

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 «Физические основы телекоммуникаций»
для студентов направления подготовки
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа №1	4
Лабораторная работа №2	22
Лабораторная работа №3	36
Лабораторная работа №4	53
Лабораторная работа №5	69
Лабораторная работа №6	92
Лабораторная работа №7	115
Лабораторная работа №8	133
Лабораторная работа №9	142
Лабораторная работа №10	151
Лабораторная работа №11	157
Лабораторная работа №12	169
Лабораторная работа №13	181
Лабораторная работа №14	191
Лабораторная работа №15	198
Лабораторная работа №16	212

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

**ТЕМА 1 ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННАЯ
ИНФРАСТРУКТУРА КАК СЛОЖНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ
СИСТЕМА**

**Занятие 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ
АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ**

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

- 1. Моделирование и исследование простых аналоговых сигналов.**
- 2. Моделирование и исследование простых цифровых сигналов.**

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование простых аналоговых сигналов.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
2. Моделирование и исследование простых цифровых сигналов.		50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Большинство сигналов имеют аналоговую природу, то есть изменяются непрерывно во времени и могут принимать любые значения на некотором интервале. Аналоговые сигналы используются в телефонии, радиовещании, телевидении.

Аналоговые сигналы описываются некоторой математической функцией времени. Примеры простого аналогового сигнала:

- гармонический высокочастотный сигнал;
- однотональный сигнал в низкочастотном звуковом диапазоне частот.

Гармонический сигнал – это гармоническое колебание, в котором изменения физических величин происходят по закону косинуса или синуса (гармоническому закону), со временем распространяющееся в пространстве, способное нести в себе информацию (данные) в одном из своих параметров, описывается уравнением:

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; $\varphi = \omega t + \varphi_0$ – фаза гармонического сигнала; t – время; ω – циклическая частота сигнала; φ_0 – начальная фаза колебания.

Фаза колебания измеряется в радианах и определяет значение смещения (колеблющейся величины) в данный момент времени. Амплитуда колебания зависит только от начального отклонения (начальной энергии, сообщенной колебательной системе).

С помощью гармонического сигнала можно получить сколь угодно сложный аналоговый сигнал в виде суммы гармоник:

$$s(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_{0k}) . \quad (2)$$

Ввести такой сигнал в цифровую систему для обработки невозможно, так как на любом интервале времени он может иметь бесконечное множество значений, и для точного (без погрешности) представления его значения требуются числа бесконечной разрядности. Поэтому очень часто необходимо преобразовывать аналоговый сигнал так, чтобы можно было представить его последовательностью чисел заданной разрядности.

Дискретный сигнал. Дискретизация аналогового сигнала состоит в том, что сигнал представляется в виде последовательности значений, взятых в дискретные моменты времени t_i (где i — индекс). Обычно промежутки времени между последовательными отсчётами ($\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$) постоянны; в таком случае, Δt называется *интервалом дискретизации*. Сами же значения сигнала $x(t)$ в моменты измерения, то есть $x_i = x(t_i)$, называются *отсчётами*.

Квантованный сигнал. При квантовании вся область значений сигнала разбивается на уровни, количество которых должно быть представлено в числах заданной разрядности. Расстояния между этими уровнями называется шагом квантования Δ . Число этих уровней равно N (от 0 до $N-1$). Каждому уровню присваивается некоторое число. Отсчёты сигнала сравниваются с уровнями квантования и в качестве сигнала выбирается число, соответствующее некоторому уровню квантования. Каждый уровень квантования кодируется двоичным числом с n разрядами. Число уровней квантования N и число разрядов n двоичных чисел, кодирующих эти уровни, связаны соотношением $n \geq \log_2(N)$.

Цифровой сигнал. Для того, чтобы представить аналоговый сигнал последовательностью чисел конечной разрядности, его следует сначала превратить в дискретный сигнал, а затем подвергнуть квантованию. Квантование является частным случаем дискретизации, когда дискретизация происходит по одинаковой величине, называемой квантом. В результате сигнал будет представлен таким образом, что на каждом заданном промежутке времени известно приближённое (квантованное) значение сигнала, которое можно записать целым числом. Последовательность таких чисел и будет являться цифровым сигналом.

Цифровой сигнал — это дискретная последовательность импульсов по напряжению, каждый из которых имеет ступенчатую форму. Каждый импульс — это единичный сигнал. В общем случае данные в двоичной форме при передаче кодируются так, что один бит данных может быть отображен в несколько единичных сигналов. В простейшем случае это соответствие имеет однозначный характер: один бит — один единичный сигнал. В примерах, приведенных в предыдущих разделах, мы как раз встречали именно этот простейший случай, когда

двоичная 1 была представлена высоким потенциалом, а двоичный 0 – низким. В этом разделе мы рассмотрим разные схемы кодирования данных на физическом уровне.

Если все единичные сигналы имеют одинаковую полярность (т.е. все положительную или все отрицательную), то говорят, что сигнал униполярный. В противном случае логическую единицу представляют положительным потенциалом, а логический ноль – отрицательным. Скорость передачи данных – это количество бит в секунду, которые передают с помощью сигналов. Эту скорость также называют битовой скоростью.

Продолжительность (длина) бита – это интервал времени, которое нужно передатчику, чтобы испустить последовательность надлежащих единичных сигналов. При скорости передачи данных R бит/сек, длина бита равна $1/R$.

Теперь рассмотрим, какие задачи должен решать приемник при передаче. Прежде всего, приемник должен быть точно настроен на длину бита. Он должен уметь распознавать начало и конец передачи каждого бита, а также уровень сигнала: низкий или высокий. На рис. 1 видно, что эти задачи решаются измерением уровня сигнала в середине длины бита и сравнением результата измерения с пороговым значением. Из-за шума на линии при этом могут возникать ошибки.

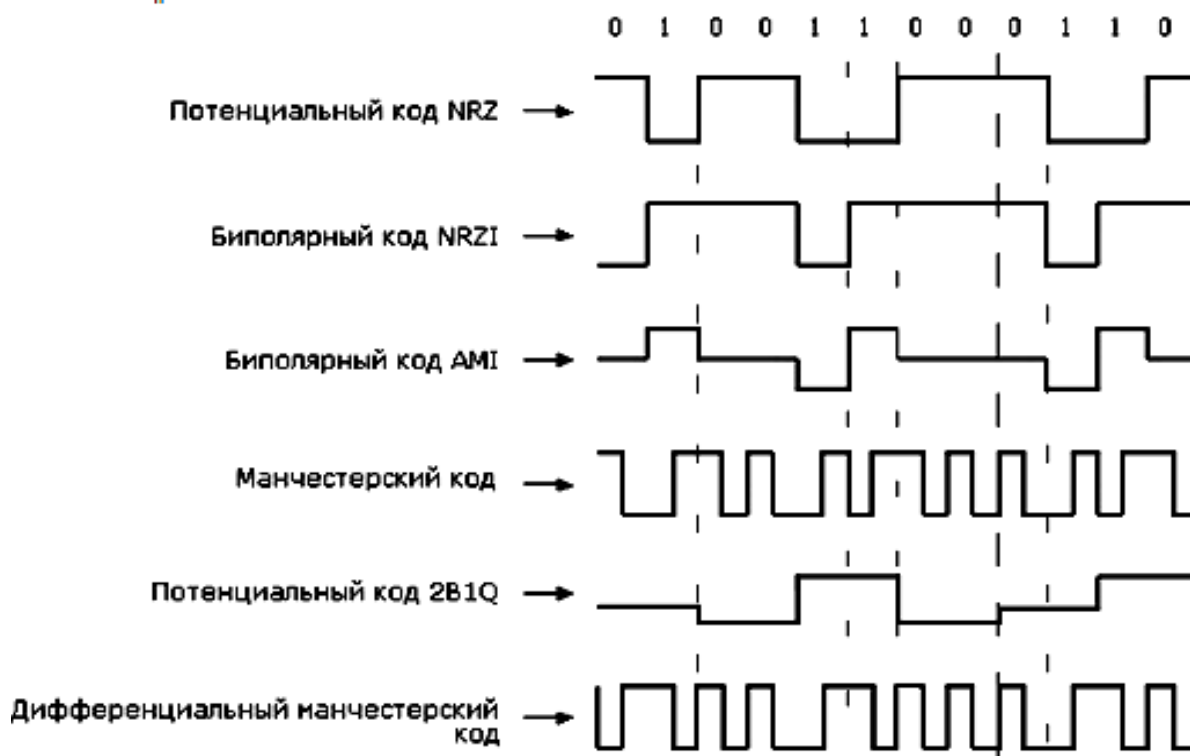


Рис. 1 – Примеры кодов

Есть три важных фактора влияющие на правильность передачи: уровень шума, скорость передачи данных и ширина полосы пропускания канала. Существует еще один фактор, влияющий на передачу данных: это способ представления (кодировки) данных на физическом уровне. Существует много таких способов, мы рассмотрим лишь наиболее распространенные. Они показаны на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1. Свойства кодов

Потенциальный код NRZ (Non Return to Zero - «без возвращения к нулю») 1 – высокий потенциал 0 – низкий потенциал
Биполярный код или униполярный NRZI (инвертированный код NRZ) потенциальный код с инверсией при единице, код формируется путем инверсного состояния при поступлении на вход кодирующего устройства логической единицы, при поступлении логического нуля состояние потенциала не меняется. 0 – нет перепада уровня сигнала в начале битного интервала 1 – перепад уровня сигнала в начале интервала
Биполярный код AMI 0 – отсутствие сигнала 1 – положительный или отрицательный потенциал, обратный по отношению к потенциалу в предыдущий период
Манчестерский код 0 – переход с высокого потенциала на низкий в середине интервала 1 – переход с низкого потенциала на высокий в середине интервала
Потенциальный код 2B1Q Использует 4 уровня сигналов, значение уровня определяется значением пары битов данных.

Основными критериями сравнения различных способов кодирования данных на физическом уровне являются:

1) **Ширина спектра сигнала.** Чем меньше высокочастотных составляющих в сигнале, тем меньшая ширина полосы пропускания канала требуется для передачи. Важным также является отсутствие постоянной составляющей, т.е. гармоники с постоянными, не меняющимися параметрами. Появление такой гармоники приводит к наличию постоянного тока между приемником и передатчиком, что крайне нежелательно. Наконец, как мы уже отмечали, ширина спектра влияет на искажение формы сигнала. Чем шире спектр, тем сильнее искажения.

2) **Синхронизация между приемником и передатчиком.** Мы уже отмечали необходимость для приемника точно определять начало и конец битового интервала. На небольших расстояниях, например, внутри компьютера или между компьютером и его периферийными устройствами для этих целей используют дополнительную линию синхронизации. По этой линии специальная тактирующая схема (часы) выдает строго через определенные промежутки синхроимпульсы. Приход такого импульса для приемника означает начало битового интервала. В сетях, на больших расстояниях, это решение не годится по многим причинам. Другое решение этой проблемы состоит в создании так называемых самосинхронизирующихся кодов. Например, перепад в уровне сигнала (фронт) может служить хорошим признаком для приемника о начале битового интервала. Отсутствие фронта между битовыми интервалами существенно усложняет решение проблемы синхронизации, когда в соседних битовых последовательностях надо передать биты с одинаковыми значениями.

3) **Обнаружение ошибок.** Хотя методы обнаружения и исправления ошибок располагаются на канальном уровне, который находится над физическим уровнем, тем не менее, и на физическом уровне весьма полезно иметь такие возможности.

4) **Чувствительность к шуму.** За счет надлежащих ухищрений в схеме кодировки данных можно добиться высокой производительности при передаче даже при наличии очень высокого уровня шума.

5) **Стоимость и скорость.** Несмотря на постоянное удешевление цифровой аппаратуры общая тенденция такова, что увеличение сигнальной скорости с целью увеличения битовой ведет к удорожанию аппаратуры.

Все схемы кодирования делятся на потенциальные и импульсные. У потенциальных кодов значение бита передается удержанием потенциала сигнала на определенном уровне в течение битового интервала. У импульсных кодов это значение передается перепадом (фронтом) уровня сигнала. Направление перепада с низкого на высокий или с высокого на низкий уровень определяет значение бита.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 14».

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1.1 – Варианты заданий для исследований

Вариант №	$A, В$	$f, МГц$	$\varphi_0, рад$	$U, В$	$T, мс$	$\tau, мс$
1	1,1	1,1	$\pi/20$	3	1	0,25
2	1,2	1,2	$\pi/18$	5	2	0,5
3	1,3	1,3	$\pi/16$	10	2,5	0,5
4	1,4	1,4	$\pi/14$	15	4	1
5	1,5	1,5	$\pi/12$	7	5	1
6	1,6	1,6	$\pi/10$	25	3	1
7	1,7	1,7	$\pi/8$	10	4,5	1,5
8	1,8	1,8	$\pi/6$	15	1	0,25
9	1,9	1,9	$\pi/4$	6	1	0,2
10	2,0	2,0	$\pi/5$	5,5	2	0,4
11	1,1	2,1	$\pi/7$	8	2	1
12	1,2	2,2	$\pi/9$	4	1	0,5
13	1,3	2,3	$\pi/11$	2	0,5	0,1
14	1,4	2,4	$\pi/13$	1	0,45	0,15
15	1,5	0,9	$\pi/15$	1,5	0,4	0,1
16	1,6	0,8	$\pi/17$	6	1	0,25
17	1,7	0,75	$\pi/19$	3	2	0,5

<i>Вариант №</i>	<i>A, В</i>	<i>f, МГц</i>	<i>φ₀, рад</i>	<i>U, В</i>	<i>T, мс</i>	<i>τ, мс</i>
18	1,8	0,7	π/21	5	2,5	0,5
19	1,9	0,6	π/3,5	10	4	1
20	2,0	1,0	π/3	1,5	5	1

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

1.1) Смоделировать в программе «Mathcad» гармонический сигнал и провести исследование его характеристик.

1.2) Провести в программе «Mathcad» исследование операций преобразования гармонического сигнала, имеющих характер дифференцирования и интегрирования.

Повышенного уровня:

1.3) Смоделировать в программе «Mathcad» многотональный сигнал и провести исследование его характеристик и операций преобразования.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать в программе «Mathcad» гармонический сигнал и провести исследование его характеристик.

А) Постановка задачи:

Произвести математическое моделирование заданного гармонического сигнала в программе «Mathcad», воспользовавшись выражением

$$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (3)$$

Б) Исходные данные для моделирования: A – амплитуда гармонического колебания, f – линейная частота колебания, φ_0 – начальная фаза колебания – приведены по вариантам в таблице 1.1.

В) Алгоритм моделирования в системе «Mathcad» заключается в следующей последовательности действий (операций):

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные.

2) Ввести формулы для расчета периода T и циклической частоты ω колебания.

3) Ввести формулу, математически описывающую заданный гармонический сигнал.

4) Построить графическое изображение полученного гармонического сигнала $s(t)$. Для этого на панели инструментов «График» выбрать «график X-Y». Для наглядного отображения сигнала указать на оси абсцисс предельные значения времени от $-2T$ до $2T$.

Г) Провести исследования гармонического сигнала, выполнив для этого в следующие действия (операции):

1) Установить зависимости формы сигнала от характеризующих его параметров: амплитуды A , частоты f , периода T и начальной фазы φ_0 .

2) Определить энергетические характеристики сигнала в виде его действующего значения (то есть среднеквадратического значения за период) и постоянной составляющей (то есть среднего значения за период), которые вычисляются по соответствующим формулам:

$$S_d := \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T s(t)^2 dt} \quad \text{и} \quad S_o := \frac{1}{T} \cdot \int_0^T s(t) dt \quad (4).$$

4) Отобразить на графике действующее значение гармонического сигнала.

5) Определить первый три момента времени t , когда мгновенное значение сигнала будет равно нулю, т.е. найти корни уравнения $s(t) = 0$. Для этого необходимо воспользоваться встроенной функцией **root**. Ввести с помощью клавиатуры данную функцию в следующем виде - **root(s(q), q) =** , предварительно ввести переменная q , например, равную половине периода. Данная переменная будет использовать как начальное приближение при поиске корня.

6) Сделать выводы по результатам проведенного моделирования и исследования.

Задание 1.2. Провести в программе «Mathcad» исследование операций преобразования гармонического сигнала, имеющих характер дифференцирования и интегрирования.

А) Постановка задачи:

В радиоэлектронике часто требуется осуществлять преобразование сигнала, имеющее характер дифференцирования или интегрирования. На вход линейного устройства, осуществляющего дифференцирование, подается сигнал $s(t)$ с выхода должен сниматься сигнал вида:

$$S_{\text{вых}}(t) = \tau_0 \cdot \frac{ds(t)}{dt} . \quad (5)$$

В свою очередь, в интегрирующем устройстве связь между выходным $s(t)$ и входным сигналами имеет следующий вид:

$$S_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{\tau_0} \cdot \int_0^{\tau_0} s(t) dt . \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) τ_0 - постоянная величина, имеющая размерность времени и для исследуемого сигнала равная его периоду.

Б) Порядок исследования:

1) Ввести в рабочем окне программы формулу для расчета дифференциального преобразования гармонического сигнала:

$$s1(t) := T \cdot \frac{d}{dt} s(t) .$$

2) Построить графическое изображение преобразованного гармонического сигнала $s1(t)$. Для этого на панели инструментов «График» выбрать «график X-Y». Для наглядного отображения сигнала указать на оси абсцисс предельные значения времени от $-2T$ до $2T$.

