведения анимации занесите в отчет.

$$\begin{aligned} & \underline{H_z\left(\frac{R}{10}, \varphi, 0.01\text{FRAME}, 0.005\right)} \\ & \underline{H_\varphi\left(\frac{R}{10}, \varphi, 0.01\text{FRAME}, 0.005\right)} \\ & \underline{H_r\left(\frac{R}{10}, \varphi, 0.01\text{FRAME}, 0.005\right)} \\ & \underline{100} \end{aligned}$$

- 3) Анимировать график распределения составляющих магнитного поля при изменении координаты z . Для этого в месте ввода функции в качестве аргумента необходимо добавить переменную FRAME, как показано на рисунке ниже. t, r взять согласно варианту. Несколько скриншотов воспроизведения анимации занесите в отчет.

$$\begin{aligned} & \underline{H_z\left(\frac{R}{10}, \varphi, 1, 0.001\text{FRAME}\right)} \\ & \underline{H_\varphi\left(\frac{R}{10}, \varphi, 1, 0.001\text{FRAME}\right)} \\ & \underline{H_r\left(\frac{R}{10}, \varphi, 1, 0.001\text{FRAME}\right)} \\ & \underline{100} \end{aligned}$$

- 4) Сделать выводы по проведенным исследованиям.

Задание 2. Моделирование и исследование волн H01 и E01 в круглом волноводе в системе «Mathcad».

2.1. Моделирование и исследование волны H01 в круглом волноводе в системе «Mathcad».

- 4) Для этого внести в Mathcad файл следующие изменения:

- коэффициенты волны $H_{01} \quad m = 0 \quad n = 1$;
- первый корень первой производной функции Бесселя нулевого порядка первого рода, далее во всех формулах заменить U_{11} на U_{01}
- $U_{01} := 3.83$;
- Ввести формулы амплитуд составляющих магнитного и электрического полей:

$$H_{zm}(r, \varphi, z) := H_0 \cdot J_0(\gamma \cdot r) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$E_{rm}(r, \varphi, z) := H_0 \cdot \frac{m}{r} \cdot \frac{\omega l \cdot \mu_a}{\gamma^2} \cdot J_0(\gamma \cdot r) \cdot \sin(m \cdot \varphi) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$E_{\varphi m}(r, \varphi, z) := H_0 \cdot \frac{\omega l \cdot \mu_a}{\gamma} \cdot \frac{d}{dr}(J_0(\gamma \cdot r)) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$H_{rm}(r, \varphi, z) := \frac{-\beta_1}{\omega l \cdot \mu_a} \cdot E_{\varphi m}(r, \varphi, z)$$

$$H_{\varphi m}(r, \varphi, z) := \frac{\beta_1}{\omega l \cdot \mu_a} \cdot E_{rm}(r, \varphi, z)$$

- 5) Отобразить на одном графике продольные и поперечные составляющие электрического и магнитного полей. Для построения графика в месте ввода функции в качестве аргументов взять t, z и r согласно варианту. Для корректного отображения всех составляющих на одном графике, использовать масштабные множители. Пример графика приведен на рисунке 2.1

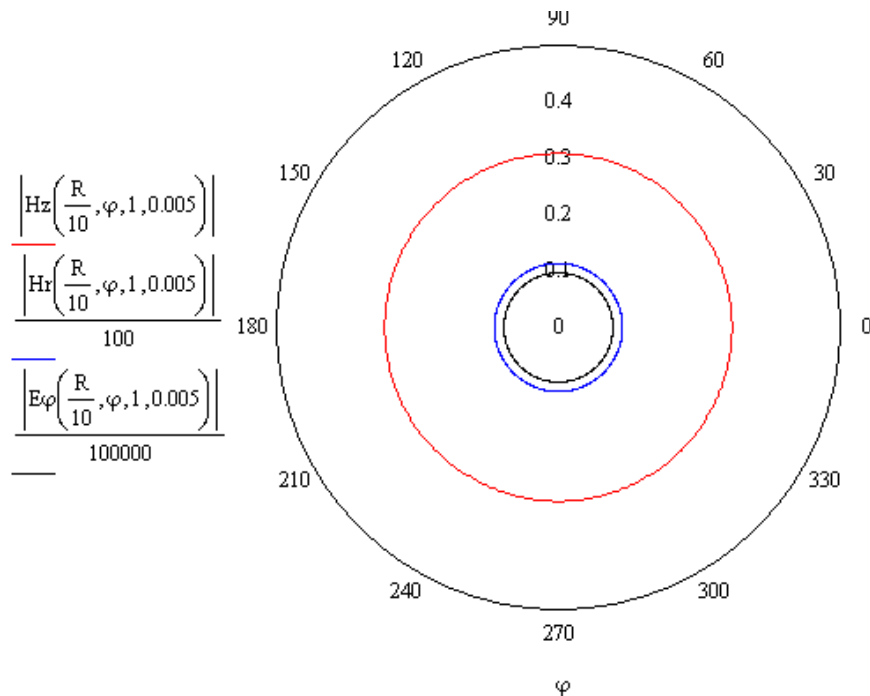


Рис. 2.1 – график распределения составляющих магнитного и электрического полей в полярной системе координат

- 6) Исследовать зависимости составляющих волны H_{01} от времени и координат. Для этого анимировать график распределения составляющих магнитного и электрического полей, добавляя переменную $FRAME$ в качестве аргумента, как показано на рисунке ниже. Несколько скриншотов воспроизведения анимаций занесите в отчет.

$$\begin{array}{ccc}
\frac{\left| \text{Hz} \left(\frac{R \cdot \text{FRAME}}{10}, \varphi, 1, 0.005 \right) \right|}{100} & \frac{\left| \text{Hz} \left(\frac{R}{10}, \varphi, 0.01 \cdot \text{FRAME}, 0.005 \right) \right|}{100} & \frac{\left| \text{Hz} \left(\frac{R}{10}, \varphi, 1, 0.005 \cdot \text{FRAME} \right) \right|}{100} \\
\frac{\left| \text{Hr} \left(\frac{R \cdot \text{FRAME}}{10}, \varphi, 1, 0.005 \right) \right|}{100} & \frac{\left| \text{Hr} \left(\frac{R}{10}, \varphi, 0.01 \cdot \text{FRAME}, 0.005 \right) \right|}{100} & \frac{\left| \text{Hr} \left(\frac{R}{10}, \varphi, 1, 0.005 \cdot \text{FRAME} \right) \right|}{100} \\
\frac{\left| \text{E}\varphi \left(\frac{R \cdot \text{FRAME}}{10}, \varphi, 1, 0.005 \right) \right|}{100000} & \frac{\left| \text{E}\varphi \left(\frac{R}{10}, \varphi, 0.01 \cdot \text{FRAME}, 0.005 \right) \right|}{100000} & \frac{\left| \text{E}\varphi \left(\frac{R}{10}, \varphi, 1, 0.005 \cdot \text{FRAME} \right) \right|}{100000}
\end{array}$$

7) Сравните полученные результаты с результатами выполнения задания 1 и сделайте выводы.

Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для задания 2

№ варианта	E ₀ В/м	№ варианта	E ₀ В/м
1	3	9	2.8
2	2	10	3.15
3	4	11	2.6
4	2.5	12	4.2
5	5	13	2
6	2.2	14	4
7	3.1	15	2.5
8	3.3		

2.2. Моделирование и исследование волны E01 в круглом волноводе в системе «Mathcad».

Моделирование волны E01 ведется для частоты больше критической в новом Mathcad файле.

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- коэффициенты волны E01 $m = 0$ $n = 1$;
- диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_r = 1$;
- магнитная проницаемость среды $\mu_r = 1$;
- электрическая постоянная –

$$\epsilon_0 := \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} = 8.842 \times 10^{-12} ;$$

- магнитная постоянная –

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} ;$$

- абсолютная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_a := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$;
- абсолютная магнитная проницаемость среды $\mu_a := \mu_0 \cdot \mu_r$;
- амплитуда вектора магнитного поля E0 согласно варианту;

- скорость света в среде –

$$C := \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \cdot \mu_a}};$$

- первая производной функции Бесселя нулевого порядка первого рода

$$V01 := 2.4048;$$

- критическая длина волны–

$$\lambda_{кр} := \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{V01};$$

- критическая частота–

$$f_{кр} := \frac{C}{\lambda_{кр}};$$

- частота –

$$f1 := f_{кр} + 1 \cdot 10^9;$$

- круговая частота–

$$\omega1 := 2 \cdot \pi \cdot f1;$$

- длина волны в среде–

$$\lambda1 := \frac{C}{f1};$$

- поперечное волновое число –

$$\gamma := \frac{V01}{R};$$

- постоянная распространения волны в неограниченном пространстве–

$$k1 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda1};$$

- постоянная распространения волны в направляющей системе–

$$\beta1 := \sqrt{k1^2 - \gamma^2};$$

$$z0 := \frac{4 \cdot \pi}{\beta};$$

$$i := \sqrt{-1};$$

$$r := 0,0001 \cdot R;$$

$$\varphi := 0, \frac{2 \cdot \pi}{360} \dots 2 \cdot \pi;$$

$$z0 := 0.01;$$

14) Ввести формулы амплитуд составляющих магнитного и электрического полей:

$$E_{zm}(r, \varphi, z) := E_0 \cdot J_0(\gamma \cdot r) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$E_{rm}(r, \varphi, z) := \frac{-\beta_1}{\gamma} \cdot E_0 \cdot \left(\frac{d}{dr} J_0(\gamma \cdot r) \right) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$E_{\varphi m}(r, \varphi, z) := E_0 \cdot \frac{m}{r} \cdot \frac{\beta_1}{\gamma} \cdot J_0(\gamma \cdot r) \cdot \cos(-\beta_1 \cdot z)$$

$$H_{rm}(r, \varphi, z) := \frac{-\omega_1 \cdot \varepsilon_a \cdot E_{\varphi m}(r, \varphi, z)}{\beta_1}$$

$$H_{\varphi m}(r, \varphi, z) := \frac{-\omega_1 \cdot \varepsilon_a \cdot E_{rm}(r, \varphi, z)}{\beta_1}$$

- 15) Ввести формулы расчета мгновенных значений составляющих электрического и магнитного полей

$$H_z(r, \varphi, t, z) := H_{zm}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$H_{\varphi}(r, \varphi, t, z) := H_{\varphi m}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$H_r(r, \varphi, t, z) := H_{rm}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$E_{\varphi}(r, \varphi, t, z) := E_{\varphi m}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$E_r(r, \varphi, t, z) := E_{rm}(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

- 16) Отобразить на одном графике продольные и поперечные составляющие электрического и магнитного полей. Для построения графика в месте ввода функции в качестве аргументов взять t, z и r согласно варианту. Для корректного отображения всех составляющих на одном графике, использовать масштабные множители. Пример графика приведен на рисунке 2.2

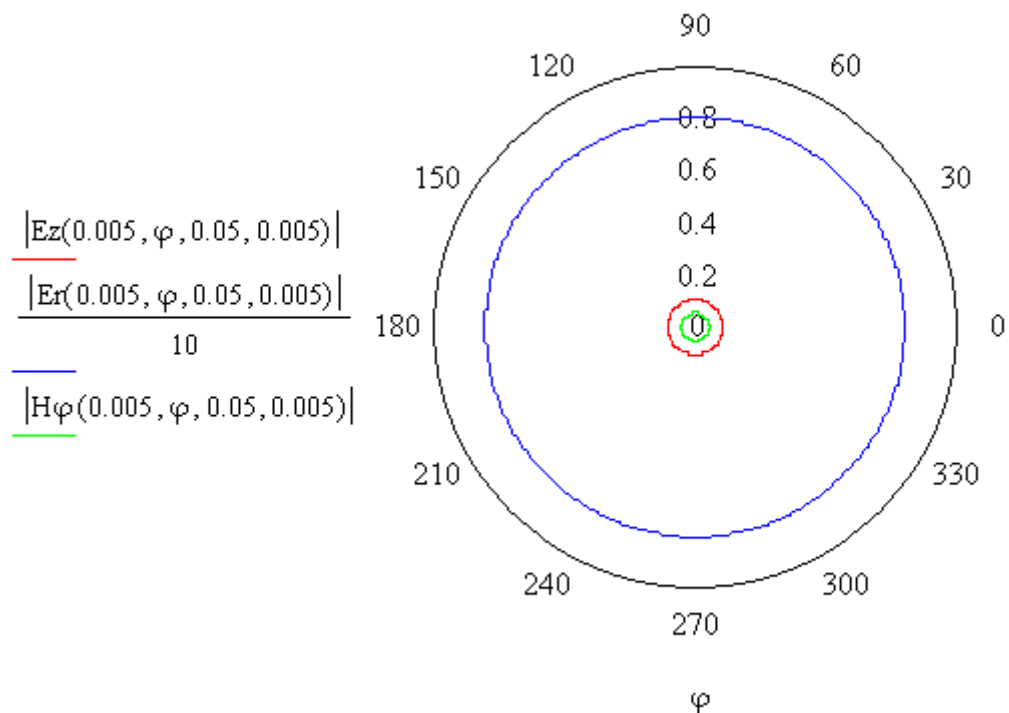


Рис. 2.2 – график распределения составляющих магнитного и электрического

полей в полярной системе координат

- 17) Исследовать зависимости составляющих волны E01 от времени и координат. Для этого анимировать график распределения составляющих магнитного и электрического полей, добавляя переменную FRAME в качестве аргументов t, r, z по аналогии с предыдущим заданием.
- 18) Сделать выводы по проведенным исследованиям

Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для задания 3

№ варианта	I0 А	R1,м	R2	t	z
1	3	0.0026	4R1	0,2	0,8z0
2	2	0.0025	4R1	0,9	0,5z0
3	4	0.005	4R1	0,4	1,3z0
4	2.5	0.0045	4R1	0,2	1,2z0
5	5	0.0027	4R1	0,75	0,9z0
6	2.2	0.00175	4R1	0,4	1,4z0
7	3.1	0.0018	4R1	0,25	1,2z0
8	3.3	0.00245	4R1	0,6	0,75z0
9	2.8	0.0017	4R1	0,15	0,4z0
10	3.15	0.0036	4R1	0.6	1,2z0
11	2.6	0.0025	4R1	0,4	0,65z0
12	4.2	0.00355	4R1	0,2	0,6z0
13	2	0.00245	4R1	0,65	0,8z0
14	4	0.0017	4R1	0,4	0,5z0
15	2.5	0.0036	4R1	0,25	1,3z0

Задание 3. Моделирование и исследование ТЕМ волны в коаксиальном волноводе.

3.1. Моделирование электромагнитной волны в коаксиальном волноводе в системе «Mathcad».

- 1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:
- диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_r = 1$;
 - магнитная проницаемость среды $\mu_r = 1$;
 - радиус центрального проводника R1 согласно варианту;
 - внутренний радиус внешнего проводника R2 согласно варианту;
 - электрическая постоянная –

$$\epsilon_0 := \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} = 8.842 \times 10^{-12} ;$$

- магнитная постоянная –

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} ;$$

- абсолютная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_a := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$;

- абсолютная магнитная проницаемость среды $\mu_a := \mu_0 \cdot \mu$;
- сила тока I_0 согласно варианту;
- скорость света в среде –

$$C := \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \cdot \mu_a}};$$

- критическая длина волны–

$$\lambda_{кр} := \pi(R1 + R2);$$

- критическая частота–

$$f_{кр} := \frac{C}{\lambda_{кр}};$$

- частота –

$$f1 := f_{кр} + 1 \cdot 10^9;$$

- круговая частота–

$$\omega1 := 2 \cdot \pi \cdot f1;$$

- длина волны в среде–

$$\lambda1 := \frac{C}{f1};$$

- постоянная распространения волны в неограниченном пространстве–

$$k1 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda1};$$

- волновое сопротивление среды, заполняющей пространство между цилиндрами–

$$Z_c := 60 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} = 60;$$

- $r := R1, R1 + 0.001 \dots R2$;

- $\varphi := 0, \frac{2 \cdot \pi}{360} \dots 2 \cdot \pi$;

- $z0 := 0.01$;

2) Ввести формулы амплитуд составляющих магнитного и электрического полей:

$$Em(r, \varphi, z) := \frac{I_0 \cdot Z_c}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \exp(-k1 \cdot z)$$

$$Hm(r, \varphi, z) := \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \exp(-k1 \cdot z)$$

3.2. Исследование зависимости составляющих ТЕМ волны от времени и координат в системе «Mathcad».

1) Ввести формулы расчета мгновенных значений составляющих электрического и магнитного полей

$$E(r, \varphi, z, t) := Em(r, \varphi, z) \cos(\omega1 \cdot t)$$

$$H(r, \varphi, z, t) := Hm(r, \varphi, z) \cdot \cos(\omega1 \cdot t)$$

- 2) Отобразить на одном графике обе составляющие электромагнитного поля. Для построения графика в месте ввода функции в качестве аргументов взять t , z и согласно варианту. Пример графика приведен на рисунке 3.1. Для корректного отображения всех составляющих на одном графике, электрической составляющей добавлен масштабный множитель $1/10$.

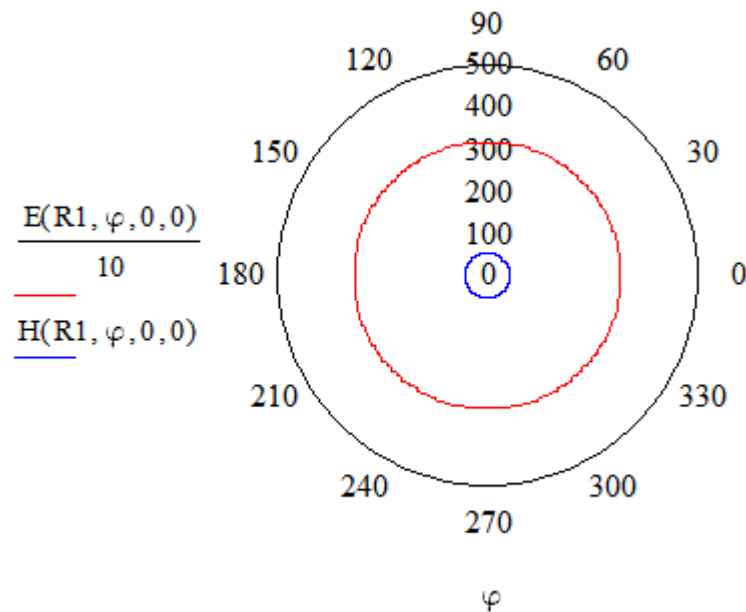


Рис. 3.1. – график распределения составляющих электрического и магнитного поля в полярной системе координат

- 3) Анимировать график распределения составляющих электрического и магнитного полей при изменении радиуса. Для этого в месте ввода функции в качестве аргумента необходимо добавить переменную FRAME, как показано на рисунке ниже. t , z взять согласно варианту.

$$\frac{E(R1+0.001\cdot FRAME, \varphi, 0, 0)}{10}$$

$$\frac{H(R1+0.001\cdot FRAME, \varphi, 0, 0)}{10}$$

- 4) Анимировать график распределения составляющих электромагнитного поля при изменении времени. Для этого в месте ввода функции в качестве аргумента необходимо добавить переменную FRAME, как показано на рисунке ниже. t , z взять согласно варианту. Несколько скриншотов воспроизведения анимации занесите в отчет.