3) Провести анализ полученного в процессе дифференциального преобразования (прохождения через линейное дифференцирующее устройство) выходного сигнала. Для этого определить фазовый сдвиг между сигналами на входе и выходе дифференциального преобразователя. Для этого ввести в программу следующее выражение:

$$\Delta\varphi := \frac{\text{root}(s(q), q) - \text{root}(s1(k), k)}{T} \cdot 360,$$

где k – переменная, используемая для начального приближения при поиске корня уравнения $s1(t) = 0$.

4) Ввести в рабочем окне программы формулу для расчета двойного дифференциального преобразования гармонического сигнала:

$$s2(t) := T^2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} s(t).$$

5) Построить графическое изображение преобразованного гармонического сигнала $s2(t)$. Для этого на панели инструментов «График» выбрать «график X-Y». Для наглядного отображения сигнала указать на оси абсцисс предельные значения времени от $-2T$ до $2T$.

6) Провести анализ полученного в процессе двойного дифференциального преобразования (прохождения через двойное линейное дифференцирующее устройство) выходного сигнала. Для этого определить фазовый сдвиг между сигналами на входе и выходе двойного дифференциального преобразователя. Для этого ввести в программу следующее выражение:

$$\Delta\varphi2 := \frac{\text{root}(s(q), q) - \text{root}(s2(p), p)}{T} \cdot 360,$$

где p – переменная, используемая для начального приближения при поиске корня уравнения $s2(t) = 0$.

7) Ввести в рабочем окне программы формулу для расчета интегрального преобразования гармонического сигнала:

$$S1(t) := \frac{1}{T} \cdot \int s(t) dt.$$

8) Построить графическое изображение преобразованного гармонического сигнала $S1(t)$. Для этого на панели инструментов «График» выбрать «график X-Y». Для наглядного отображения сигнала указать на оси абсцисс предельные значения времени от $-2T$ до $2T$.

9) Провести анализ полученного в процессе интегрального преобразования (прохождения через линейное интегрирующее устройство) выходного сигнала. Для этого определить фазовый сдвиг между сигналами на входе и выходе интегрального преобразователя. Для этого ввести в программу следующее выражение:

$$\Delta\phi := \frac{\text{root}(S1(u), u) - \text{root}(s(q), q)}{T} \cdot 360,$$

где u – переменная, используемая для начального приближения при поиске корня уравнения $S1(t) = 0$.

10) Ввести в рабочем окне программы формулу для расчета двойного интегрального преобразования гармонического сигнала:

$$S2(t) := \frac{1}{T^2} \int \int s(t) dt dt$$

11) Построить графическое изображение преобразованного гармонического сигнала $S2(t)$. Для этого на панели инструментов «График» выбрать «график X-Y». Для наглядного отображения сигнала указать на оси абсцисс предельные значения времени от $-2T$ до $2T$.

12) Провести анализ полученного в процессе двойного интегрального преобразования (прохождения через двойное линейное интегрирующее устройство) выходного сигнала. Для этого определить фазовый сдвиг между сигналами на входе и выходе двойного интегрального преобразователя. Для этого ввести в программу следующее выражение:

$$\Delta\phi2 := \frac{\text{root}(S2(g), g) - \text{root}(s(q), q)}{T} \cdot 360$$

где g – переменная, используемая для начального приближения при поиске корня уравнения $S2(t) = 0$.

13) Сделать выводы по результатам проведенного исследования.

Задание 1.3. (повышенного уровня). Смоделировать в программе «Mathcad» многотональный сигнал и провести исследование его характеристик и операций преобразования.

А) Постановка задачи:

Самостоятельно произвести в программе «Mathcad» моделирование и исследование трехтонального сигнала звукового диапазона частот, воспользовавшись выражением (2). При этом для нечетных вариантов сигнал должен состоять из первой f , третьей $3f$ и пятой $5f$ гармоник, а для четных вариантов – из первой f , второй $2f$ и четвертой $4f$ гармоник.

Б) Исходные данные для моделирования: A – амплитуда гармонического колебания, f – линейная частота колебания, φ_0 – начальная фаза колебания – приведены по вариантам в таблице 1.1.

Параметры гармоник:

- значение частоты f должно быть уменьшено в 1000 раз.
- амплитуды гармоник – соответственно равны A , $0.75A$ и $0.5A$;
- начальные фазы гармоник равны 0.

В) Алгоритм моделирования в системе «Mathcad» заключается в следующей последовательности действий (операций):

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные и необходимые формулы для промежуточных вычислений.

2) Ввести формулу, математически описывающую заданный трех тональный сигнал.

3) Построить графическое изображение полученного сигнала $s(t)$.

Г) Провести исследования многотонального сигнала, выполнив для этого в следующие действия (операции):

1) Определить энергетические характеристики сигнала в виде его действующего значения (то есть среднеквадратического значения за период) и постоянной составляющей (то есть среднего значения за период). Отобразить на графике действующее значение гармонического сигнала.

2) Определить период многотонального сигнала, т.е. временной интервал от 0 до того момента времени t , когда сигнал начнет повторяться.

3) Смоделировать процедуру дифференциального преобразования сигнала и провести анализ выходного сигнала.

4) Смоделировать процедуру интегрального преобразования сигнала и провести анализ выходного сигнала.

5) Сделать выводы по результатам проведенного моделирования и исследования.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

Содержание практической работы, выполняемой студентами по второму учебному вопросу

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 14».

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 2.1 – Варианты заданий для исследований

Вариант №	$A, В$	$f, МГц$	$\varphi_0, рад$	$U, В$	$T, мс$	$\tau, мс$
1	1,1	1,1	$\pi/20$	3	1	0,25
2	1,2	1,2	$\pi/18$	5	2	0,5
3	1,3	1,3	$\pi/16$	10	2,5	0,5
4	1,4	1,4	$\pi/14$	15	4	1
5	1,5	1,5	$\pi/12$	7	5	1
6	1,6	1,6	$\pi/10$	25	3	1
7	1,7	1,7	$\pi/8$	10	4,5	1,5
8	1,8	1,8	$\pi/6$	15	1	0,25
9	1,9	1,9	$\pi/4$	6	1	0,2
10	2,0	2,0	$\pi/5$	5,5	2	0,4
11	1,1	2,1	$\pi/7$	8	2	1
12	1,2	2,2	$\pi/9$	4	1	0,5
13	1,3	2,3	$\pi/11$	2	0,5	0,1
14	1,4	2,4	$\pi/13$	1	0,45	0,15
15	1,5	0,9	$\pi/15$	1,5	0,4	0,1
16	1,6	0,8	$\pi/17$	6	1	0,25
17	1,7	0,75	$\pi/19$	3	2	0,5

Вариант №	A, B	$f, \text{МГц}$	$\varphi_0, \text{рад}$	U, B	$T, \text{мс}$	$\tau, \text{мс}$
18	1,8	0,7	$\pi/21$	5	2,5	0,5
19	1,9	0,6	$\pi/3,5$	10	4	1
20	2,0	1,0	$\pi/3$	1,5	5	1

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

2.1) Смоделировать в программе «Mathcad» последовательность прямоугольных импульсов из гармонических составляющих.

2.2) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование последовательности прямоугольных импульсов, сформированных из гармонических составляющих.

2.3) Провести в программе «Electronics Workbench» моделирование и исследование кодирующего устройства, представляющего данные в цифровой код NRZ для передачи по каналу связи.

Повышенного уровня:

2.4) Провести в программе «Electronics Workbench» исследование амплитудно-частотных и фазово-частотных спектров последовательности прямоугольных импульсов.

Задание 2.1. Смоделировать в программе «Mathcad» последовательность прямоугольных импульсов из гармонических составляющих.

А) Постановка задачи:

Последовательность цифровых данных (битовую последовательность) упрощенно можно представить в виде последовательности прямоугольных импульсов с меняющейся скважностью, например представленной на рис. 2.

Задача – путем математического моделирования сформировать из заданного количества гармоник последовательность прямоугольных импульсов с заданными параметрами.

Б) Исходные данные для моделирования: U – амплитуда импульса, T – период следования импульсов, τ – длительность импульса – приведены по вариантам в таблице 2.1.

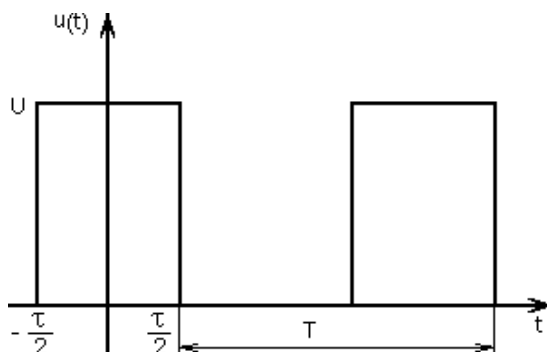


Рис. 2 – Периодическая последовательность прямоугольных импульсов

В) Алгоритм моделирования в системе «Mathcad» заключается в следующей последовательности действий (операций):

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные согласно варианту задания: амплитуда импульса U , длительность τ , период следования T .

2) Ввести формулу для расчета скважности импульсов:

$$q = \frac{T}{\tau}.$$

3) Ввести цикл, задающий число гармоник: $n = 1 \dots 10$.

4) Ввести формулы для расчета линейной и циклической частоты гармоник:

$$f(n) = \frac{n}{T} \text{ и } \omega(n) = 2\pi \cdot f(n).$$

5) Набрать формулы для расчета коэффициентов Фурье:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{\tau} U dt = \frac{2 \cdot U \cdot \tau}{T} = \frac{2U}{q},$$

$$a(n) = \frac{2}{T} \int_0^{\tau} U \cos(n\omega \cdot t) dt,$$

$$b(n) = \frac{2}{T} \int_0^{\tau} U \sin(n\omega \cdot t) dt.$$

6) Набрать формулы для расчета амплитуд и начальных фаз гармоник:

$$U_0 = \frac{a_0}{2}, \quad U(n) = \sqrt{a(n)^2 + b(n)^2},$$

$$\psi(n) = \frac{\arctg(a(n)/b(n))}{2\pi} \cdot 360^\circ.$$

7) Результаты расчетов параметров гармоник, формирующих последовательность прямоугольных импульсов, занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов

n	1	2	3	4	...	...	10
$a(n)$							
$b(n)$							
$f(n)$, Гц							
$U(n)$, В							
$\psi(n)+360$, град.							

7) Сделать выводы по результатам проведенного моделирования.

Задание 2.2. Провести в программе «Electronics Workbench» исследование последовательность прямоугольных импульсов, сформированных из гармонических составляющих.

А) Постановка задачи:

В программе Electronics Workbench собрать схему моделирования последовательности прямоугольных импульсов из совокупности гармонических составляющих. Схема приведена на рис. 3.

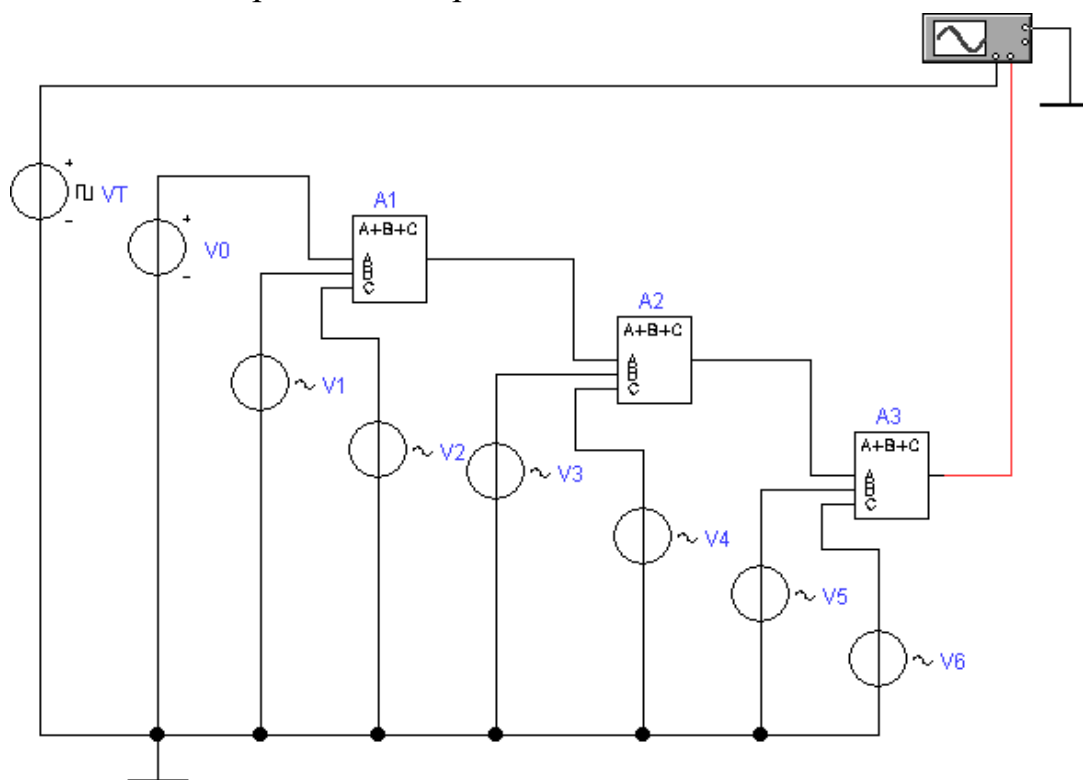


Рис. 3 – Схема моделирования последовательности прямоугольных импульсов из совокупности гармонических составляющих

Б) Исходные элементы и параметры для моделирования.

Исходными элементами для моделирования являются: источник постоянного напряжения $V0$, источники гармонических колебаний $V1 - V6$, источник прямоугольных импульсов VT , аналоговые сумматоры $A1 - A3$.

Исходные параметры для моделирования: линейные частоты $f(n)$ гармоник, амплитуды $U(n)$ и начальные фазы $\psi(n) + 360^\circ$ гармоник, рассчитанные в задании 1.4.

Отображение образцовой и сформированной последовательности производится с помощью осциллографа.

Г) Порядок исследования:

1) Установить параметры источника постоянного напряжения $V0$ и источников гармонических колебаний $V1 - V6$ в соответствии с рассчитанными значениями, записанными в таблице 1.2.

2) В генераторе прямоугольных импульсов VT установить напряжение, равное амплитуде импульсов U , значение частоты, равной основной частоте $f(1)$, длительность импульсов в процентах, равную $100/q \%$.

3) Открыть осциллограф, настроив его для отображения по первому каналу последовательности импульсов от образцового генератора VT , а по второму каналу – последовательности импульсов, сформированной за счет суммирования

гармонических составляющих ряда Фурье. Занести временные диаграммы последовательности импульсов в отчет по лабораторной работе. Сравнить и сделать выводы.

4) Отобразить и измерить спектры образцовой и сформированной последовательностей импульсов. Для этого выполнить следующие операции:

- в меню «Схемы (Circuit)» выбрать подменю «Параметры схемы (Schematic Options)», в открывшемся меню установить опцию «Показать узлы (Show nodes)»;

- в меню «Анализ (Analysis)» выбрать подменю «Фурье анализ (Fourier Analysis)», в открывшемся меню установить опции: выходной узел (Output node), основная частота (Fundamental frequency) и число гармоник (Number harmonics) – 20, установить опцию отображения фазово-частотного спектра (Display phase), затем запустить эмулятор спектроанализатора, нажав кнопку Simulate;

- измерить амплитудно-частотный и фазово-частотный спектры с помощью специальных курсоров, нажав для их вывода на экран кнопку  Toggle cursors (переключатель курсоров);

- отобразить спектры в отчете;

- сравнить оба спектра и сделать выводы.

5) Сделать выводы по результатам проведенного моделирования и исследования.

Задание 2.3. (повышенного уровня). Провести в программе «Electronics Workbench» исследование амплитудно-частотных и фазово-частотных спектров последовательности прямоугольных импульсов.

А) Порядок исследования:

1) В программе Electronics Workbench собрать схему исследования, приведенную на рис. 4, которая содержит функциональный генератор и осциллограф.

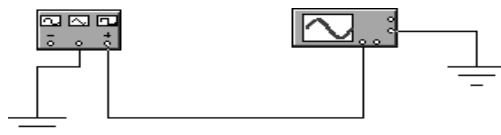


Рис. 4 – Схема исследования спектров

2) Функциональный генератор установить в режим генерации прямоугольных импульсов с частотой 1 КГц, скважностью 2 (50%) и амплитудой 1 В.

3) Запустив эмулятор EWB, получить с помощью осциллографа временную диаграмму последовательности импульсов. Измерить амплитуду, период и длительность импульсов. Результаты измерения и временную диаграмму занести в отчет.

4) Запустить Фурье-анализ последовательности импульсов и отобразить амплитудно-частотный и фазово-частотный спектры последовательности прямоугольных импульсов, содержащие 20 гармоник. Измерить амплитуду, фазу и частоты первых 10-и гармоник. Результаты измерения и спектры занести в отчет.

5) Проанализировать влияние величины периода следования импульсов на внешний вид спектров, для этого сначала увеличить период следования импульсов в 2 и 4 раза, а затем уменьшить – в 2 и 4 раза. Изобразить полученные спектры в отчете и сделать выводы.

6) Проанализировать влияние величины скважности импульсов на внешний вид спектров, для этого, последовательно устанавливая скважность импульсов, равную 3 (33%), 4 (25%) и 10 (10%), изобразить полученные спектры в отчете и сделать выводы.

7) Сделать выводы по результатам проведенного исследования.

Задание 2.4. Провести в программе «*Electronics Workbench*» моделирование и исследование кодирующего устройства, представляющего данные в цифровой код NRZ для передачи по каналу связи.

А) Постановка задачи:

В программе «*Electronics Workbench*» создать схемотехническую модель кодирующего устройства (кодера), преобразующего цифровые данные (кодовые слова) в двухуровневые цифровые сигналы в виде униполярного кода. При этом высокий потенциал должен соответствовать логической единице, а низкий потенциал – логическому 0.

Для кодирования использовать следующие форматы кодов:

1) Формат без возвращения к нулю (код **NRZ**). В этом формате не меняется уровень единичного бита передаваемого в пределах такта. Положительный перепад означает переход из 0 к 1 в исходном коде, отрицательный – от 1 к 0. Отсутствие перепадов показывает, что значения предыдущего и последующего битов равны.

2) Формат без возвращения к нулю с перепадом при передаче 1 (код **NRZI**), является разновидностью формата БВН. В этом формате перепады сигнала формируются при передаче 1, при передаче 0 уровень сигнала не меняется.

Пример кодирования данными кодами представлен на рис. 5.

Пример схемотехнической модели заданного кодирующего устройства в программе «*Electronics Workbench*» представлен на рис. 6.

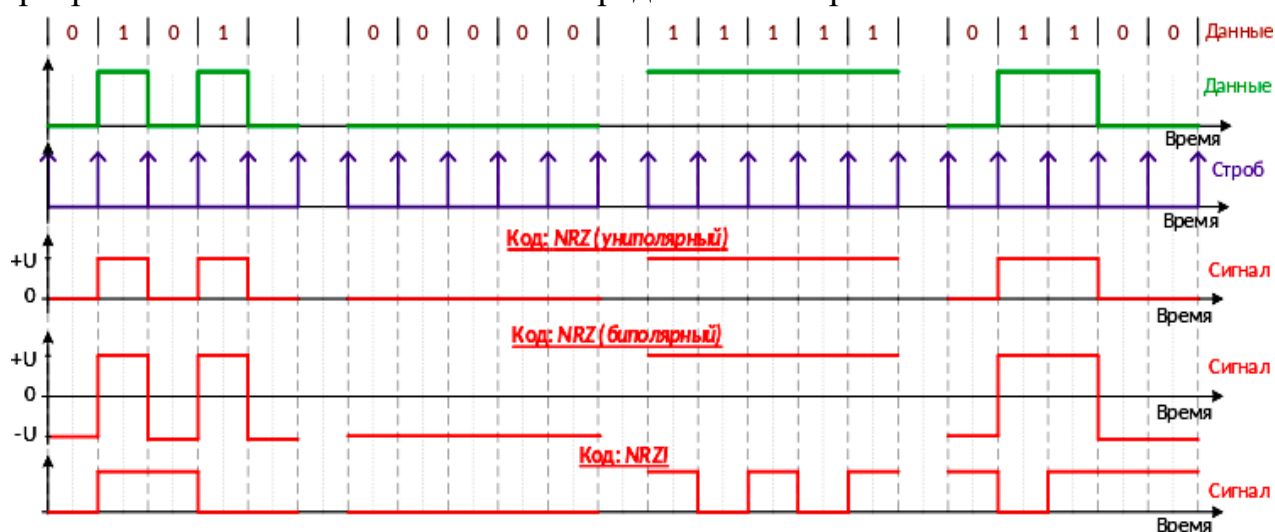


Рис. 5 – Кодирование кодами NRZ

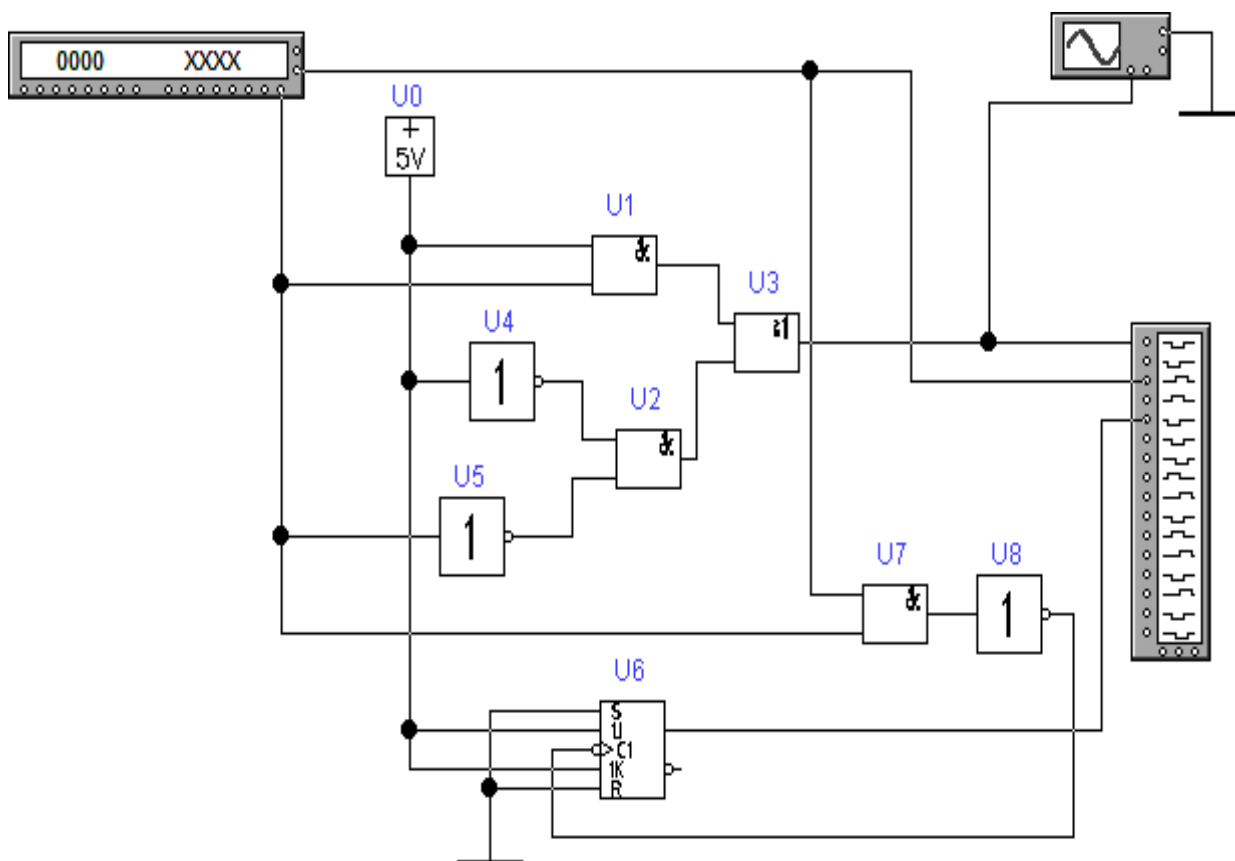


Рис. 6 – Схемотехническая модель кодера **NRZ**

Б) Исходные элементы и параметры для моделирования и исследования.

Исходными элементами для моделирования являются:

- генератор слова (Word Generator) – источник цифровых данных;
- источник высокого потенциала – элемент U0, источник низкого потенциала – «Земля»;
- для построения кодера **NRZ** – 2-х входовые логические умножители (элементы U1, U2), 2-х входовый логический сумматор (элемент U3), инверторы (элементы U4, U5);
- для построения кодера **NRZI** – JK-триггер, работающий как Т-триггер (элемент U6), 2-х входовый логический умножитель (элемент U7), инвертор (элемент U8).

Для отображения цифровых данных и цифровых сигналов использовать логический анализатор (Logic Analyzer) и осциллограф.

Исходные данные для исследования: кодовые слова по вариантам приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3– Варианты заданий кодовых слов для исследований

Вариант №	Кодовое слово	Вариант №	Кодовое слово
1.	0101 1010 0110 0000	2.	0011 0110 0011 0111
3.	0100 1110 0101 1011	4.	0010 1011 0011 1111
5.	0101 1101 0110 0010	6.	0100 0001 0010 1100

7.	0101 1110 0101 0010	8.	0100 0011 0011 0101
9.	0101 1000 0101 1001	10.	0011 0100 0011 0011
11.	0100 1010 0101 1100	12.	0011 0001 0011 0000
13.	0100 1101 0100 1111	14.	0010 1111 0010 1101
15.	0101 0000 0101 0001	16.	0011 1100 0010 1010
17.	0101 0011 0101 0100	18.	0011 1001 0011 1000
19.	0101 0101 0110 0011	20.	0011 1110 0100 0010

В) Порядок моделирования.

- 1) Собрать схему исследования кодера, изображенную на рис. 6.
- 2) Для преобразования JK-триггера в счетный Т-триггер, необходимо на входы J и K подать логические единицы. Убедиться в этом.
- 3) Настроить генератор слова (Word Generator). Для этого запрограммировать его первые ячейки с адресом от 0000 по 000F таким образом, чтобы в младших разрядах ячеек было записано следующее кодовое слово – 0101 0101 0101 0101. Установить частоты внутреннего генератора синхроимпульсов на частоту 1 кГц. Установить генератор слова в пошаговый режим, нажав кнопку Step.
- 4) Убедиться в том, что синхроимпульсы (Data ready), формируемые генератором слова, поступают на тактовый (счетный) вход триггера, а для отображения на 3-й вход логического анализатора. При этом к 1-му входу логического анализатора должен быть подсоединен выход кодера **NRZ**, а к 5-му входу - выход кодера **NRZI**.
- 5) Проверить работоспособность собранной схемы. Для этого, включив симулятор EWB, нажимая на кнопку Step генератора слова, получить временные диаграммы на логическом анализаторе, приведенные на рис. 7.
- 6) Сделать выводы по результатам проведенного моделирования, в том числе о сложности или простоте смоделированных способов кодирования.

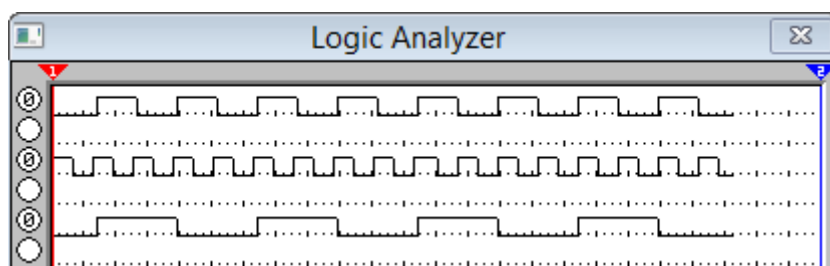


Рис. 7 – Пример правильной работы кодера **NRZ**

Г) Порядок исследования.

- 1) Записать в генератор слова (Word Generator) кодовое слово в соответствии с вариантом.
- 2) Запустив генератор слова в пошаговом режиме, получить на логическом анализаторе временные диаграммы цифровых сигналов в формате кодов **NRZ** и **NRZI**, отобразив их в отчете по лабораторной работе.

3) Определить длительность τ единичного импульса (единичного бита) для кода **NRZ**, воспользовавшись курсорами (красная и синяя линии) логического анализатора, результат занести в отчет по ЛР.

4) Определить величины постоянной составляющей обоих цифровых сигналов при передаче в канале связи кодового слова. Для этого для кода **NRZ** использовать приведенную формулу

$$S_0 = \frac{E_1 \cdot \tau \cdot N_1}{T_{\text{кк}}} = \frac{E_1 \cdot \tau \cdot N_1}{16\tau} = \frac{E_1 \cdot N_1}{16} = \frac{5}{16} N_1,$$

где E_1 – уровень логической единицы, В; N_1 – число логических единиц; $T_{\text{кк}}$ – длительность кодового слова.

Для кода **NRZI** необходимо с помощью курсоров логического анализатора измерить длительность кодового слова $T_{\text{кк}}$ и суммарную длительность единич-

ных импульсов $\sum_{i=1}^n \tau I_i$, после чего рассчитать уровень постоянной составляющей по формуле:

$$S_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau I_i}{T_{\text{кк}}} E_1.$$

5) Ответить на вопрос, что будет с постоянной составляющей в канале связи при увеличении длины кодового слова.

6) Записать в генератор слова (Word Generator) кодовое слово 0000 0000 1111 1111.

7) Запустив генератор слова в пошаговом режиме, получить на логическом анализаторе временные диаграммы цифровых сигналов в формате кодов **NRZ** и **NRZI**, отобразив их в отчете по лабораторной работе.

8) Провести анализ полученных временных диаграмм цифровых сигналов. Для этого необходимо найти ответы на следующие вопросы:

- в какой момент времени приемник канала связи определит начало такого кодового слова;
- что нужно передавать для правильного определения начала и конца кодового слова;
- как определить момент поступления первых восьми нулей или вообще любого бита кодового слова;
- что нужно использовать для фиксации моментов прихода этих нулей или любого бита кодового слова;
- сделать выводы, о том, как исследуемые коды защищены от долгих последовательностей логических нулей или единиц.

8) Сделать выводы по результатам проведенного исследования.

1.5. Составить отчет о проделанной работе в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схемотехнические модели устройств;
- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К. М. Сагдеев, В. И. Петренко, А. Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ТЕМА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ

Занятие 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОСТЫХ СИГНАЛОВ В ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование процесса распространения простых сигналов в физической среде.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

– применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.

– проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике

– моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

– навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности

– способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.

– навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

–ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;

–электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1.	Моделирование и исследование процесса распространения простых сигналов в физической среде.	75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
1.	Моделирование и исследование процесса распространения простых сигналов в физической среде.	50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОСТЫХ СИГНАЛОВ В ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ.

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Для передачи информации (данных) в виде сигналов используются различные физические среды (оптическое волокно, витая пара, коаксиальный кабель, радиоканал, канал инфракрасного излучения), осуществляющие перенос информации (данных) за счет различных физических явлений и процессов.

Для упрощения анализа реальных физических сред принято абстрагироваться от физических процессов, протекающих в них. Для этого физические процессы приближенно заменяют некоторой схемотехнической моделью (схемой замещения), состоящей из совокупности идеализированных элементов, соединенных идеальными проводниками. Система уравнений, описывающих свойства такой модели, является математической моделью электрической цепи, обладающей свойствами и характеристиками физической среды.

Из радиотехники известно, что любую физическую среду можно представить в виде простой схемы замещения, представляющей собой пассивную линейную простую электрическую цепь первого порядка, т.е. содержащей один реактивный элемент. Такая простая цепь не имеет источников напряжения и токов, обладает свойством линейного преобразования сигналов, содержит помимо активного сопротивления (резистора) или емкость (конденсатор) или индуктивность (катушку индуктивности).

Кроме того, электрические цепи первого порядка обладают свойством инерционности, т.е. быстрое изменение приложенного к цепи напряжения независимого источника приводит к плавным изменениям напряжения на емкости или тока в индуктивности, тогда как изменение тока на емкости и напряжения на индуктивности может происходить скачкообразно.

Анализ инерционных свойств реальных физических сред позволяет утверждать, что любую физическую среду упрощенно можно представить в виде интегрирующей цепи.

Интегрирующая цепь – электрическая цепь, в которой выходное напряжение или ток пропорциональны интегралу по времени от входного напряжения или тока, например:

$$U_{\text{вых}}(t) = K \int U_{\text{вх}}(t) dt. \quad (1.1)$$

В основе действия интегрирующей цепи лежит накопление заряда на конденсаторе с ёмкостью C под действием приложенного тока (см. рис. 8, а) или накопление магнитного потока в катушке с индуктивностью L под действием приложенного напряжения (см. рис. 8, б), т.е.:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_c dt, \quad i_L = \frac{1}{L} \int U_L dt. \quad (1.2)$$

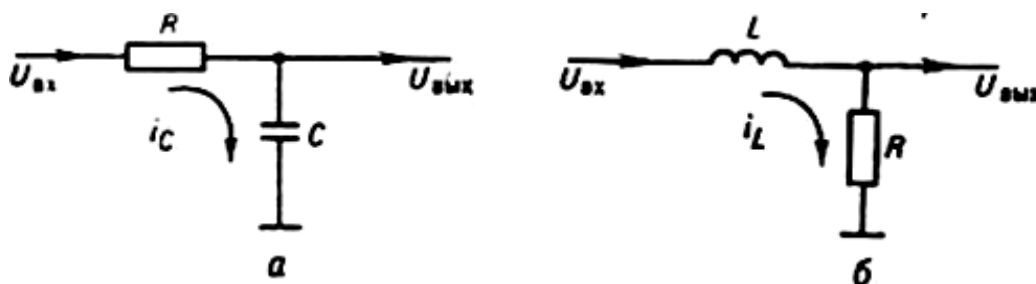


Рис. 1 – Интегрирующие цепи: а – RC цепь, б – RL цепь

С учетом того, что ток заряда конденсатора в RC цепи равен $i_C = U_{\text{вх}}/R$, а в RL цепи напряжение на катушке и резисторе соответственно равны $U_{\text{вх}}$ и $i_L R$, в результате получаем

$$U_{\text{вых}}(t) = U_c(t) = \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{\tau} \int U_{\text{вх}}(t) dt, \quad (1.3)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = U_R(t) = \frac{R}{L} \int U_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{\tau} \int U_{\text{вх}}(t) dt, \quad (1.4)$$

где $\tau = RC$ – произведение, характеризующее скорость заряда конденсатора, называемое постоянной времени RC цепи, а $\tau = L/R$ – отношение, характеризующее скорость изменения тока в цепи катушки за счет явления самоиндукции, называемое постоянной времени RL цепи.

В интегрирующих цепях ток заряда конденсатора или ток в катушке определяется разностью входного и выходного напряжений $[i=(U_{вх} - U_{вых})/R]$ поэтому интегрирование входного напряжения выполняется приближённо и тем точнее, чем меньше выходное напряжение по сравнению с входным. Последнее условие выполняется, если постоянная времени τ много больше интервала времени, по которому происходит интегрирование.

Для правильного интегрирования импульсного входного сигнала необходимо, чтобы τ была много больше длительности импульса T (рис. 2).