$$\frac{E(R1, \varphi, 0, 0.001\cdot FRAME, 0)}{10}$$

$$\frac{H(R1, \varphi, 0, 0.001\cdot FRAME, 0)}{10}$$

- 5) Анимировать график распределения составляющих электромагнитного поля при изменении координаты z . Для этого в месте ввода функции в качестве аргумента необходимо добавить переменную FRAME, как показано на рисунке ниже. t , r взять согласно варианту. Несколько скриншотов воспроизведения анимации занесите в отчет.

$$\frac{E(R1, \varphi, 0, 0.001\cdot FRAME)}{10}$$

$$\frac{H(R1, \varphi, 0, 0.001\cdot FRAME)}{10}$$

б) Сделать выводы по проведенным исследованиям

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. По указанию преподавателя практически выполнить по одному из заданий каждого учебного вопроса, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в разработанной модели.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11 **Исследование диэлектрического волновода**

Краткие теоретические сведения

В диэлектрических пластинах или стержнях, не ограниченных металлическими поверхностями, при определенных условиях могут без значительных потерь распространяться электромагнитные волны. В этом случае такие пластины или стержни могут выполнять роль диэлектрических волноводов. Низкий уровень потерь в диэлектрических волноводах объясняется явлением полного внутреннего отражения на границе двух диэлектриков при условии, что электромагнитные волны распространяются в оптически более плотной среде (см. рис. 18.5)

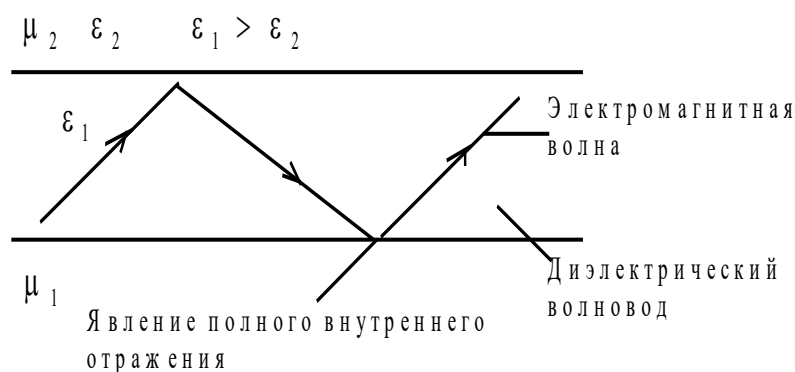


Рисунок 18.5 - Распространение электромагнитных волн в диэлектрическом волноводе.

Наиболее типичным диэлектрическим волноводом является круглый (см. рис. 18.6)

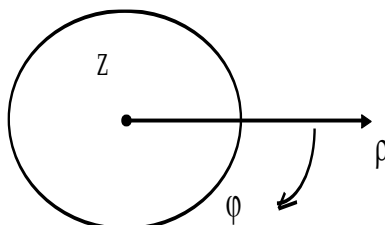


Рисунок 18.6 - Поперечное сечение круглого волновода в цилиндрической системе координат.

Аналогично решению задачи о полом круглом металлическом волноводе можно предположить, что в круглом диэлектрическом волноводе могут распространяться E и H поля. Тогда, для E поля с учетом $\partial / \partial \varphi = 0$ можно записать:

$$E_{\rho} = -\frac{\gamma}{K_c^2} \cdot \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \rho} \quad (18.21)$$

$$H_{\varphi} = -\frac{i\omega\epsilon}{K_c^2} \cdot \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \rho} \quad (18.22)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \rho} + K^2 \dot{E}_z = 0 \quad (18.23)$$

2. Поля в диэлектрическом волноводе

Решение 18.23 будет выглядеть аналогично $\dot{E}_z$ для круглого волновода:

$$\dot{E}_{z1} = \dot{B}_1 J_0(K_{c1}\rho) e^{-\gamma z} \quad (18.24)$$

где $\dot{E}_{z1}$ - поле внутри волновода;

$$K_{c1}^2 = K_1^2 + \gamma^2 = \omega^2 \varepsilon_1 \mu_1 + \gamma^2$$

$$\dot{E}_{z2} = \dot{B}_2 H_0^{(2)}(K_{c2}\rho) e^{-\gamma z} \quad (18.25)$$

где $\dot{E}_{z2}$ - поле снаружи волновода;

$$K_{c2}^2 = K_2^2 + \gamma^2 = \omega^2 \varepsilon_2 \mu_2 + \gamma^2$$

Используя граничные условия:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{z1} &= \dot{E}_{z2} \\ &\text{при } \rho=0 \end{aligned} \quad (18.26)$$

$$\dot{H}_{\varphi 1} = \dot{H}_{\varphi 2}$$

получаем:

$$B_1 J_0(K_{c1}a) = B_2 H_0^{(2)}(K_{c2}a) \quad (18.27)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{K_{c1}} B_1 J_1(K_{c1}a) = \frac{\varepsilon_2}{K_{c2}} B_2 H_1^{(2)}(K_{c2}a) \quad (18.28)$$

Из (18.27) и (18.28)

$$\frac{J_0(K_{c1}a)}{J_1(K_{c1}a)} = \frac{\varepsilon_1 K_{c2} H_0^{(2)}(K_{c2}a)}{\varepsilon_2 K_{c1} H_1^{(2)}(K_{c2}a)}. \quad (18.29)$$

Решение трансцендентного уравнения (18.29) совместно с выражениями для K_{c1} и K_{c2} позволяет определить постоянную распространения для E поля.

Определим условие отсутствия распространения энергии за пределы диэлектрического волновода (условие полного внутреннего отражения).

Для этого воспользуемся соотношением (18.25) для поля вне волновода.

Очевидно, условие не распространения в радиальном направлении с учетом приближения для функции Ханкеля

$$H_0^{(2)}(K_{c2}\rho) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot e^{-i\left(K_{c2}\rho - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (18.30)$$

будет выглядеть так

$$K_{c2} = -i|K_{c2}| \quad (18.31)$$

т.е. K_{c2} должен быть чисто мнимым, в этом случае поле за пределами волновода

будет затухать пропорционально $\frac{1}{\sqrt{\rho}} \cdot e^{K_{c2}\rho}$.