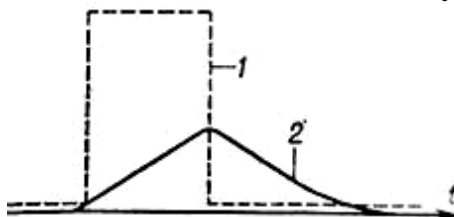


Рис. 2 – Выходное напряжение интегрирующей цепи (2) при входном воздействии в виде прямоугольного импульса (1)

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронных схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15».

1.1. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1.1 – Варианты заданий для моделирования и исследований

Вариант №	$E, В$	$f, МГц$	$R, Ом$	$C, нФ$	$L, мкГ$
1	1,1	1,1	5	21	0,9
2	1,2	1,2	6	22	0,8
3	1,3	1,3	7	23	0,7
4	1,4	1,4	8	24	0,6
5	1,5	1,5	9	25	0,5
6	1,6	1,6	10	26	1
7	1,7	1,7	5	19	0,9
8	1,8	1,8	6	18	0,8
9	1,9	1,9	7	17	0,7
10	2,0	2,0	8	16	0,6
11	1,1	2,1	9	15	0,9
12	1,2	2,2	10	14	0,8
13	1,3	2,3	5	13	0,7
14	1,4	2,4	6	12	0,6
15	1,5	2,5	7	11	0,5
16	1,6	2,6	8	10	1
17	1,7	2,7	9	9	0,9

Вариант №	$E, В$	$f, МГц$	$R, Ом$	$C, нФ$	$L, мкГ$
18	1,8	2,8	10	8	0,8
19	1,9	2,9	5	7	0,7
20	2,0	3,0	6	6	0,6

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

1.1. Провести исследование в программах «Mathcad» и «Electronics Workbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RC-цепи.

1.2. Провести исследование в программах «Mathcad» и «Electronics Workbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RL –цепи.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Провести исследование в программах «Mathcad» и «Electronics Workbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RC-цепи.

А) Постановка задачи.

В программе «Mathcad» разработать математическую модель физической среды передачи информации (данных), представляющую собой интегрирующую RC-цепь, и оценить ее передаточные свойства.

В программе «Electronics Workbench» разработать схемотехническую модель физической среды передачи информации (данных) в виде интегрирующей RC-цепи, и оценить ее инерционные и передаточные свойства при прохождении гармонического и цифрового сигналов.

Пример схемы интегрирующей RC-цепи представлен на рис. 10. Источником гармонического сигнала является – источник переменного напряжения $V1$, а цифрового сигнала – источник $V2$, формирующий сигнал, называемый меандром, т.е. последовательность импульсов со скважностью 2.

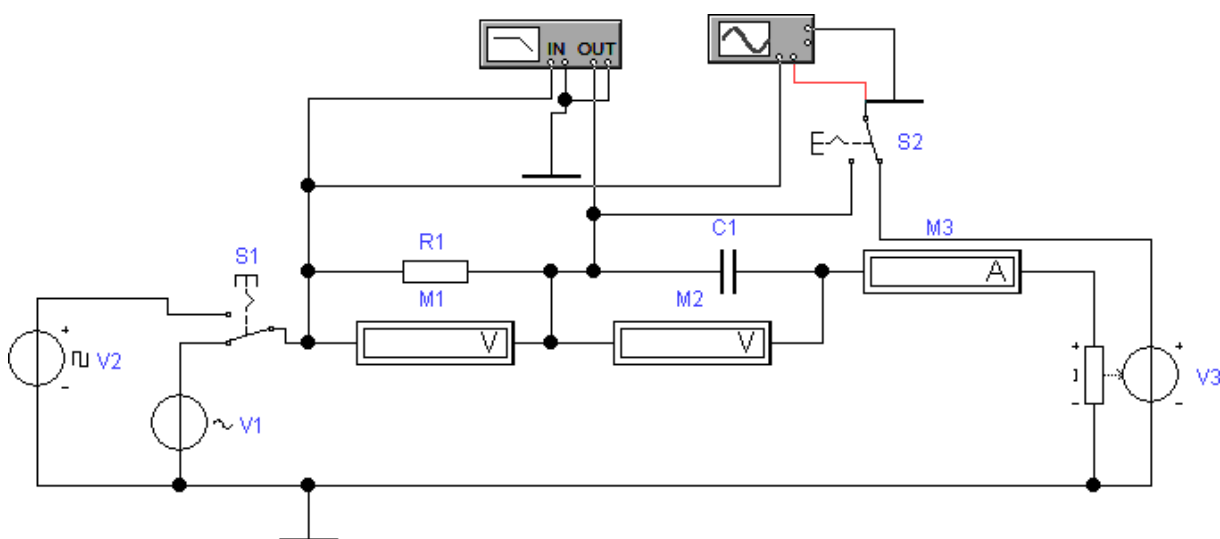


Рис. 3 – Интегрирующая RC цепь

Исходными данными для моделирования являются заданные по вариантам (см. табл. 1.1) значения параметров:

- источника сигналов – E – амплитуда импульсов для цифрового сигнала или действующее значение напряжения для гармонического сигнала, f частота,
- электрической цепи – R и C .

Для отображения результатов моделирования в схемотехнической модели использовать вольтметры $M1$ и $M2$, амперметр $M3$, осциллограф и графопостроитель (Bode plotter) или иначе построитель передаточных характеристик в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазово-частотной характеристики (ФЧХ). Для измерения электрического тока с помощью осциллографа в схему введен источник напряжения, управляемый током $V3$, имеющим сопротивление 1 Ом. В результате значение измеряемого осциллографом напряжения будет равна силе тока, протекающего по цепи.

Б) Порядок моделирования и исследования.

1) Для разработки математической модели в программе «Mathcad» выполнить следующие действия (операции): ввести исходные данные – E, f, R и C ; ввести формулы для расчета рассчитать следующих параметров и характеристик:

- постоянная времени цепи - $\tau := R \cdot C$;

- емкостное реактивное сопротивление

$$X_C := \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} ;$$

- модуль полного комплексного сопротивления цепи Z

$$Z := \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right)^2} ;$$

- действующее значение силы тока в цепи

$$I := \frac{E}{Z} ;$$

- действующее значение падений напряжения на резисторе U_R и конденсаторе U_C

$$U_R := I \cdot R \quad \text{и} \quad U_C := I \cdot X_C ;$$

- фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением -

$$\psi := 90 - \operatorname{atan} \left[\frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right)}{R} \right] \cdot \frac{360}{2\pi} ;$$

- цикл частот для построения переходных характеристик – а $f1 := 0,1 \cdot 10^3 \dots 100 \cdot 10^6$;

- амплитудно-частотной (АЧХ) и фазово-частотной (ФЧХ) характеристик

$$K(f1) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f1)^2 \tau^2}} \quad \text{и} \quad \phi(f1) = - \frac{\operatorname{arctg}(2\pi f1 \tau) \cdot 360^\circ}{2\pi} .$$

2) Отобразить в отчете по лабораторной работе графики АЧХ и ФЧХ интегрирующей RC-цепи, установив ось абсцисс (частоты) в логарифмическом масштабе. Пример АЧХ приведен на рис. 11.

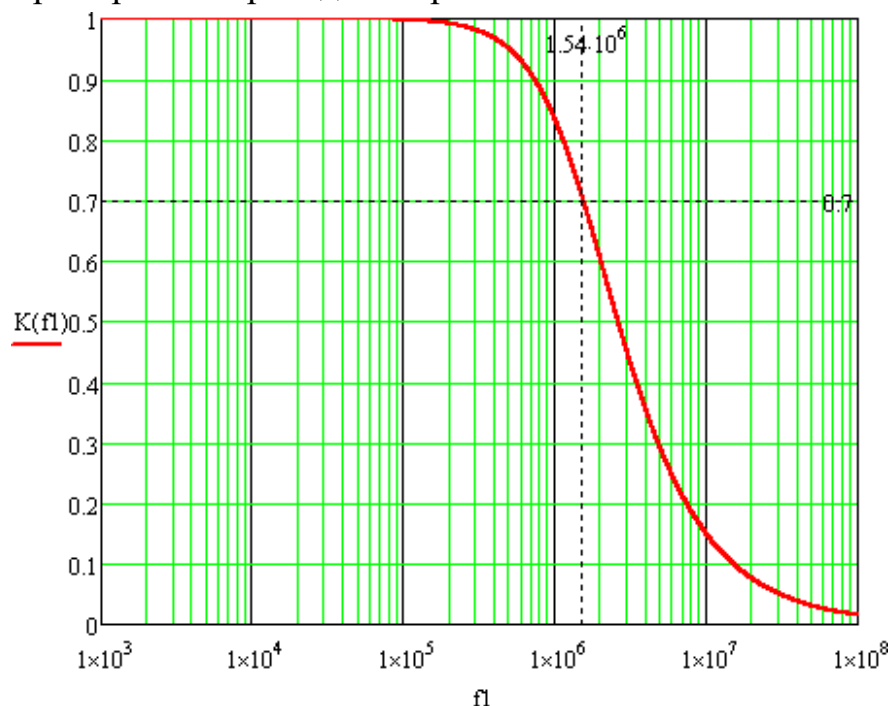


Рис. 4 – АЧХ интегрирующей RC-цепи

3) Определить с помощью графика АЧХ полосу пропускания смоделированной интегрирующей RC-цепи на уровне 0,707 и оценить селективные свойства данной цепи.

4) Определить с помощью графика ФЧХ полосу пропускания смоделированной интегрирующей RC-цепи на уровне 45° и оценить селективные свойства данной цепи.

5) Для схемотехнического моделирования запустить программу «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую интегрирующую RC цепь, приведенную на рис. 10. Установить заданные согласно варианту значения параметров R , C , E и f .

6) Провести исследования процесса распространения гармонического сигнала через смоделированную физическую среду. Для этого подать на вход интегрирующей RC цепи гармоническое воздействие, переведя переключатель S1 в нижнее положение. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ цепи при исходных значениях C , отобразить их в отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ определить полосу пропускания цепи (на уровне -3 дБ) и ее характер.

7) Определить фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением цепи. Для этого курсоры осциллографа навести на мгновенные значения напряжений, с одинаковыми текущими фазами, например на максимумы (амплитуды) колебаний, затем измерить временную задержку Δt между входным и выходным сигналом в окошке T2 – T1. Рассчитать сдвиг фаз по формуле

$$\psi = 360 \cdot \Delta\tau \cdot f = 360 \cdot (T2 - T1) \cdot f, \text{ град.}$$

8) Провести исследования процесса распространения цифрового сигнала через смоделированную физическую среду. Для этого подать на вход интегрирующей RC цепи импульсное воздействие, установив переключатель S1 перевести в верхнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе U_R и конденсаторе U_C , а также тока I в цепи, результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Экспериментальные данные для интегрирующей RC цепи

Воздействие	Исходные параметры	Экспериментальные данные				
		$I, \text{ мА}$	$U_R, \text{ мВ}$	$U_C, \text{ мВ}$		
импульсное	0,5 С					
	С					
	2 С					

9) С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и напряжения на конденсаторе, для этого переключатель S2 должен находиться в левом положении. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете. Проанализировать полученные осциллограммы, установив, чем временное представление выходного сигнала отличается от входного сигнала, а также что привело к искажению вида сигнала. По осциллограмме определить длительность переходных процессов и сравнить ее с длительностью импульса.

10) С помощью Фурье анализатора построить спектры входного и выходного сигнала. Для этого в Фурье анализаторе установить с начало узел на входе цепи, а затем – на выходе цепи, основную частоту, равную заданной частоте f , число гармоник – 20.

11) Проанализировать полученные спектры, установив, чем спектр выходного сигнала отличается от спектра входного сигнала, а также что привело к изменению спектра.

12) С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока в цепи, для этого переключатель S2 должен находиться в правом положении. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете.

13) Повторить пункты 8) – 12) для других значений емкости цепи, равных 0,5С и 2С.

14) Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в цепи, установить, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в цепи.

Задание 1.2. Провести исследование в программах «Mathcad» и «Electronics Workbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RL-цепи.

А) Постановка задачи.

В программе «Mathcad» разработать математическую модель физической среды передачи информации (данных), представляющую собой интегрирующую RL-цепь, и оценить ее передаточные свойства.

В программе «Electronics Workbench» разработать схемотехническую модель физической среды передачи информации (данных) в виде интегрирующей RC-цепи, и оценить ее инерционные и передаточные свойства при прохождении гармонического и цифрового сигналов.

Пример схемы интегрирующей RL-цепи представлен на рис. 5. Источником гармонического сигнала является – источник переменного напряжения $V1$, а цифрового сигнала – источник $V2$, формирующий сигнал, называемый меандром, т.е. последовательность импульсов со скважностью 2.

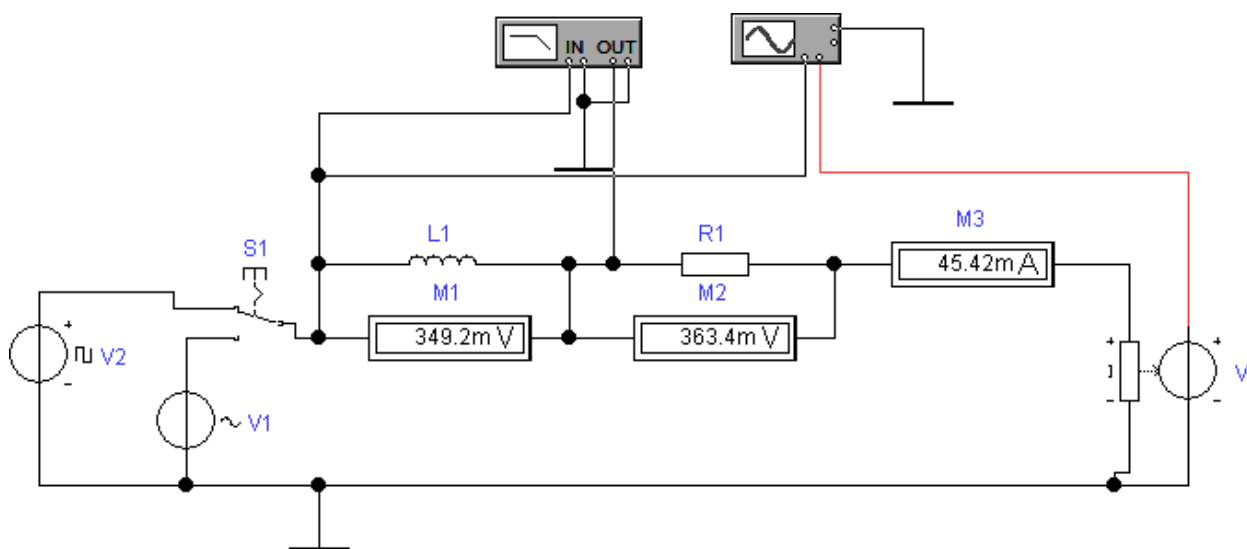


Рис. 5 – Интегрирующая RC цепь

Исходными данными для моделирования являются заданные по вариантам (см. табл. 2.1) значения параметров:

- источника сигналов – E – амплитуда импульсов для цифрового сигнала или действующее значение напряжения для гармонического сигнала, f частота,
- электрической цепи – R и L

Для отображения результатов моделирования в схемотехнической модели использовать вольтметры $M1$ и $M2$, амперметр $M3$, осциллограф и графопостроитель (Bode plotter) или иначе построитель передаточных характеристик в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазово-частотной характеристики (ФЧХ). Для измерения электрического тока с помощью осциллографа в схему введен источник напряжения, управляемый током $V3$, имеющим сопротивление 1 Ом. В результате значение измеряемого осциллографом напряжения будет равна силе тока, протекающего по цепи.

Б) Порядок моделирования и исследования.

1) Для разработки математической модели в программе «Mathcad» выполнить следующие действия (операции): ввести исходные данные – E, f, R и L ; ввести формулы для расчета рассчитать следующих параметров и характеристик:

$$\tau := \frac{L}{R}$$

- постоянная времени цепи - τ ;
- емкостное реактивное сопротивление

$$X_L := 2\pi \cdot f \cdot L ;$$

– модуль полного комплексного сопротивления цепи Z

$$Z := \sqrt{R^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2} ;$$

– действующее значение силы тока в цепи

$$I := \frac{E}{Z} ;$$

– действующее значение падений напряжения на резисторе U_R и конденсаторе U_C

$$U_R := I \cdot R \text{ и } U_L := I \cdot X_L ;$$

– фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением -

$$\psi := \operatorname{atan} \left[\frac{(2\pi \cdot f \cdot L)}{R} \right] \cdot \frac{360}{2\pi} ;$$

– цикл частот для построения переходных характеристик – а $f1 := 0,1 \cdot 10^3 \dots 100 \cdot 10^6$;

– амплитудно-частотной (АЧХ) и фазово-частотной (ФЧХ) характеристик

$$K(f1) := \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot f1)^2 \cdot \tau^2}} \text{ и } \phi(f1) := \frac{-\operatorname{atan}(2\pi \cdot f1 \cdot \tau) \cdot 360}{2\pi} .$$

2) Отобразить в отчете по лабораторной работе графики АЧХ и ФЧХ интегрирующей RL-цепи, установив ось абсцисс (частоты) в логарифмическом масштабе.

3) Определить с помощью графика АЧХ полосу пропускания смоделированной интегрирующей RL-цепи на уровне 0,707 и оценить селективные свойства данной цепи.

4) Определить с помощью графика ФЧХ полосу пропускания смоделированной интегрирующей RL-цепи на уровне 45° и оценить селективные свойства данной цепи.

5) Для схемотехнического моделирования запустить программу «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую интегрирующую RL цепь, приведенную на рис. 10. Установить заданные согласно варианту значения параметров R , L , E и f .

6) Провести исследования процесса распространения гармонического сигнала через смоделированную физическую среду. Для этого подать на вход интегрирующей RL цепи гармоническое воздействие, переведя переключатель S1 в нижнее положение. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ цепи при исходных значениях C , отобразить их отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ определить полосу пропускания цепи (на уровне – 3 дБ) и ее характер.

7) Определить фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением цепи. Для этого курсоры осциллографа навести на мгновенные значения напряжений, с одинаковыми текущими фазами, например на максимумы (амплитуды) колебаний, затем измерить временную задержку Δt между входным и выходным сигналом в окошке $T2 - T1$. Рассчитать сдвиг фаз по формуле

$$\psi = 360 \cdot \Delta t \cdot f = 360 \cdot (T2 - T1) \cdot f, \text{ град.}$$

8) Провести исследования процесса распространения цифрового сигнала через смоделированную физическую среду. Для этого подать на вход интегрирующей RL цепи импульсное воздействие, установив переключатель S1 перевести в верхнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе U_R и конденсаторе U_L , а также тока I в цепи, результаты занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Экспериментальные данные для интегрирующей RL цепи

Воздействие	Исходные параметры	Экспериментальные данные				
		$I, \text{ мА}$	$U_R, \text{ мВ}$	$U_L, \text{ мВ}$		
импульсное	0,5 L					
	L					
	2 L					

9) С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и выходного напряжения на резисторе. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете. Проанализировать полученные осциллограммы, установив, чем временное представление выходного сигнала отличается от входного сигнала, а также что привело к искажению вида сигнала. По осциллограмме определить длительность переходных процессов и сравнить ее с длительностью импульса.

10) С помощью Фурье анализатора построить спектры входного и выходного сигнала. Для этого в Фурье анализаторе установить с начало узел на входе цепи, а затем – на выходе цепи, основную частоту, равную заданной частоте f , число гармоник – 20.

11) Проанализировать полученные спектры, установив, чем спектр выходного сигнала отличается от спектра входного сигнала, а также что привело к изменению спектра.

12) С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока в цепи. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете.

13) Повторить пункты 8) – 12) для других значений емкости цепи, равных 0,5L и 2L.

14) Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в цепи, установить, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в цепи.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- исследуемые принципиальные электрические схемы,
- математические модели (формулы) и результаты расчетов,
- результаты исследований – измеренные параметры, занесенные в таблицы, осциллограммы, АЧХ и спектры;
- выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ТЕМА 3

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Занятие 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ПРОЦЕССОВ ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование характеристик скалярных физических полей
2. Моделирование и исследование векторных полей и их преобразований.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование характеристик скалярных физических полей		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
1. Моделирование и исследование векторных полей и их преобразований.		50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Для наглядности представления скалярного поля используется его графическое изображение – поверхности уровня.

Геометрическое место точек M , в которых поле $f(M)$ имеет заданное значение C , называется **поверхностью уровня** скалярного поля $f(M)$.

Уравнение поверхности уровня имеет вид $f(M)=C$. Поверхности уровня, отвечающие различным значениям C , заполняют всю область, в которой определено поле, и никакие две поверхности $f(M)=C_1$ и $f(M)=C_2$, где C_1 и C_2 не равны, не имеют общих точек. Взаимное расположение поверхностей уровня дает наглядное представление о соответствующем скалярном поле. Места сближения поверхностей указывают на быстрое изменение функции $f(M)$, медленному изменению функции $f(M)$ соответствуют места разряжения поверхностей (см. рис. 1).

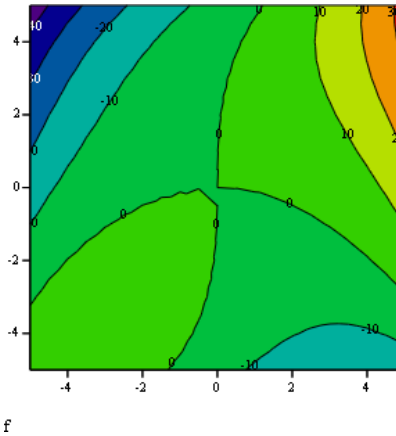


Рис. 1 –Представления скалярного поля в виде поверхности уровней

Если скалярное поле определено в плоской области, то поверхности уровня вырождаются в **линии уровня**. С помощью линий уровня обычно изображают распределение температур (изотермы), распределение давлений (изобары), рельеф местности на топографических картах (горизонтали), эквипотенциальные линии электростатических полей и др.

Поверхности уровня позволяют судить о скорости изменения скалярного поля $f(M)$ по тому или иному направлению только качественно. Количественную же характеристику скорости изменения поля $f(M)$ дает производная по направлению.

Предположим, что в области W определено скалярное поле $f(M)$. Рассмотрим точку M и какое-либо фиксированное направление, определяемое единичным вектором s . Через точку M проведем прямую S , параллельную вектору s , возьмем на ней точку M_1 и построим отношение

$$\frac{f(M_1) - f(M_2)}{MM_1}. \quad (1)$$

Существующий предел отношения (1), когда точка M_1 , двигаясь по выбранной прямой S , приближается к M , называется производной скалярного поля $f(M)$ в точке M по направлению s и обозначается df/ds . Таким образом, производная по направлению есть

$$\frac{df}{ds} = \lim_{M_1 \rightarrow M} \frac{f(M_1) - f(M_2)}{MM_1}. \quad (2)$$

Производная (2) по направлению вектора s при условии $M_1 \rightarrow M$ характеризует скорость изменения поля $f(M)$ в направлении этого вектора и не связано с выбором какой-либо системы координат.

В декартовой системе координат производная по направлению s вычисляется по формуле

$$\frac{df}{ds} = \frac{df}{dx} \cos \alpha + \frac{df}{dy} \cos \beta + \frac{df}{dz} \cos \gamma. \quad (3)$$

где α, β, γ – углы, образуемые вектором s с осями координат.

Важной характеристикой скалярного поля является **градиент**, позволяющий аналитически описать это поле в векторном представлении. В декартовой

системе координат градиент скалярного поля $f(M)$ определяется по формуле

$$\text{grad } f = \frac{df}{dx} \vec{i} + \frac{df}{dy} \vec{j} + \frac{df}{dz} \vec{k}. \quad (4)$$

При этом говорят, что в области W определено векторное поле градиентов. Отметим некоторые *свойства градиента*.

1) Производная по любому направлению равна скалярному произведению градиента на единичный вектор этого направления

$$\frac{df}{ds} = \text{grad } f \cdot \vec{s} = |\text{grad } f| \cdot \cos \theta. \quad (5)$$

здесь θ – угол между единичным вектором направления s и градиентом.

Используя это свойство, можно дать определение градиента, не зависящее от системы координат. Градиентом скалярного поля $f(M)$ в точке M называется вектор, проекция которого на направление заданного единичного вектора равна производной поля $f(M)$ по этому направлению

$$\vec{F} = \text{grad} f(M) = \frac{df}{ds}. \quad (6)$$

2) Производная по направлению принимает свое наибольшее значение в направлении градиента

$$\max \frac{df}{ds} = |\text{grad } f| = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2 + \left(\frac{df}{dz}\right)^2}. \quad (7)$$

3) Вектор-градиент направлен по нормали к поверхности уровня в сторону возрастания функции $f(M)$. Отсюда непосредственно следует, что если $f(M)=C$ – поверхность уровня в скалярном поле и $\vec{n}(M)$ – единичная нормаль к этой поверхности уровня в точке M , то

$$\vec{n} = \pm \frac{\text{grad} f}{|\text{grad} f|}, \quad (1.8)$$

где знак $+$ или $-$ выбирается в зависимости от ориентации поверхности.

4) Если в области W градиент равен нулю ($\text{grad } f=0$), то $f = \text{constant}$, т.е. скалярное поле постоянно в W .

При описании физических полей помимо скалярных величин используют векторы. Пусть в некоторой области пространства W определено векторное поле, это означает, что в каждой точке данной области пространства задан вектор поля, который будем обозначать A .

Структуру векторного поля составляют векторные, или как их называют в физике, силовые линии – кривые в пространстве, касательная в каждой точке которых совпадает по направлению с определенным в этой точке пространства вектором поля A (см. рис. 2).

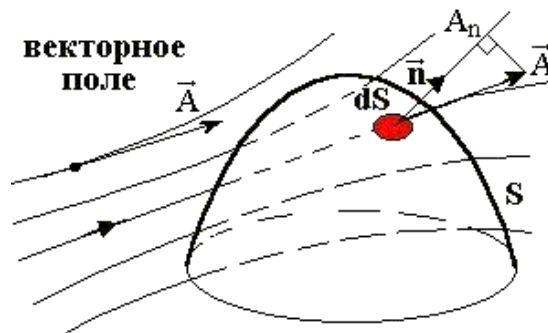


Рис. 2 – Пример векторного поля

Следует отметить, что в отличие от скалярных полей структура векторных полей гораздо более сложная. Это связано с характером поведения векторных линий в различных точках пространства. Так, могут существовать точки пространства, в которых векторные линии могут начинаться или заканчиваться. Если какая-либо точка пространства является началом векторных линий, то говорят, что в этой точке пространства находится **источник векторного поля**. Точка же пространства, в которой заканчиваются векторные линии, называется **стоком**. Очевидно, что для электрического поля источниками и стоками являются, соответственно, положительные и отрицательные заряды. При этом, чем больше векторных линий начинается в данной точке пространства, тем мощнее, обильнее находящийся в этой точке пространства источник. Для количественной (математической) характеристики источников векторного поля в математической теории поля вводят некоторую скалярную функцию, называемую дивергенцией (от латинского слова *divergentia* – расхождение, расходимость).

Заметим, что вся терминология пришла из гидродинамики, поэтому для наглядности можно представлять себе поле скоростей при течении жидкости, например, в ванне. Тогда источник – это водопроводный кран или душ, а сток – дырка в ванне.

Дивергенцией векторного поля A в точке M называется предел, к которому стремится отношение потока вектора A через поверхность S к объему ΔV , ограниченному этой поверхностью, когда последняя стягивается к точке M , а $\Delta V \rightarrow 0$.

$$\operatorname{div} \vec{A} = \lim_{\substack{\Delta V \rightarrow 0 \\ (S \rightarrow M)}} \frac{\oint_S (\vec{A}, \vec{n}) ds}{\Delta V} \quad (9)$$

Как видно из определения, дивергенция представляет собой плотность потока векторного поля. Известно, что плотность какой-либо величины, заданной в пространстве, (например плотность заряда), определяется как предел отношения этой величины, заключенной в объеме ΔV к величине данного объема. Так и в (9) дивергенция определяется как предел отношения потока векторного поля изнутри объема ΔV , к величине этого объема.

Ясно, что если в точке M находится источник поля, то $\text{div} A > 0$, т.к. поток $\Phi > 0$, поскольку скалярное произведение векторов $(A, \vec{n}) > 0$, если же $\text{div} A < 0$, то в точке M находится сток векторного поля, т.к. поток $\Phi < 0$, поскольку $(A, \vec{n}) < 0$. Кроме этого как видно из выражения (9), чем больше поток вектора A (числитель в (9)), тем больше $\text{div} A$, тем, соответственно, больше векторных линий начинается в данной точке пространства, и, следовательно, тем мощнее, обильнее источник. Отметим, между прочим, что использовать в качестве характеристики мощности источников поля просто поток векторного поля было бы нельзя, поскольку он при стягивании поверхности интегрирования S к точке M стремится к нулю. Стягивание же поверхности S к точке M необходимо, поскольку источники поля могут быть очень близко расположены друг к другу, и мы обязаны разделить их, определяя мощность каждого источника. При вычислении же предела отношения в (9), получаем некоторое конечное выражение. То есть, дивергенция векторного поля является локальным понятием – функцией точки пространства.

Продолжая аналогии с гидродинамикой, можно говорить, что поток векторного поля скоростей текущей жидкости через поверхность – это количество жидкости (объем), протекающее через эту поверхность в единицу времени, а дивергенция – количество жидкости, появляющейся или исчезающей в данной точке пространства в единицу времени, отнесенное к единице объема (плотность потока жидкости).

Исходя из определения дивергенции (9) в математической теории поля получена следующая *формула, позволяющие вычислять дивергенцию в декартовых системах координат*:

$$\text{div} A = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (10)$$

Для характеристики степени завихрённости поля вводят *понятие плотности циркуляции*, определяя её как предел, к которому стремится отношение циркуляции вектора A по контуру L , к площади ΔS , ограниченной этим контуром, когда данный контур стягивается к рассматриваемой точке пространства. При этом соответственно, $\Delta S \rightarrow 0$:

$$\lim_{\substack{\Delta S \rightarrow 0 \\ (L \rightarrow M)}} \frac{1}{\Delta S} \oint_L (\vec{A}, \vec{\tau}) dl \quad (11)$$

Вычисляя этот предел, будем иметь уже некоторое конечное, отличное от нуля число. Однако это значение будет зависеть от ориентации контура L в поле. Это означает, что всё многообразие значений плотности циркуляции векторного поля может быть, вообще говоря, представлено в виде проекции некоторого вектора, на нормаль к площадке контура L . При этом данный вектор по абсолютной величине будет равен максимальному значению плотности циркуляции вектора

$\vec{A}$ в рассматриваемой точке пространства, и направлен в сторону, соответствующую направлению нормали к контуру L , при которой плотность циркуляции принимает это максимальное значение.

Данный вектор называется **ротором** или **вихрем** векторного поля $\vec{A}$ (от французского (или английского) слова *rotation* – вращение, или лат. *roto* – вращаюсь) и проекция этого вектора на любое направление в каждой точке пространства определяется выражением:

$$(\text{rot} \vec{A}, \vec{n}) = \lim_{\substack{\Delta S \rightarrow 0 \\ (L \rightarrow M)}} \frac{1}{\Delta S} \oint_L (\vec{A}, \vec{\tau}) dl, \quad (12)$$

Здесь $\vec{n}$ - нормаль к площадке ΔS , согласованная с направлением обхода контура L правилом правого винта (буравчика) – рис. 3.

Исходя из определения (12) можно получить проекции ротора $\text{rot} \vec{A}$ на единичные векторы, и определить тем самым $\text{rot} \vec{A}$ в декартовых координатах:

$$\text{rot} \vec{A} = \left[\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right] \cdot \vec{i} + \left[\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] \cdot \vec{j} + \left[\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right] \cdot \vec{k}. \quad (13)$$

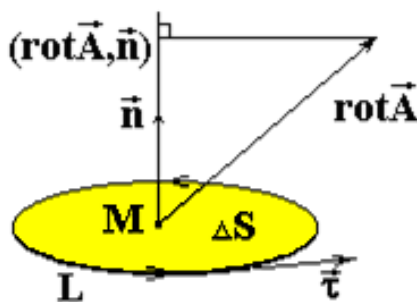


Рис. 3 – Вихревое поле

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЯРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с установленной системой компьютерной алгебры «Mathcad-15».

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Варианты заданий для моделирования и исследований

Вариант	№ ис-точн.	Заряд q	X	Y	$f(x,y)$	Вариант	№ ис-точн.	Заряд q	X	Y	$f(x,y)$
1	1	$20 \cdot 10^{-9}$	0.82	0.54	$x^2 + xy - y^4$	14	1	$-20 \cdot 10^{-9}$	0.54	0.82	$y^4 + x - x^3 y^2$
	2	$-15 \cdot 10^{-9}$	0.12	0.90			2	$15 \cdot 10^{-9}$	0.90	0.12	
	3	$30 \cdot 10^{-9}$	0.33	0.68			3	$-30 \cdot 10^{-9}$	0.68	0.33	
	4	$-25 \cdot 10^{-9}$	0.25	0.59			4	$25 \cdot 10^{-9}$	0.59	0.25	
2	1	$40 \cdot 10^{-9}$	0.16	0.71	$x^3 + xy - y^3$	15	1	$-40 \cdot 10^{-9}$	0.71	0.16	$y^3 - x^2 - x^2 y^2$