Можно показать, что условие (18.31) выполняется в случае, если частота электромагнитных волн в волноводе больше критической, определяемой выражением:

$$f_{кр} = \frac{\chi_{он}}{2\pi a \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1 - \varepsilon_2 \mu_2}} \quad (18.32)$$

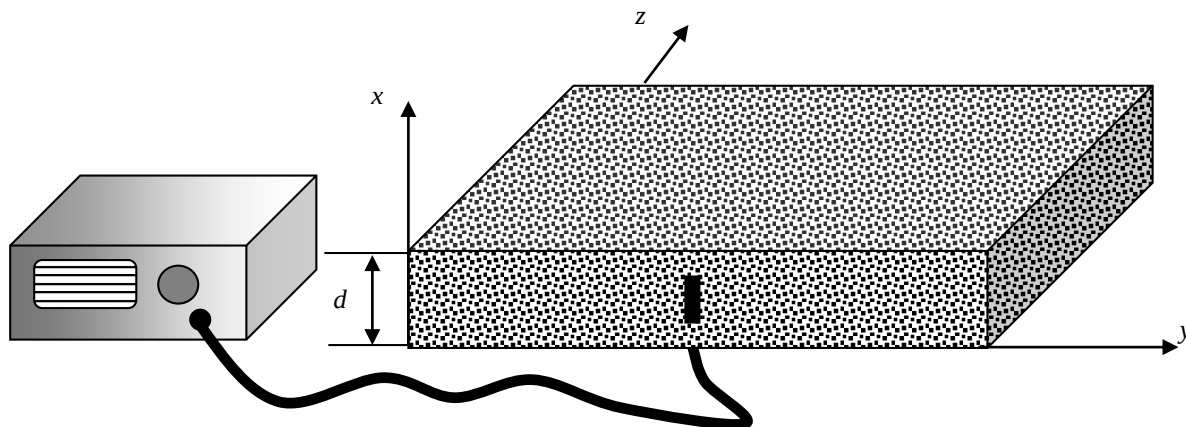
где $\chi_{он}$ - корни уравнения $J_0(\chi) = 0$

Из (18.32) следует, что в волноводе может распространяться бесконечное количество волн, что соответствует выводам, полученным для ранее рассмотренных волноводов.

Диэлектрические волноводы применяются для передачи миллиметровых и субмиллиметровых волн, т.к. в этих диапазонах обладают наименьшими потерями.

Исходные данные

В свободном пространстве ($\mu=\mu_0$ и $\varepsilon=\varepsilon_0$) расположена диэлектрическая пластина толщиной d и электромагнитными постоянными $\mu=\mu_0$ и $\varepsilon=\varepsilon_a$. Генератором СВЧ колебаний с частотой f_z в ней возбуждается электромагнитное поле.



ЗАДАНИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЕ

1. Определить типы колебаний, возбуждаемых генератором в пластине.
2. Для каждого типа колебаний определить:
 - поперечные коэффициенты фазы g и p ;
 - фазовую скорость v_ϕ ;
 - критическую частоту $f_{кр}$.
3. Исследовать структуру электромагнитного поля в пластине.
4. Исследовать влияние параметров пластины на фазовую скорость ЭМВ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

N (№ варианта)	1	2		15
Толщина пластины d , см	$(2+0,2N)^{0,5}$			
Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r	$2 + 0,2N$			
Частота f_z , ГГц	$10N^{0,1}$			

Для волн ЧЕТНОГО типа E10, E30 и т.д. решите графическим методом трансцендентное уравнение относительно поперечных коэффициентов фазы в диэлектрике g и в свободном пространстве p

$$\begin{cases} \varepsilon_r d g \operatorname{tg}(g d) = d p \\ (g d)^2 + p d^2 = \omega^2 d^2 \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \mu_0 \end{cases}$$

Для волн НЕЧЕТНОГО типа E20, E40 и т.д. решите графическим методом трансцендентное уравнение относительно поперечных коэффициентов фазы в диэлектрике g и в свободном пространстве p

$$\begin{cases} \varepsilon_r d g \operatorname{ctg}(g d) = -d p \\ (g d)^2 + p d^2 = \omega^2 d^2 \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \mu_0 \end{cases}$$

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для самостоятельной работы студентов
по дисциплине «Основы теории электромагнитных полей и волн»

для студентов направления подготовки
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль) «Интеллектуальная обработка данных в
инфокоммуникационных системах и сетях»

Ставрополь, 2026

Методические указания по организации самостоятельной работы студентов составлено в соответствии с требованиями программы дисциплины «Основы теории электромагнитных полей и волн» для бакалавров направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи. Учебно-методическое пособие посвящено планируемой учебной работе студентов, выполняемой во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия, при частичном, непосредственном участии преподавателя.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА КАК ВАЖНЕЙШАЯ ФОРМА УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА	5
2. ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СРС	6
3. ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	7
4. ОРГАНИЗАЦИЯ СРС	9
5. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	10
6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА - НЕОБХОДИМОЕ ЗВЕНО СТАНОВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ.....	13
7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ФОРМАМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	15

ВВЕДЕНИЕ

Цель и задачи освоения дисциплины

Цель освоения дисциплины: формирование у студентов универсальных и профессиональных компетенций, основанных на освоении особенностей построения процесса обучения по направлению «Информатика и вычислительная техника», понимании истории, состояния, применения и перспектив развития инфокоммуникационных технологий.

Задачи освоения дисциплины:

1. Формирование представления об образовательной деятельности в вузе, основных нормативных документах, регламентирующих образовательную деятельность студента, этическом кодексе студента СКФУ, принципах и формах образования, а также методах обучения.
2. Приобретение, усвоение и передача знаний. Организация и планирование самостоятельной работы студентом.
3. Изучение пакетов прикладных программ, необходимых для образовательной деятельности студентов данного направления.
4. Изучение объектов и характеристики профессиональной деятельности бакалавров по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».
5. Знакомство студентов с основами теории передачи информации, современными системами связи, историей и перспективами их развития.
6. Формирование современных представлений о компьютерной технике и Интернете, истории развития компьютеров, Неймановской архитектуре ЭВМ и различных поколений ЭВМ.
7. Знакомство с историей развития электроники и радиоэлектроники.
8. Формирование представления о пассивных радиоэлектронных компонентах: резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности; активных радиоэлектронных компонентах: электронных лампах, транзисторах; основах микроэлектроники, функциональной электроники и наноэлектроники.
9. Формирования представления об основах робототехники

Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Основы теории электромагнитных полей и волн» относится к дисциплинам обязательной части дисциплин.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА КАК ВАЖНЕЙШАЯ ФОРМА УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. Обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования - "подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности".

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную

информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в лабораторных занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. По данной дисциплине «Основы теории электромагнитных полей и волн» предусмотрены следующие:

Использование материала учебно-методического комплекса дисциплины

На первом этапе необходимо ознакомиться с обязательным минимумом содержания основной образовательной программы по изучаемой дисциплине. Далее необходимо изучить рабочую программу дисциплины, в которой рассмотрено содержание тем дисциплины лекционного курса, взаимосвязь тем лекций с лабораторных занятий, темы и виды самостоятельной работы. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности, представленные в учебной программе по дисциплине «Основы теории электромагнитных полей и волн».