Вари- ант	№ ис- точн.	Заряд q	X	Y	$f(x,y)$	Вари- ант	№ ис- точн.	Заряд q	X	Y	$f(x,y)$
	2	$10 \cdot 10^{-9}$	0.20	0.57			2	$-10 \cdot 10^{-9}$	0.57	0.20	
	3	$-25 \cdot 10^{-9}$	0.38	0.83			3	$25 \cdot 10^{-9}$	0.83	0.38	
	4	$-30 \cdot 10^{-9}$	0.4	0.45			4	$30 \cdot 10^{-9}$	0.45	0.4	
3	1	$-10 \cdot 10^{-9}$	0.55	0.86	$x^3+3xy^2-y^3$	16	1	$10 \cdot 10^{-9}$	0.86	0.55	$y^3-x^2-x^3y^3$
	2	$15 \cdot 10^{-9}$	0.39	0.63			2	$15 \cdot 10^{-9}$	0.63	0.39	
	3	$10 \cdot 10^{-9}$	0.58	0.58			3	$-10 \cdot 10^{-9}$	0.58	0.58	
	4	$-25 \cdot 10^{-9}$	0.16	0.36			4	$25 \cdot 10^{-9}$	0.36	0.16	
4	1	$17 \cdot 10^{-9}$	0.13	0.48	$x^4+3xy^2-y^3$	17	1	$17 \cdot 10^{-9}$	0.48	0.13	$y^2-x^4+x^3y^3$
	2	$29 \cdot 10^{-9}$	0.22	0.35			2	$-29 \cdot 10^{-9}$	0.35	0.22	
	3	$-33 \cdot 10^{-9}$	0.30	0.51			3	$33 \cdot 10^{-9}$	0.51	0.30	
	4	$14 \cdot 10^{-9}$	0.73	0.25			4	$-14 \cdot 10^{-9}$	0.25	0.73	
5	1	$40 \cdot 10^{-9}$	0.44	0.58	$x^4+3xy^2-y^5$	18	1	$40 \cdot 10^{-9}$	0.58	0.44	$x^4+y^3+x^2+y$
	2	$-30 \cdot 10^{-9}$	0.31	0.62			2	$30 \cdot 10^{-9}$	0.62	0.31	
	3	$20 \cdot 10^{-9}$	0.25	0.69			3	$-20 \cdot 10^{-9}$	0.69	0.25	
	4	$-10 \cdot 10^{-9}$	0.73	0.18			4	$10 \cdot 10^{-9}$	0.18	0.73	
6	1	$-33 \cdot 10^{-9}$	0.64	0.12	$x^4-x^2y^2-y^5$	19	1	$33 \cdot 10^{-9}$	0.12	0.64	$x^4y^3-x^3y^4$
	2	$-27 \cdot 10^{-9}$	0.50	0.32			2	$-27 \cdot 10^{-9}$	0.32	0.50	
	3	$18 \cdot 10^{-9}$	0.46	0.28			3	$-18 \cdot 10^{-9}$	0.28	0.46	
	4	$45 \cdot 10^{-9}$	0.81	0.55			4	$45 \cdot 10^{-9}$	0.55	0.81	
7	1	$14 \cdot 10^{-9}$	0.43	0.60	$x^3-x^2y^2-y$	20	1	$14 \cdot 10^{-9}$	0.60	0.43	x^3y-xy^3
	2	$-12 \cdot 10^{-9}$	0.29	0.44			2	$12 \cdot 10^{-9}$	0.44	0.29	
	3	$45 \cdot 10^{-9}$	0.57	0.33			3	$-45 \cdot 10^{-9}$	0.33	0.57	
	4	$20 \cdot 10^{-9}$	0.65	0.70			4	$20 \cdot 10^{-9}$	0.70	0.65	
8	1	$-29 \cdot 10^{-9}$	0.24	0.44	y^3+x^4	21	1	$29 \cdot 10^{-9}$	0.44	0.24	x^4y-xy^4
	2	$19 \cdot 10^{-9}$	0.33	0.52			2	$19 \cdot 10^{-9}$	0.52	0.33	
	3	$22 \cdot 10^{-9}$	0.73	0.40			3	$-22 \cdot 10^{-9}$	0.40	0.73	
	4	$30 \cdot 10^{-9}$	0.59	0.20			4	$30 \cdot 10^{-9}$	0.20	0.59	
9	1	$-37 \cdot 10^{-9}$	0.63	0.70	y^2+x^2-xy	22	1	$37 \cdot 10^{-9}$	0.70	0.63	$x^4-y^3-x^2-y$
	2	$-24 \cdot 10^{-9}$	0.49	0.86			2	$24 \cdot 10^{-9}$	0.86	0.49	
	3	$-16 \cdot 10^{-9}$	0.18	0.23			3	$-16 \cdot 10^{-9}$	0.23	0.18	
	4	$45 \cdot 10^{-9}$	0.54	0.11			4	$-45 \cdot 10^{-9}$	0.11	0.54	
10	1	$18 \cdot 10^{-9}$	0.76	0.35	y^3+x^2-xy	23	1	$-18 \cdot 10^{-9}$	0.35	0.76	$x^2y^3+y^2+x$
	2	$-26 \cdot 10^{-9}$	0.68	0.49			2	$26 \cdot 10^{-9}$	0.49	0.68	
	3	$14 \cdot 10^{-9}$	0.32	0.31			3	$-14 \cdot 10^{-9}$	0.31	0.32	
	4	$30 \cdot 10^{-9}$	0.50	0.15			4	$30 \cdot 10^{-9}$	0.15	0.50	
11	1	$41 \cdot 10^{-9}$	0.87	0.63	y^2+x^3-xy	24	1	$-41 \cdot 10^{-9}$	0.63	0.87	y^2+x^2+xy
	2	$14 \cdot 10^{-9}$	0.49	0.26			2	$14 \cdot 10^{-9}$	0.26	0.49	
	3	$-14 \cdot 10^{-9}$	0.39	0.14			3	$-14 \cdot 10^{-9}$	0.14	0.39	
	4	$-25 \cdot 10^{-9}$	0.41	0.81			4	$25 \cdot 10^{-9}$	0.81	0.41	
12	1	$22 \cdot 10^{-9}$	0.54	0.60	$y^2+x^3-x^2y$	25	1	$22 \cdot 10^{-9}$	0.60	0.54	$x+y+x^2-y^3$
	2	$33 \cdot 10^{-9}$	0.75	0.27			2	$-33 \cdot 10^{-9}$	0.27	0.75	
	3	$-44 \cdot 10^{-9}$	0.45	0.70			3	$44 \cdot 10^{-9}$	0.70	0.45	
	4	$11 \cdot 10^{-9}$	0.18	0.33			4	$-11 \cdot 10^{-9}$	0.33	0.18	
13	1	$-23 \cdot 10^{-9}$	0.46	0.68	$y^4+x-x^2y^3$	26	1	$23 \cdot 10^{-9}$	0.68	0.46	x^2y+y^2
	2	$32 \cdot 10^{-9}$	0.77	0.14			2	$-32 \cdot 10^{-9}$	0.14	0.77	
	3	$17 \cdot 10^{-9}$	0.59	0.17			3	$-17 \cdot 10^{-9}$	0.17	0.59	
	4	$-19 \cdot 10^{-9}$	0.36	0.41			4	$19 \cdot 10^{-9}$	0.41	0.36	

3. Задание для работы

Базового уровня:

- 1) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в скалярном виде.
- 2) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в векторном виде.
- 3) Смоделировать в системе «Mathcad» скалярное физическое поле и преобразовать его в векторное поле градиента.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в скалярном виде.

1. Исходные данные для моделирования – физическое поле в вакууме, создается системой из N независимых источников, имеющих величины зарядов q_n и координаты (X_n, Y_n) , $n = 1 - N$.

Задача моделирования – получить пространственное распределение скалярной величины поля в виде его потенциала, определяемого формулой (14)

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{k \cdot q_n}{\sqrt{(x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}}, \quad (14)$$

где (x, y) – координаты точки поля в пространстве; k – коэффициент, обусловленный сферичностью пространства и проницаемостью среды, равный

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (15)$$

здесь ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

2. Алгоритм расчета поля в системе «Mathcad».

- 1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:
 - $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$;
 - $N = 4$.
- 2) Ввести формулу (15) для расчета коэффициента k .
- 3) Ввести переменную ORIGIN=1 для задания номера первого элемента массива (вектора или матрицы), равного 1.
- 4) Ввести цикл чисел, задающих вектор (массив) источников поля – $n=1...N$.
- 5) Ввести величины зарядов q_1, q_2, q_3, q_4 как элементы вектора, взяв их значения из таблицы 1.1 с исходными данными.
- 6) Ввести координаты зарядов $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_3, Y_3, X_4, Y_4$ как элементы вектора, взяв их значения из таблицы 1.1 с исходными данными.

7) Ввести циклы $i=1...100$ и $j=1...100$, задающие индексы в матрице точек пространства, в которых определяется потенциал поля.

8) Ввести координаты точек пространства (x, y) как элементы матрицы, в виде $x_i=0.01 \cdot i$ и $x_j=0.01 \cdot j$.

9) Ввести формулу (14) для расчета потенциала поля, преобразовав ее к матричной форме вида:

$$\varphi_{i,j} = \sum_{n=1}^N \frac{k \cdot q_n}{\sqrt{(x_i - X_n)^2 + (y_j - Y_n)^2 + 0.001}},$$

где величина 0.001 введена в знаменатель формулы для устранения операции деления на ноль.

Пример листинга программы в системе «Mathcad» приведен на рис. 4.

3. Отладить файл программы, убедившись, что при расчете не происходит ошибок. Листинг программы занести в отчет.

4. Построить график распределения потенциала поля в 2-х мерном пространстве в виде эквипотенциальных линий (уровней). Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → Контурная поверхность (Линии уровня)). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу потенциалов φ .

5. Построить график распределения потенциала поля в 3-х мерном пространстве. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  или  (или иначе Вставка → График → График поверхности или 3D-график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу потенциалов φ .

```

ORIGIN := 1
N := 4

ε₀ := 8.85 · 10-12      k := 1 / (4π · ε₀)

n := 1..N

q₁ := 20 · 10-9      q₂ := 30 · 10-9      q₃ := -20 · 10-9      q₄ := -10 · 10-9
X₁ := 0.3      X₂ := 0.7      X₃ := 0.5      X₄ := 0.75
Y₁ := 0.3      Y₂ := 0.6      Y₃ := 0.5      Y₄ := 0.4

i := 1..100      j := 1..100
xᵢ := 0.01 · i      yⱼ := 0.01 · j

φi,j := ∑n=1N (k · qn / √((xᵢ - Xn)² + (yⱼ - Yn)² + 0.001))

```

Рис. 4 – Листинг программы моделирования статического физического поля, образованного системой из N независимых источников, в скалярном виде

6. Провести исследование внешнего вида пространственного распределения поля от числа источников и их совместного расположения. Для этого изменяя значение числа источников N от 1 до 4 с учетом их заданных координат, построить графики распределения потенциала в 3-х мерном пространстве и в виде эквипотенциальных линий. Для удобства восприятия 3-х мерные графики отобразить в виде цветной поверхности с проволочным каркасом, и при необходимости повернуть в пространстве. Занести в отчет все полученные графики.

7. Сделать выводы по результатам, проделанной работы. В выводах отразить, как изменяется потенциал поля от расстояния, от количества источников, величины их зарядов и их взаимного пространственного расположения.

Задание 1.2. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в векторном виде.

1. Исходные данные для моделирования – физическое поле в вакууме, создается системой из N независимых источников, имеющих величины зарядов qn и координаты (xn, yn) , $n = 1 - N$.

Задача моделирования – получить пространственное распределение векторной величины поля в виде его напряженности, определяемой формулой (16)

$$E_{x,y} = \frac{k \cdot qn \cdot R_{x,y}}{|R_{x,y}|^3} \quad (16)$$

где $R_{x,y}$ – вектор расстояний от источника до точек поля в пространстве;

4.2.2. Алгоритм расчета поля в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- мнимую единицу $i = \sqrt{-1}$;
- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$.

2) Ввести формулу (15) для расчета коэффициента k .

3) Ввести величины зарядов $q1, q2, q3, q4$, взяв их значения из таблицы 1.1 с исходными данными и умножив их на 1000.

4) Ввести координаты зарядов $X1, Y1, X2, Y2, X3, Y3, X4, Y4$, взяв их значения из таблицы 1 с исходными данными и умножив на 20.

5) Ввести циклы $x=1...20$ и $y=1...20$, задающие пространственные координаты точек поля, в которых определяется напряженность поля.

6) Задать поля векторов расстояний для каждого источника поля, используя функцию комплексных переменных:

$$Rn_{x,y} = Xn_x + i \cdot Yn_y, \quad n = 1...N$$

7) Задать матрицы напряженностей, создаваемые каждым источником поля, введя в программу выражение (1.16)

8) Ввести формулу для расчета суммарного поля напряженностей используя принцип суперпозиции, т.е. $ES = E1 + E2 + \dots + En$.

9) Ввести функцию для расчета нормированного поля напряженностей

$$E_{x,y} = \frac{ES_{x,y}}{|ES_{x,y}|}$$

Пример листинга программы в системе «Mathcad» приведен на рис. 5.

3. Отладить файл программы, убедившись, что при расчете не происходит ошибок. Листинг программы занести в отчет.

4. Построить график распределения вектора напряженности поля в векторном представлении. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → Векторное поле). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу векторов напряженности E .

6. Провести исследование внешнего вида векторного распределения поля от числа источников и их совместного расположения. Для этого, изменяя число слагаемых в формуле суммарного поля $ES = E1 + E2 + \dots + En$ от 1 до 4 с учетом их заданных координат и величин зарядов источников поля, построить графики векторных поверхностей напряженностей полей. Занести в отчет все полученные графики.

7. Сделать выводы по результатам, проделанной работы. В выводах отразить, как изменяется вектор напряженности от расстояния, от количества источников, величины их зарядов и их взаимного пространственного расположения.

$$\begin{aligned} i &:= \sqrt{-1} \\ \epsilon_0 &:= 8.85 \cdot 10^{-12} & k &:= \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \\ q1 &:= 10 \cdot 10^{-6} & q2 &:= -7 \cdot 10^{-6} & q3 &:= 8 \cdot 10^{-6} & q4 &:= -10 \cdot 10^{-6} \\ x1 &:= 9 & y1 &:= 6 & x2 &:= 13 & y2 &:= 14 & x3 &:= 15 & y3 &:= 8 & x4 &:= 3 & y4 &:= 5 \\ x &:= 0..20 & y &:= 0..20 \\ X1_x &:= x - x1 & Y1_y &:= y - y1 & X2_x &:= x - x2 & Y2_y &:= y - y2 \\ X3_x &:= x - x3 & Y3_y &:= y - y3 & X4_x &:= x - x4 & Y4_y &:= y - y4 \\ R1_{x,y} &:= X1_x + i \cdot Y1_y & R2_{x,y} &:= X2_x + i \cdot Y2_y \\ R3_{x,y} &:= X3_x + i \cdot Y3_y & R4_{x,y} &:= X4_x + i \cdot Y4_y \\ E1_{x,y} &:= k \cdot \frac{q1 \cdot R1_{x,y}}{(|R1_{x,y}|)^3} & E2_{x,y} &:= k \cdot \frac{q2 \cdot R2_{x,y}}{(|R2_{x,y}|)^3} \\ E3_{x,y} &:= k \cdot \frac{q3 \cdot R3_{x,y}}{(|R3_{x,y}|)^3} & E4_{x,y} &:= k \cdot \frac{q4 \cdot R4_{x,y}}{(|R4_{x,y}|)^3} \\ ES &:= E1 + E2 + E3 + E4 & E_{x,y} &:= \frac{ES_{x,y}}{|ES_{x,y}|} \end{aligned}$$

Рис. 5 – Листинг программы моделирования статического физического поля, образованного системой из 4-х независимых источников, в векторном виде

Задание 1.3. Смоделировать в системе «Mathcad» скалярное физическое поле и преобразовать его в векторное поле градиента.

1. Построить в системе «Mathcad» графическое изображение скалярного поля, описываемое функцией $f(x,y)$, заданное в таблице 1.1 исходных данных согласно указанному варианту. Для этого осуществить следующие действия:

- ввести в рабочем окне программы заданную функцию $f(x,y)$;
- построить трехмерный график поля, открыв шаблон 3D графика и введя туда функцию f ;
- построить график эквипотенциальных линий (уровней) поля, открыв шаблон графика контурной поверхности и введя туда функцию f .

2. Алгоритм преобразования поля.

1) Ввести в рабочем окне программы формулу расчета градиента поля в векторном виде:

$$\text{grad}(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{d}{dx} f(x, y) \\ \frac{d}{dy} f(x, y) \end{pmatrix}.$$

2) Вычислить аналитически градиент поля, введя функцию $\text{grad}(x, y) \rightarrow$. Результаты вычислений занести в отчет.

3) Ввести циклы $i=1...10$ и $j=1...10$, задающие индексы в матрице точек пространства, в которых определяется градиент поля.

4) Определить матрицу векторного поля, введя выражение для ее элементов

$$V_{i,j} = \text{grad}(i - 5, j - 5).$$

Рассчитать проекции вектора градиента

$$5) \quad X_{i,j} = (V_{i,j})_0, \quad Y_{i,j} = (V_{i,j})_1.$$

Пример листинга программы в системе «Mathcad» приведен на рис. 6.

$$f(x,y) := x^3 - x^2 \cdot y^2 - y^1$$

$$\text{grad}(x,y) := \begin{pmatrix} \frac{d}{dx} f(x,y) \\ \frac{d}{dy} f(x,y) \end{pmatrix}$$

$$\text{grad}(x,y) \rightarrow \begin{pmatrix} 3 \cdot x^2 - 2 \cdot x \cdot y^2 \\ -2 \cdot y \cdot x^2 - 1 \end{pmatrix}$$

$$i := 0..10 \quad j := 0..10$$

$$V_{i,j} := \text{grad}(i - 5, j - 5)$$

$$X_{i,j} := (V_{i,j})_0$$

$$Y_{i,j} := (V_{i,j})_1$$

Рис. 1.6 – Листинг программы преобразования скалярного физического поля в векторное поле градиента

3. Построить график векторного поля градиента. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → Векторное поле). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанные проекции вектора в виде (X, Y) . Занести в отчет полученный график векторного поля.

4. Провести исследование зависимости векторного поля от исходного скалярного поля. Для этого последовательно заменить в одном из слагаемых функции $f(x, y)$ степень переменной x , а в другом слагаемом – степень переменной y . Для измененных значений функции рассчитать градиент поля и построить графики векторных полей.

5. Сделать выводы по результатам, проделанной работы.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЯРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Содержание практической работы, выполняемой студентами по второму учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:

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

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1.1 – Варианты заданий для моделирования и исследований

3. Задание для работы

Базового уровня:

1) Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в скалярное поле дивергенции.

2) Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в векторное поле ротора.

Повышенного уровня:

3) Самостоятельно смоделировать в системе «Mathcad» скалярное физическое поле и преобразовать его в скалярное поле лапласиана.

Задание 2.1. Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в скалярное поле дивергенции.

1. Для моделирования векторного поля воспользоваться программой, разработанной в предыдущем задании 1.3.