Работа с литературой

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации, которые представлены в учебной программе.

Самостоятельная работа приобщает студентов к научному творчеству, поиску и решению актуальных современных проблем.

2. ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СРС

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию

самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Задачами СРС являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на лабораторных занятиях, при написании курсовых и выпускной квалификационной работ, для эффективной подготовки к итоговым зачетам и Зачет с оценкой.

3. ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

В образовательном процессе высшего профессионального образовательного учреждения выделяется два вида самостоятельной работы – аудиторная, под руководством преподавателя, и внеаудиторная. Тесная взаимосвязь этих видов работ предусматривает дифференциацию и эффективность результатов ее выполнения и зависит от организации, содержания, логики учебного процесса (межпредметных связей, перспективных знаний и др.):

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

Основными видами самостоятельной работы студентов без участия преподавателя по данной дисциплине являются:

- формирование и усвоение содержания конспекта лекций на базе рекомендованной лектором учебной литературы, включая информационные

образовательные ресурсы (электронные учебники, электронные библиотеки и др.);

- подготовка к практическим работам, их оформление.

Основными видами самостоятельной работы студентов с участием преподавателей являются:

- текущие консультации;
- прием и защита практических работ (во время проведения).

При этом, критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если студент продемонстрировал точное выполнение заданий практической работы, правильно выполнил отчет, активно участвует в работе, владеет материалом, умеет логично и четко излагать мысли, отвечая на задаваемые вопросы, творчески подходит к решению представленных индивидуальных заданий, показывает самостоятельность мышления.

Оценка «хорошо» выставляется, если студент продемонстрировал точное выполнение заданий практической работы, правильно выполнил отчет, активно участвует в работе, владеет материалом, умеет логично и четко излагать мысли, отвечая на задаваемые вопросы, творчески подходит к решению представленных индивидуальных заданий, показывает самостоятельность мышления., при этом допустил не более одной ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если студент продемонстрировал точное выполнение заданий практической работы, правильно выполнил отчет, активно участвует в работе, владеет материалом, умеет логично и четко излагать мысли, отвечая на задаваемые вопросы, творчески подходит к решению представленных индивидуальных заданий, показывает самостоятельность мышления, при этом допускает более двух ошибок при ответе на поставленные вопросы.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если студент не продемонстрировал точное выполнение заданий практической работы, неправильно выполнил отчет, не участвует в работе, не владеет материалом, не умеет логично и четко излагать мысли, отвечая на задаваемые вопросы, не справляется с индивидуальными заданиями, демонстрирует отсутствие самостоятельности мышления и допускает серьезные ошибки при ответах на поставленные вопросы.

Оценочный лист

Ф.И.О. студента	Оценка за ответы на контрольные вопросы	Оценка за задание по практической работе	Общая оценка

4. ОРГАНИЗАЦИЯ СРС

Методика организации самостоятельной работы студентов зависит от структуры, характера и особенностей дисциплины «Основы теории электромагнитных полей и волн», объема часов на ее изучение, вида заданий для самостоятельной работы студентов, индивидуальных качеств студентов и условий учебной деятельности.

Процесс организации самостоятельной работы студентов включает в себя следующие этапы:

- подготовительный (определение целей, составление программы, подготовка методического обеспечения, подготовка оборудования);
- основной (реализация программы, использование приемов поиска информации, усвоения, переработки, применения, передачи знаний, фиксирование результатов, самоорганизация процесса работы);
- заключительный (оценка значимости и анализ результатов, их систематизация, оценка эффективности программы и приемов работы, выводы о направлениях оптимизации труда).

Деятельность студентов по формированию и развитию навыков учебной самостоятельной работы

В процессе самостоятельной работы студент приобретает навыки самоорганизации, самоконтроля, самоуправления, саморефлексии и становится активным самостоятельным субъектом учебной деятельности.

Выполняя самостоятельную работу под контролем преподавателя студент должен:

- освоить минимум содержания, выносимый на самостоятельную работу студентов и предложенный преподавателем в соответствии с образовательными стандартами высшего образования;
- планировать самостоятельную работу в соответствии с графиком самостоятельной работы, предложенным преподавателем;
- самостоятельную работу студент должен осуществлять в организационных формах, предусмотренных учебным планом и рабочей программой преподавателя;
- выполнять самостоятельную работу и отчитываться по ее результатам в соответствии с графиком представления результатов, видами и сроками отчетности по самостоятельной работе студентов.

студент может:

сверх предложенного преподавателем (при обосновании и согласовании с ним) и минимума обязательного содержания, определяемого программой по данной дисциплине:

- самостоятельно определять уровень (глубину) проработки содержания материала;
- предлагать темы и вопросы для самостоятельной проработки;
- в рамках общего графика выполнения самостоятельной работы предлагать обоснованный индивидуальный график выполнения и отчетности по результатам самостоятельной работы;
- предлагать свои варианты организационных форм самостоятельной работы;
- использовать для самостоятельной работы методические пособия, учебные пособия, разработки сверх предложенного преподавателем перечня;
- использовать не только контроль, но и самоконтроль результатов самостоятельной работы в соответствии с методами самоконтроля, предложенными преподавателем или выбранными самостоятельно.

Самостоятельная работа студентов должна оказывать важное влияние на формирование личности будущего бакалавра, она планируется студентом самостоятельно. Каждый студент самостоятельно определяет режим своей работы и меру труда, затрачиваемого на овладение учебным содержанием по каждой дисциплине. Он выполняет внеаудиторную работу по личному индивидуальному плану, в зависимости от его подготовки, времени и других условий.

5. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Основной формой самостоятельной работы студента является изучение конспекта лекций, их дополнение, рекомендованной литературы, активное участие на лабораторных занятиях. Но для успешной учебной деятельности, ее интенсификации, необходимо учитывать следующие субъективные факторы:

1. Знание школьного программного материала, наличие прочной системы знаний, необходимой для усвоения основных вузовских курсов. Это особенно важно для математических дисциплин. Необходимо отличать пробелы в знаниях, затрудняющие усвоение нового материала, от малых способностей. Затратив силы на преодоление этих пробелов, студент обеспечит себе нормальную успеваемость и поверит в свои способности.

2. Наличие умений, навыков умственного труда:

- а) умение конспектировать на лекции и при работе с книгой;
- б) владение логическими операциями: сравнение, анализ, синтез, обобщение, определение понятий, правила систематизации и классификации.

3. Специфика познавательных психических процессов: внимание, память, речь, наблюдательность, интеллект и мышление. Слабое развитие каждого из них становится серьезным препятствием в учебе.