2. Для преобразования полученного векторного поля градиента в скалярное поле дивергенции необходимо внести изменение в алгоритм предыдущей программы. Для этого произвести следующие операции:

1) Дописать в рабочем окне программы, составленной для выполнения задания 1.3, формулу расчета дивергенции векторного поля:

$$\text{div}(x, y) = \frac{d}{dx} \text{grad}(x, y)_0 + \frac{d}{dy} \text{grad}(x, y)_1$$

2) Вычислить аналитически дивергенцию векторного поля, введя функцию $\text{div}(x, y) \rightarrow$. Результаты вычислений занести в отчет.

3) Определить матрицу скалярного поля дивергенции, введя выражение для ее элементов

$$D_{i,j} = \text{div}(i - 5, j - 5)$$

3. Построить 3-х мерный график скалярного поля дивергенции. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  $\rightarrow$  или  (или иначе Вставка $\rightarrow$ График $\rightarrow$ 3D-график и график поверхности). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу поля в виде D . Занести в отчет полученный график скалярного поля.

4. Построить график эквипотенциальных линий скалярного поля дивергенции. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  $\rightarrow$  (или иначе Вставка $\rightarrow$ График $\rightarrow$ Линии уровня). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу поля в виде D . Занести в отчет полученный график скалярного поля.

5. Провести исследование зависимости полученного скалярного поля дивергенции от исходного скалярного поля, задаваемого функцией $f(x, y)$. Для этого последовательно увеличить в одном из слагаемых функции $f(x, y)$ степень переменной x , а в другом слагаемом – степень переменной y . Для измененных значений функции рассчитать дивергенцию векторного поля и построить графики скалярного поля дивергенции.

6. Сделать выводы по результатам, проделанной работы.

Задание 2.2. Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в векторное поле ротора.

1. Для моделирования векторного поля воспользоваться программой, составленной для выполнения задания 1.3.

2. Для преобразования полученного векторного поля градиента в векторное поле ротора необходимо дополнить в алгоритм предыдущей программы. Для этого произвести следующие операции:

1) Дописать в рабочем окне программы, составленной для выполнения задания 1.3, формулу расчета ротора векторного поля:

$$\text{rot}(x, y) = \begin{pmatrix} \overline{\frac{d}{dy} \text{grad}(x, y)_0} & 1 \\ \frac{d}{dx} \text{grad}(x, y)_1 & 0 \end{pmatrix}$$

2) Вычислить аналитически ротор векторного поля, введя функцию $\text{rot}(x, y) \rightarrow$. Результаты вычислений занести в отчет.

3) Определить матрицу векторного поля ротора, введя выражение для ее элементов

$$R_{i,j} = \text{rot}(i - 5, j - 5)$$

Рассчитать проекции вектора ротора

$$4) \quad XR_{i,j} = (R_{i,j})_0, \quad YR_{i,j} = (R_{i,j})_1.$$

3. Построить 3-х мерный график точек векторного поля ротора. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → 3D-график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу поля в виде (XR, YR) . Занести в отчет полученный график точек векторного поля.

4. Построить график векторного поля ротора. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → Векторное поле). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить рассчитанную матрицу поля в виде (XR, YR) . Занести в отчет полученный график векторного поля.

5. Провести исследование зависимости полученного векторного поля ротора от исходного скалярного поля, задаваемого функцией $f(x, y)$. Для этого последовательно увеличить в одном из слагаемых функции $f(x, y)$ степень переменной x , а в другом слагаемом – степень переменной y . Для измененных значений функции рассчитать ротор векторного поля и построить графики векторного поля ротора.

6. Сделать выводы по результатам, проделанной работы.

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, описывающие поля, 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 и схеме замещения волнового процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ТЕМА 4

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Занятие 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ.

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование свойств и характеристик волновых процессов.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.

- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике

- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности

- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.

- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронных схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;

- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование свойств и характеристик волновых процессов.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
1. Моделирование и исследование свойств и характеристик волновых процессов.		50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Волна – это любое возбуждение (изменение) среды, распространяющееся в пространстве и времени или иначе в фазовом пространстве с переносом энергии и без переноса массы. Другими словами, волнами или волной называют изменяющееся со временем пространственное чередование максимумов и минимумов любой физической величины – например, плотности вещества, напряжённости электрического поля, температуры.

В связи с этим волновой процесс может иметь самую разную физическую природу: механическую, электромагнитную, гравитационную и т.д.

Гармоническая волна – волна, изменяющаяся во времени по гармоническому закону. По-другому это распространяющееся монохроматическое колебание или колебание одной частоты.

Гармонически изменяющуюся во времени волну $A(t)$, распространяющуюся, например, в направлении оси x , математически можно описать в следующем виде:

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t - kx + \varphi), \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда или максимальное отклонение колебания относительно равновесного состояния; $\omega = 2\pi \cdot f$ – круговая частота колебания; выражение, стоящее в скобках, называется фазой колебания и определяет мгновенное состояние колебания, т.е. именно в данный момент времени; φ – константа, называемая начальной фазой колебания, ее значение обычно определяется источником колебаний.

Волновой пакет – определённая совокупность гармонических волн, обладающих разными частотами, которые описывают обладающую волновыми свойствами формацию, в общем случае ограниченную во времени и пространстве. По-другому под волновым пакетом или цугом волн понимается ряд возмущений, между которыми имеются некоторые перерывы.

Характеристиками волновых процессов являются:

1) **Геометрические параметры:**

- гребень волны – множество точек волны с максимальным положительным отклонением от состояния равновесия;
- долина (ложбина) волны – множество точек волны с наибольшим отрицательным отклонением от состояния равновесия;
- волновая поверхность – множество точек, имеющих в некий фиксированный момент времени одинаковую фазу колебаний. В зависимости от формы фронта волны выделяют плоские, сферические, эллиптические и другие волны.

Для стоячих волн используют понятие пучности (максимума амплитуды колебания) и узла (минимума амплитуды колебания).

2) **Временная и пространственная периодичности:**

- период колебания (T , с) – время, за которое осуществляется полный цикл колебания. Период колебания – есть величина обратная частоте волны (f , Гц), т.е. скорости изменения фазы с течением времени в какой-то заданной точке;
- длина волны (λ , м) – наименьшее расстояние между двумя максимумами или минимумами возмущения в пространстве. Иначе это скорость изменения фазы (запаздывание процесса во времени) в определённый момент времени с изменением координаты.

Временная и пространственная периодичности взаимосвязаны между собой параметром, называемым **фазовой скоростью распространения волны** (V , м/с) в среде:

$$V = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi \cdot f}{2\pi/\lambda} = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T}, \quad (2)$$

где ω – круговая (циклическая) частота колебания (рад/с); k – волновое число (1/м), показывающее число длин волн, укладывающихся на расстоянии 2π в метрах. Фазовая скорость есть чисто абстрактное математическое понятие, показывающее скорость перемещения какой-либо фазовой точки волны, эта скорость не связана с перемещением в пространстве чего-либо материального.

3) **Интенсивность волнового процесса**, которая характеризуется параметрами:

- амплитуда волнового процесса (A_0 , м) или максимальное отклонение колебания относительно равновесного состояния;

– плотность энергии волны W , для гармонической волны этот параметр также является гармонической волновой функцией, равной

$$W = \beta \cdot A_o^2 \sin^2(\omega t - kx), \quad (3)$$

где β – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств среды и типа волны;

– поток энергии волнового процесса – это отношение энергии волны dW , передаваемой через поперечную лучу площадку dS за малый промежуток времени dt , к этому промежутку времени; поток энергии равен

$$dW = W(x,t) \cdot dS \cdot dt = W \cdot dS \cdot V \cdot dt, \quad (4)$$

смысл этой формулы заключается в том, что именно эта энергия за время dt заполняет цилиндр сечением dS , длиной $l = Vdt$ откуда за время dt в случае гармонической волны уходит такая же энергия.

– плотность потока энергии I (Вт/м²) – это отношение потока энергии через поперечную площадку к ее площади, она равна

$$I = \int \frac{dW}{dS} dt = W \cdot V \quad (5)$$

В среде с потерями распространяющаяся волна часть своей энергии отдает веществу среды, при этом **амплитуда поля уменьшается** (ослабевает). Это может быть учтено введением зависимости

$$A(x) = A_o(x) \cdot \exp^{-\alpha \cdot x}, \quad (6)$$

где α – коэффициент затухания, м⁻¹.

Основываясь на принципе суперпозиции (справедливом в так называемых линейных средах), любую негармоническую волну можно заменить эквивалентной системой синусоидальных волн, называемой **волновым пакетом** (иначе – волновой группой). Совокупность значений частот гармонических волн, составляющих пакет, называют спектром. Спектр может быть сплошным, дискретным и смешанным. Сплошным является, например, спектр электромагнитного излучения горячих тел (спектр теплового излучения). Дискретный спектр наблюдается в излучении многих газовых разрядов. Пример смешанного спектра дает излучение звезд.

Если в некоторой однородной и изотропной среде два точечных источника возбуждают сферические волны,

В произвольной точке пространства, представляющего собой однородную и изотропную среду, может происходить наложение волн в соответствии с принципом суперпозиции (наложения). **Явление**, приводящее к взаимному увеличению или уменьшению результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга, **называется интерференцией волн**. Интерференция сопровождается чередованием максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) интенсивности в пространстве. Результат интерференции (интерференционная картина) зависит от разности фаз накладываемых волн.

Рассмотрим две одновременно распространяющиеся синусоидальные волны S_1 и S_2 , созданные точечными источниками B_1 и B_2 , в точке наложения:

$$\begin{aligned} S_1 &= A_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x + \varphi_1) = A_1 \sin \Phi_1, \\ S_2 &= A_2 \sin(\omega_2 t - k_2 x + \varphi_2) = A_2 \sin \Phi_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi_1 = \omega_1 t - k_1 x + \varphi_1$ и $\Phi_2 = \omega_2 t - k_2 x + \varphi_2$ — фазы распространяющихся волн; k_1 и k_2 — волновые числа, ω_1 и ω_2 — циклические частоты каждой волны; φ_1 и φ_2 — начальные фазы.

Эти волны вызовут в точке наложения колебание, которое, по принципу суперпозиции, описывается формулой $S = S_1 + S_2$. Согласно формуле сферической волны:

В результирующей волне $S = S_1 + S_2 = A \sin \Phi$ амплитуда A и фаза Φ определяются формулами:

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\Phi_2 - \Phi_1)}, \\ \Phi &= \arctg \left\{ \frac{A_1 \sin \Phi_1 + A_2 \sin \Phi_2}{A_1 \cos \Phi_1 + A_2 \cos \Phi_2} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Простейшим волновым пакетом является так называемая квазигармоническая волна (иначе — *волновой цуг*), получающаяся как результат наложения двух гармонических волн с одинаковыми амплитудами A и распространяющимися вдоль одного луча, но имеющими немного различающиеся частоты. Пользуясь представлением суммы синусов через произведение, волновую функцию цуга нетрудно представить в виде:

$$\Psi = 2A \cos \left(\frac{\Delta \omega \cdot t - \Delta k \cdot x}{2} \right) \sin(\omega \cdot t - kx) \quad (9)$$

где через $\Delta \omega$ обозначена разность частот гармонических волн, а через ω их среднеарифметическая частота. Величина $B(t, x)$ медленно меняется во времени и в пространстве, т.е.

$$B(t, x) = 2A \cos \left(\frac{\Delta \omega \cdot t - \Delta k \cdot x}{2} \right). \quad (10)$$

Эта функция (10) называется огибающей цуга. Это тоже как бы бегущая гармоническая волна, модулирующая по амплитуде бегущую синусоиду частоты ω . Ее длина волны $\Delta \lambda = 2\pi / \Delta k$ гораздо больше длины волны синусоиды с частотой ω , а *скорость распространения*, называемая *групповой скоростью*, равна

$$u = \frac{\Delta \omega}{\Delta k} = \Delta f \cdot \Delta \lambda \quad (11)$$

Установлено, что именно **групповая скорость является скоростью переноса энергии цуга**. Она в общем случае отличается от фазовой скорости $V = \omega/k$.

Итак, групповая скорость связана с перемещением в пространстве возмущения фиксированной амплитуды; поскольку энергия волны связана с её амплитудой, групповая скорость есть скорость распространения энергии в пространстве.

Среда называется диспергирующей, если в ней волны разной длины распространяются с разной скоростью. Зависимость фазовой скорости волны от длины волны (или, что то же самое, от частоты), т.е. $V = F(\lambda) = F(\omega)$, **называется дисперсией**.

Для диспергирующей среды связь между групповой и фазовыми скоростями можно легко получить, учтя зависимость частоты и волнового числа от длины волны:

$$u = V - \lambda \frac{\Delta V}{\Delta \lambda} \quad (12)$$

Эта формула (12) имеет название формулой Рэлея.

При $\Delta V / \Delta \lambda = 0$ дисперсия отсутствует. В этом случае групповая скорость будет совпадать с фазовой скоростью, и равны скорости света C , следовательно, в недиспергирующих средах составляющие сложной волны будут перемещаться с одинаковой скоростью, и сама сложная волна не будет менять своей формы (не будет "расплываться").

При $\Delta V / \Delta \lambda > 0$ будет выполняться условие $V < u$. При этих условиях показатель преломления среды с ростом частоты уменьшается, поскольку частная производная от фазовой скорости и частная производная от показателя преломления n по длине волны связаны соотношением

$$\frac{\partial V}{\partial \lambda} = -\frac{C}{n^2} \frac{\partial n}{\partial \lambda} \quad (13)$$

Эту зависимость называют нормальной дисперсией. Она проявляется при прохождении света через стёкла и другие прозрачные среды. В этом случае максимумы волн волнового пакета движутся быстрее огибающей. В результате в хвостовой части пакета за счёт сложения волн возникают новые максимумы, которые передвигаются вперёд и пропадают в его головной части.

При $\Delta V / \Delta \lambda < 0$ и $V > u$, показатель преломления возрастает. Эта зависимость характеризует аномальную дисперсию, проявляющуюся в областях спектра, где наблюдается интенсивное поглощение. В этом случае максимумы волн появляются в головной части пакета, перемещаются назад и исчезают в его хвосте. При аномальной дисперсии «если показатель преломления сильно изменяется с частотой ($\partial n / \partial \lambda$ достаточно велико), то может оказаться, что групповая скорость V , формально вычисленная по существующей формуле Рэлея, будет

больше скорости света в вакууме, что противоречит специальной теории относительности». Данная особенность проявляется при прохождении ультракоротких радиоволн через ионосферу.

Во всех случаях ненулевой дисперсии волновой пакет со временем расплывается.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по второму учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «MathCAD – 14».

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Варианты исходных данных для исследований

Вариант №	R , кОм	C , мкФ	φ_0 , град	$K1$	$K2$	$f_{зад}$, МГц	Δf , кГц
1	1,1	9,5	10	1,0	0,55	2,0	100
2	1,2	9,0	20	0,95	0,6	2,1	200
3	1,3	8,5	30	0,9	0,65	2,2	300
4	1,4	8,0	40	0,85	0,7	2,3	400
5	1,5	7,5	50	0,8	0,75	2,4	500
6	1,6	7,0	60	0,75	0,8	2,5	400
7	1,7	6,5	70	0,7	0,85	2,6	300
8	1,8	6,0	80	0,65	0,9	2,7	200
9	1,9	5,5	75	0,6	0,95	2,8	100
10	2,0	5,0	65	0,55	1,0	2,9	150
11	1,9	10	55	1	0,55	3,0	250
12	1,8	10,5	45	0,95	0,6	3,1	350
13	1,7	11,0	35	0,9	0,65	3,2	450
14	1,6	11,5	25	0,85	0,7	3,3	100
15	1,5	12,0	15	0,8	0,75	3,4	200
16	1,4	12,5	5	0,75	0,8	3,5	300
17	1,3	13,0	85	0,7	0,85	3,6	400
18	1,2	13,5	90	0,65	0,9	3,7	500
19	1,1	14,0	100	0,6	0,95	3,8	400
20	1,0	14,5	110	0,55	1,0	3,9	300
21	0,9	15,0	120	1	0,8	4,0	200
22	0,8	15,5	130	0,95	0,85	4,1	100
23	0,7	16,0	140	0,9	0,9	4,2	150
24	0,6	16,5	150	0,85	0,95	4,3	250
25	0,5	17,0	160	0,8	1,0	4,4	350

3. Задание для работы

Базового уровня:

1) Смоделировать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» гармоническую волну и измерить ее характеристики.

2) Смоделировать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD»

затухающий гармонический волновой процесс и исследовать его характеристики.

3) Смоделировать и исследовать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» явление интерференции двух волн.

4) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» волновой пакет и определить его характеристики.

Повышенного уровня:

5) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» процесс дисперсии волны.

6) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» бегущие и стоячие волны в длинной линии.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» гармоническую волну и измерить ее характеристики.

1) Для схемотехнического моделирования гармонической волны собрать в программе «Electronics Workbench» простейшую схему, содержащую источник гармонического (синусоидального) напряжения и осциллограф, выступающий в качестве измерительного прибора. Для того чтобы смоделировать в программе «Electronics Workbench» пространственное распределение волны сделаем допущение – фазовая скорость распространения волны равна 1000 м/с. При этом допущении измеренный с помощью осциллографа период колебания, равный 1 мс, будет соответствовать длине волны – 1 м.

2) Установить в источнике гармоническое (синусоидальное) напряжение, равное 1 В, а также частоту, равную

$$f = 1000 + N_{\text{вар}} \cdot 100, \text{ Гц},$$

где $N_{\text{вар}}$ – номер варианта согласно номеру списка в журнале.