4. Хорошая работоспособность, которая обеспечивается нормальным физическим состоянием. Ведь серьезное учение – это большой многосторонний и разнообразный труд. Результат обучения оценивается не количеством сообщаемой информации, а качеством ее усвоения, умением ее использовать и развитием у себя способности к дальнейшему самостоятельному образованию.

5. Соответствие избранной деятельности, профессии индивидуальным способностям. Необходимо выработать у себя умение саморегулировать свое эмоциональное состояние и устранять обстоятельства, нарушающие деловой настрой, мешающие намеченной работе.

6. Овладение оптимальным стилем работы, обеспечивающим успех в деятельности. Чередование труда и пауз в работе, периоды отдыха, индивидуально обоснованная норма продолжительности сна, предпочтение вечерних или утренних занятий, стрессоустойчивость и особенности подготовки к ним.

7. Уровень требований к себе, определяемый сложившейся самооценкой.

Адекватная оценка знаний, достоинств, недостатков - важная составляющая самоорганизации человека, без нее невозможна успешная работа по управлению своим поведением, деятельностью.

Одна из основных особенностей обучения в высшей школе заключается в том, что постоянный внешний контроль заменяется самоконтролем, активная роль в обучении принадлежит уже не столько преподавателю, сколько студенту.

Зная основные методы научной организации умственного труда, можно при наименьших затратах времени, средств и трудовых усилий достичь наилучших результатов.

Эффективность усвоения поступающей информации зависит от работоспособности человека в тот или иной момент его деятельности.

Работоспособность - способность человека к труду с высокой степенью напряженности в течение определенного времени. Различают внутренние и внешние факторы работоспособности.

К внутренним факторам работоспособности относятся интеллектуальные особенности, воля, состояние здоровья.

К внешним:

- организация рабочего места, режим труда и отдыха;
- уровень организации труда - умение получить справку и пользоваться информацией;
- величина умственной нагрузки.

Выдающийся русский физиолог Н. Е. Введенский выделил следующие условия продуктивности умственной деятельности:

- во всякий труд нужно входить постепенно;
- мерность и ритм работы. Разным людям присущ более или менее разный темп работы;
- привычная последовательность и систематичность деятельности;
- правильное чередование труда и отдыха.

Отдых не предполагает обязательного полного бездействия со стороны человека, он может быть достигнут простой переменой дела. В течение дня работоспособность изменяется. Наиболее плодотворным является *утреннее время (с 8 до 14 часов)*, причем максимальная работоспособность приходится на период с 10 до 13 часов, затем *послеобеденное* - (с 16 до 19 часов) и *вечернее* (с 20 до 24 часов). Очень трудный для понимания материал лучше изучать в начале каждого отрезка времени (лучше всего утреннего) после хорошего отдыха. Через 1-1,5 часа нужны перерывы по 10 - 15 мин, через 3 - 4 часа работы отдых должен быть продолжительным - около часа.

Составной частью научной организации умственного труда является овладение техникой умственного труда.

Время, которым располагает студент для выполнения учебного плана, складывается из двух составляющих: одна из них - это аудиторная работа в вузе по расписанию занятий, другая - внеаудиторная самостоятельная работа. Задания и материалы для самостоятельной работы выдаются во время учебных занятий по расписанию, на этих же занятиях преподаватель осуществляет контроль за самостоятельной работой, а также оказывает помощь студентам по правильной организации работы.

Самостоятельные занятия потребуют интенсивного умственного труда, который необходимо не только правильно организовать, но и стимулировать. При этом очень важно уметь поддерживать устойчивое внимание к изучаемому материалу. Выработка внимания требует значительных волевых усилий. Именно поэтому, если студент замечает, что он часто отвлекается во время самостоятельных занятий, ему надо заставить себя сосредоточиться. Подобную процедуру необходимо проделывать постоянно, так как это

является тренировкой внимания. Устойчивое внимание появляется тогда, когда человек относится к делу с интересом.

Следует правильно организовать свои занятия по времени: 50 минут - работа, 5-10 минут - перерыв; после 3 часов работы перерыв - 20-25 минут. Иначе нарастающее утомление повлечет неустойчивость внимания. Очень существенным фактором, влияющим на повышение умственной работоспособности, являются систематические занятия физической культурой. Организация активного отдыха предусматривает чередование умственной и физической деятельности, что полностью восстанавливает работоспособность человека.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА - НЕОБХОДИМОЕ ЗВЕНО СТАНОВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

Прогресс науки и техники, информационных технологий приводит к значительному увеличению научной информации, что предъявляет более высокие требования не только к моральным, нравственным свойствам человека, но и в особенности, постоянно возрастающие требования в области образования – обновление, модернизация общих и профессиональных знаний, умений специалиста.

Всякое образование должно выступать как динамический процесс, присущий человеку и продолжающийся всю его жизнь. Овладение научной мыслью и языком науки является необходимой составляющей в самоорганизации будущего специалиста исследователя. Под этим понимается не столько накопление знаний, сколько овладение научно обоснованными способами их приобретения. В этом, вообще говоря, состоит основная задача вуза.

Специфика вузовского учебного процесса, в организации которого самостоятельной работе студента отводятся все больше места, состоит в том, что он является как будто бы последним и самым адекватным звеном для реализации этой задачи. Ибо во время учебы в вузе происходит выработка стиля, навыков учебной (познавательной) деятельности, рациональный характер которых будет способствовать постоянному обновлению знаний высококвалифицированного выпускника вуза.

Однако до этого пути существуют определенные трудности, в частности, переход студента от синтетического процесса обучения в средней школе, к аналитическому в высшей. Это связано как с новым содержанием обучения (расширение общего образования и углубление профессиональной

подготовки), так и с новыми, неизвестными до сих пор формами: обучения (лекции, семинары, лабораторные занятия и т.д.). Студент получает не только знания, предусмотренные программой и учебными пособиями, но он также должен познакомиться со способами приобретения знаний так, чтобы суметь оценить, что мы знаем, откуда мы это знаем и как этого знания мы достигли. Ко всему этому приходят через собственную самостоятельную работу.

Это и потому, что самостоятельно приобретенные знания являются более оперативными, они становятся личной собственностью, а также мотивом поведения, развивают интеллектуальные черты, внимание, наблюдательность, критичность, умение оценивать. Роль преподавателя в основном заключается в руководстве накопления знаний (по отношению к первокурсникам), а в последующие годы учебы, на старших курсах, в совместном установлении проблем и заботе о самостоятельных поисках студента, а также контролирования за их деятельностью. Отметим, что нельзя ограничиваться только приобретением знаний предусмотренных программой изучаемой дисциплины, надо постоянно углублять полученные знания, сосредотачивая их на какой-нибудь узкой определенной области, соответствующей интересам студента. Углубленное изучение всех предметов, предусмотренных программой, на практике является возможным, и хорошая организация работы позволяет экономить время, что создает условия для глубокого, систематического, заинтересованного изучения самостоятельно выбранной студентом темы.

Конечно, все советы, примеры, рекомендации в этой области, даваемые преподавателем, или определенными публикациями, или другими источниками, не гарантируют никакого успеха без проявления собственной активности в этом деле, т. е. они не дают готовых рецептов, а должны способствовать анализу собственной работы, ее целей, организации в соответствии с индивидуальными особенностями. Учитывая личные возможности, существующие условия жизни и работы, навыки, на основе этих рекомендаций, возможно, выработать индивидуально обоснованную совокупность методов, способов, найти свой стиль или усовершенствовать его, чтобы изучив определенный материал, иметь время оценить его значимость, пригодность и возможности его применения, чтобы, в конечном счете, обеспечить успешность своей учебы с будущей профессиональной деятельности

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ФОРМАМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Система вузовского обучения подразумевает значительно большую самостоятельность студентов в планировании и организации своей деятельности.

Работа с литературой

При работе с литературой необходимо подобрать литературу, научиться правильно ее читать, вести записи. Для подбора литературы в библиотеке используются алфавитный и систематический каталоги.

Важно помнить, что рациональные навыки работы с книгой - это всегда большая экономия времени и сил.

Правильный подбор учебников рекомендуется преподавателем, читающим лекционный курс. Необходимая литература может быть также указана в методических разработках по данному курсу.

Изучая материал по учебнику, следует переходить к следующему вопросу только после правильного уяснения предыдущего, описывая на бумаге все выкладки и вычисления (в том числе те, которые в учебнике опущены или на лекции даны для самостоятельного вывода).

При изучении любой дисциплины большую и важную роль играет самостоятельная индивидуальная работа.

Особое внимание следует обратить на определение основных понятий курса. Студент должен подробно разбирать примеры, которые поясняют такие определения, и уметь строить аналогичные примеры самостоятельно. Нужно добиваться точного представления о том, что изучаешь. Полезно составлять опорные конспекты. При изучении материала по учебнику полезно в тетради (на специально отведенных полях) дополнять конспект лекций. Там же следует отмечать вопросы, выделенные студентом для консультации с преподавателем.

Выводы, полученные в результате изучения, рекомендуется в конспекте выделять, чтобы они при перечитывании записей лучше запоминались.

Опыт показывает, что многим студентам помогает составление листа опорных сигналов, содержащего важнейшие и наиболее часто употребляемые формулы и понятия. Такой лист помогает запомнить формулы, основные положения лекции, а также может служить постоянным справочником для студента.

Различают два вида чтения; первичное и вторичное. *Первичное* - это внимательное, неторопливое чтение, при котором можно остановиться на трудных местах. После него не должно остаться ни одного непонятого слова. Содержание не всегда может быть понятно после первичного чтения.

Задача *вторичного* чтения - полное усвоение смысла целого (по счету это чтение может быть и не вторым, а третьим или четвертым).

Чтение научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации. От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия.

Выделяют **четыре основные установки в чтении научного текста**:

1. информационно-поисковый (задача – найти, выделить искомую информацию)
2. усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений)
3. аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему)
4. творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к научному тексту связано существование и нескольких **видов чтения**:

1. библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
2. просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
3. ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц, цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
4. изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять

изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

5. аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач. Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым или в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках учебной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с научным текстом.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

1. Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения;
2. Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала;
3. Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала;
4. Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора;
5. Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного.

Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Методические рекомендации по составлению конспекта:

1. Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
2. Выделите главное, составьте план.

3. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.

4. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно.

5. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли.

В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы.

Практические занятия

Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на лабораторных занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью выполнения заданий практической работы, поставленных задач. При этих условиях студент не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном выполнении заданий нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи). Решение задач или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что выполнение каждого учебного задания должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие,

и по возможности с выводом. Выполнение заданий данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

Самопроверка

После изучения определенной темы по записям в конспекте и учебнику, а также решения достаточного количества соответствующих заданий на лабораторных занятиях и самостоятельно студенту рекомендуется, используя лист опорных материалов, воспроизвести по памяти определения, выводы формул, формулировки основных положений и доказательств.

В случае необходимости нужно еще раз внимательно разобраться в материале.

Иногда недостаточность усвоения того или иного вопроса выясняется только при изучении дальнейшего материала. В этом случае надо вернуться назад и повторить плохо усвоенный материал. Важный критерий усвоения теоретического материала - умение решать задачи или пройти тестирование по пройденному материалу. Однако следует помнить, что правильное решение задачи может получиться в результате применения механически заученных формул без понимания сущности теоретических положений.

Консультации

Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала или при выполнении заданий у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

Подготовка к зачету с оценкой по дисциплине «Основы теории электромагнитных полей и волн»

Изучение многих общепрофессиональных и специальных дисциплин завершается Зачетом с оценкой. Подготовка к Зачету с оценкой способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к Зачету с оценкой, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время сессии для систематизации знаний.

Текущая аттестация студентов проводится преподавателями, ведущими практические занятия по дисциплине в следующих формах: собеседование

при выполнении практической работы с предоставлением письменного отчета. Основанием для снижения оценки являются:

- не качественно выполненная работа на персональном компьютере,
- письменный отчет выполнен в небрежной форме и с ошибками,
- студент не дает исчерпывающий ответ на вопрос преподавателя,
- путается или затрудняется в демонстрации работы на компьютере.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях небрежного его выполнения и с ошибками.

Критерии оценивания собеседования приведены в Фонде оценочных средств по дисциплине «Основы теории электромагнитных полей и волн».

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля):

- Научная электронная библиотека e-Library – <https://elibrary.ru/>
- Электронная-библиотечная система IPRbooks – <http://iprbooks.ru>
- Электронная-библиотечная система Лань – <https://e.lanbook.com/>

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

При чтении лекций используется компьютерная техника, демонстрации презентационных мультимедийных материалов. На занятиях студенты выполняют практические работы, предоставляя отчеты, подготовленные ими в часы самостоятельной работы.

Информационные справочные системы:

Информационно-справочные и информационно-правовые системы, используемые при изучении дисциплины:

1. Электронная-библиотечная система IPRbooks – <http://iprbooks.ru>
2. Электронная-библиотечная система Лань – <https://e.lanbook.com/>
3. Научная электронная библиотека e-Library – <https://elibrary.ru/>