3) Измерить с помощью осциллографа период колебания. Рассчитать длину волны λ с учетом того, что фазовая скорость V распространения волны равна 1000 м/с. Результаты расчетов и измерений занести в отчет по лабораторной работе.

4) Измерить с помощью осциллографа амплитуду A_o волнового процесса. Результат измерения занести в отчет по лабораторной работе.

5) Произвести математическое моделирование незатухающего волнового процесса в программе «MathCAD», воспользовавшись для этого следующими выражениями:

$$A(x) = A_o \sin(\omega t) = A_o \sin\left(\frac{\omega}{V} x\right) = A_o \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right),$$
$$W(x) = \beta^2 A_o^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right).$$

6) В системе компьютерной математики «MathCAD» произвести следующие операции:

- рассчитать максимум плотности энергии волны W при условии, что коэффициент пропорциональности β , зависящий от свойств среды и типа волны, равен 0,5;
 - построить графики волнового гармонического процесса $A(x)$ и распределения плотности энергии волны $W(x)$ от координаты (расстояния) x ;
 - полученные графики и результаты вычислений занести в отчет по лабораторной работе.
- 7) Сделать выводы об исследуемом волновом процессе.

Задание 1.2. Смоделировать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» затухающий гармонический волновой процесс и исследовать его характеристики.

1) Для схемотехнического моделирования затухающего гармонического волнового процесса собрать в программе «Electronics Workbench» схему, приведенную на рис. 1.

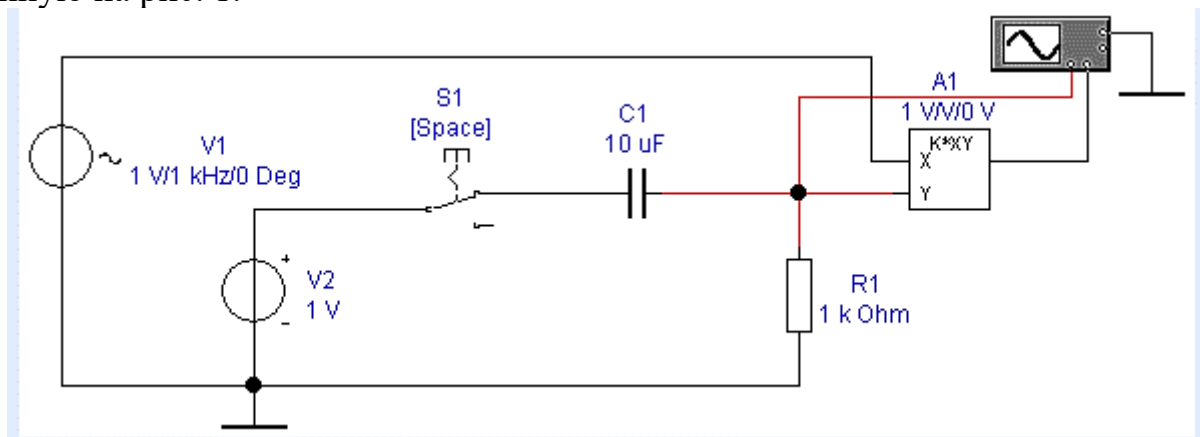


Рис. 1 – Схема моделирования затухающего гармонического волнового процесса

Данное моделирование основано на схемотехнической реализации выражения (6). Схема на рис. 1 содержит:

- источник синусоидального напряжения $V2$, создающий незатухающую гармоническую волну,
- источник постоянного тока $V1$ и RC -цепь, моделирующие множитель ослабления волны в среде распространения;
- аналоговый умножитель $A2$.

В RC -цепи, подключаемой к источнику постоянного тока $V1$, возникает переходной процесс, который имитирует среду распространения волны, приводящую к ее затуханию по экспоненциальному закону. Умножитель $A2$ обеспечивает умножение незатухающего волнового процесса на множитель ослабления волны, вызванный ее затуханием в среде распространения.

2) Изменить параметры RC -цепи, взяв их значения из таблицы 2.1 согласно своему варианту. Установить в источнике $V1$ частоту, равную

$$f = 1000 + N_{\text{вар}} \cdot 100, \text{ Гц},$$

где $N_{\text{вар}}$ – номер варианта согласно номеру списка в журнале.

3) Запустить симулятор EWB так, чтобы ключ **S1** был разомкнут. Замкнуть ключ **S1**, увидев на экране осциллографа затухающий волновой процесс, остановить симулятор EWB. Занести в отчет по лабораторной работе осциллограмму затухающего волнового процесса.

4) Определить с помощью осциллографа по кривой затухания (по первому каналу) расстояния x , на которых волна затухает в e и 10 раз.

5) Провести математическое моделирование затухающего волнового процесса в программе «MathCAD», воспользовавшись для этого формулой:

$$A(x) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cdot \exp^{-\frac{x}{VRC}}.$$

6) В системе компьютерной математики «MathCAD» произвести следующие операции:

- построить график зависимости амплитуды затухающей волны $A(x)$ от координаты (расстояния) x ;
- построить график зависимости величины множителя ослабления от координаты (расстояния) x ;
- отобразить в отчете по лабораторной работе полученные графики;
- рассчитать и занести в отчет коэффициент затухания среды α , воспользовавшись соотношением

$$\exp^{-\alpha \cdot x} = \exp^{-\frac{x}{VRC}}.$$

– определить по графику расстояния x , на которых волна затухает в e и 10 раз, результаты занести в отчет.

7) Сделать выводы об исследуемом волновом процессе.

Задание 1.3. Смоделировать и исследовать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» явление интерференции двух волн.

1) Для схемотехнического моделирования явления интерференции двух волн собрать в программе «Electronics Workbench» схему, приведенную на рис. 2.

Схема содержит два источника $V1$ и $V2$, генерирующих когерентные волны одной частоты, т.е. волны у которых разность фаз не зависит от времени. Процесс затухания амплитуды волн в среде распространения достигается за счет включения в схему масштабирующих звеньев $A1$ и $A2$, аналоговый сумматор $A3$ формирует суммарную волну в точке их наложения.

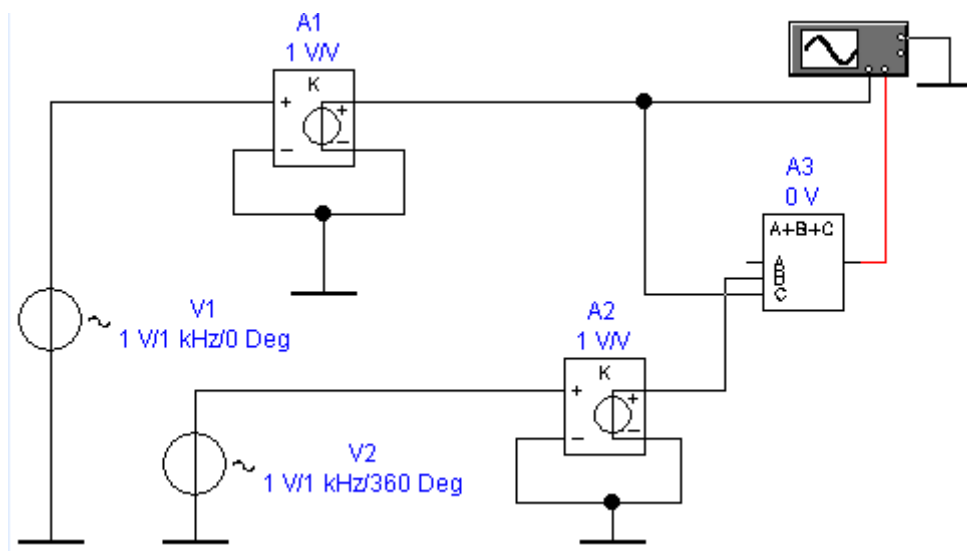


Рис. 2 – Схема моделирования явления интерференции двух волн

2) Установить заданные параметры схемы, взяв их значения из таблицы 1.1 согласно своему варианту. Частота колебаний остается прежней, как в предыдущих заданиях. Заданную начальную фазу φ_0 установить в источнике $V1$, а в источнике $V2$ – $360+\varphi_0$. Заданный коэффициент передачи среды $K1$ установить в масштабирующем звене $A1$, а коэффициент $K2$ – звене $A2$.

3) Запустить симулятор EWB и получить на экране осциллографа по первому каналу – исходное волновое колебание и суммарную волну, полученную вследствие интерференции двух волн. Определить амплитуду результирующей волны. Занести в отчет по лабораторной работе полученные волновые процессы и результаты вычисления.

4) Устанавливая последовательно в источнике $V2$ значения фазы, равные $450+\varphi_0$, $540+\varphi_0$, $630+\varphi_0$, $720+\varphi_0$, получить с помощью осциллографа графики результирующих волн, определив амплитуду колебания. Результаты занести в отчет по лабораторной работе и произвести их сравнительный анализ.

5) Провести в программе «MathCAD» математическое моделирование волны, полученной в результате сложения двух когерентных волн, воспользовавшись для этого формулами:

$$A1(x,\varphi) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{V} x\right), \quad A2(x,\varphi) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{V} x + \varphi\right),$$

$$A(x,\varphi) = A1(x,\varphi) + A2(x,\varphi).$$

6) В системе компьютерной математики «MathCAD» произвести следующие операции:

- построить 3-х мерный график интерференционной картины, установив цикл изменения координаты (расстояния) x от 0 до 4 с шагом 0,05; а цикл изменения разности фаз φ от 0 до 4π с шагом $\pi/36$;

- отобразить в отчете по лабораторной работе 3-х мерный график интерференционной картины.

7) Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.4. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» волновой пакет и определить его характеристики.

1) Для схемотехнического моделирования волнового пакета собрать в программе «Electronics Workbench» схему, приведенную на рис. 2.3. Схема содержит три источника $V1$, $V2$ и $V3$, генерирующих когерентные радиоволны на незначительно различающихся частотах, а также аналоговый сумматор $A1$, формирующий волновой пакет.

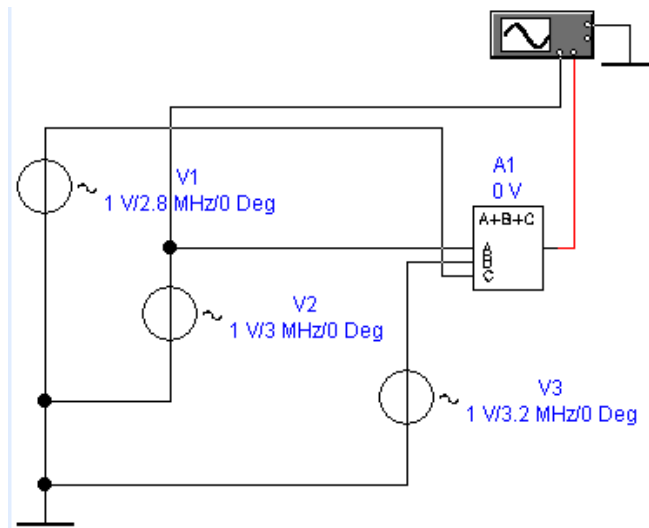


Рис. 3 – Схема моделирования волнового пакета

Данная схема позволяет смоделировать волновой пакет радиоволн, распространяющихся в среде со скоростью $300 \cdot 10^6$ м/с. В этом случае при частоте источника излучения, равной 3 МГц, период колебания 333,3 нс, измеренный в осциллографе, будет соответствовать длине волны – 100 м.

2) Установить заданные параметры схемы, взяв их значения из таблицы 2.1 согласно своему варианту. При этом в источнике $V2$ – установить заданную частоту $f_2 = f_{\text{зад}}$, а в источниках $V1$ и $V3$ – соответственно $f_1 = f_{\text{зад}} - \Delta f/2$ и $f_3 = f_{\text{зад}} + \Delta f/2$.

3) Запустить симулятор EWB и получить на экране осциллографа по второму каналу волновой пакет. Определить с помощью осциллографа амплитуду и длительность волнового пакета, длину его волны. Сравнить длину волны пакета с длиной волны, создаваемой источником $V2$. Занести в отчет по лабораторной работе полученный волновой пакет и результаты измерений.

4) Рассчитать, воспользовавшись выражением (2.11), групповую скорость волнового пакета, результаты расчета занести в отчет.

5) Отсоединить источник $V2$ от аналогового сумматора $A1$, и повторно выполнить задания, указанные в пунктах 3 и 4.

6) Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.5. Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» процесс дисперсии волны.

1) Для схемотехнического моделирования процесса дисперсии волн собрать в программе «Electronics Workbench» схему, приведенную на рис. 4.

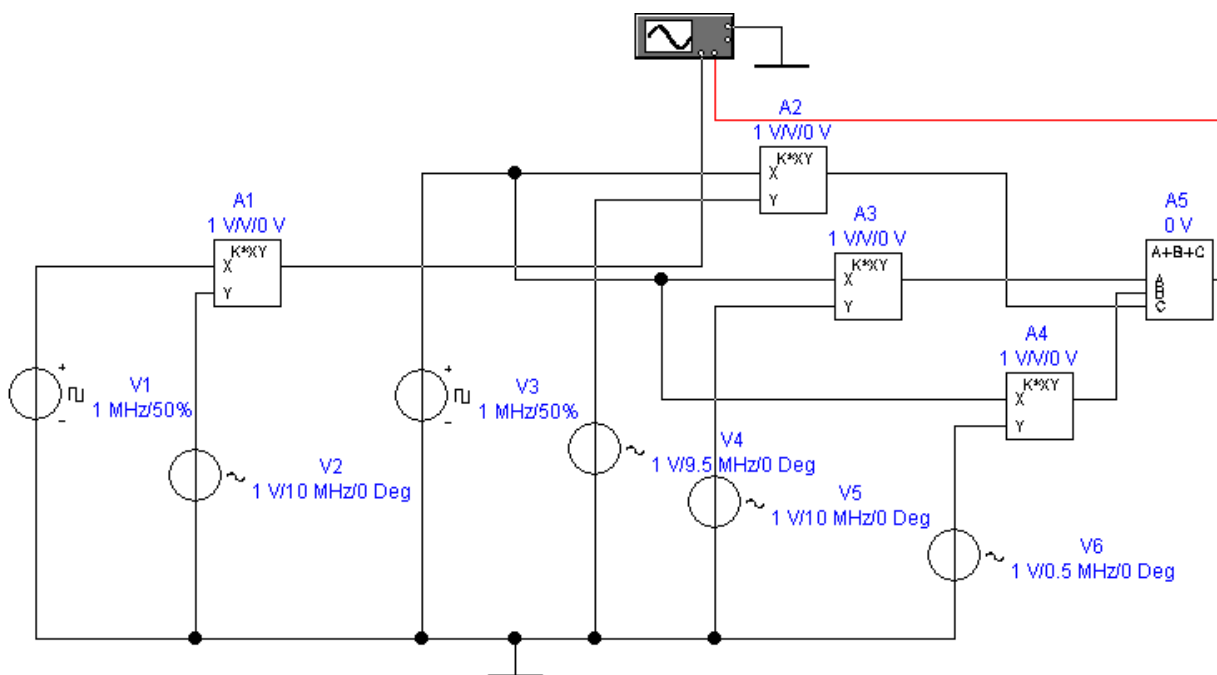


Рис.4 – Схема моделирования процесса дисперсии волн

В данной схеме с помощью генератора прямоугольных импульсов *V1*, гармонического источника волн *V2* и аналогового умножителя *A1* смоделирована последовательность радиоимпульсов, распространяющихся в обычной недиспергирующей среде. Моделирование диспергирующей среды производится с помощью источников *V4 – V6*, аналоговых умножителей *A2 – A4* и аналогового сумматора *A5*. Данная модель имитирует среду, в которой несущая частота радиоимпульса в разных точках пространства изменяется, образуя несколько лучей радиоимпульсов, которые, складываясь в точке приема, приводят к искажению формы исходного радиоимпульса.

Запустить симулятор EWB и убедиться в правильности работы схемы.

2) Установить заданные параметры схемы, взяв их значения из таблицы 2.1 согласно своему варианту. При этом в источниках *V2* и *V5* – установить частоту $f = 10 \cdot f_{\text{зад}}$, а в источниках *V4* и *V6* соответственно $f = 10 \cdot f_{\text{зад}} - 2\Delta f$ и $f = 10 \cdot f_{\text{зад}} + 2\Delta f$.

3) Запустить симулятор EWB и получить на экране осциллографа по второму каналу последовательность радиоимпульсов, прошедших через диспергирующую среду. Занести в отчет по лабораторной работе полученную временную диаграмму. Определить, что произошло с последовательностью радиоимпульсов.

4) Определить, на какую величину изменилась длина волны в процессе дисперсии радиоволн.

5) Изменить величину параметра Δf (изменения частоты в среде) в два раза больше и в два раза меньше заданного. Повторить выполнение заданий по пунктам 3 и 4.

6) Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.6. Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» бегущие и стоячие волны в длинной линии.

1) Для схемотехнического моделирования бегущих волн в длинной линии собрать в программе «Electronics Workbench» схему, приведенную на рис. 5.

В данной схеме в качестве источника, возбуждающего волну выступает источник синусоидального напряжения *V1*. Прямая бегущая волна, распространяющаяся от источника к нагрузке, смоделирована на элементах *V2*, *V3*, *S1*, *C1*, *R1*, *A1* и *A2*. Обратная бегущая волна, распространяющаяся от нагрузки к источнику, смоделирована на элементах *V4*, *V5*, *S2*, *C2*, *R2*, *A3* и *A4*. Процесс затухания прямой волны смоделирован за счет дифференцирующей цепи на элементах *C1* и *R1*, а обратной волны – за счет интегрирующей цепи на элементах *R2* и *C2*. Суммарная бегущая волна создается путем сложения прямой и обратной волны в налоговом сумматоре *A5*.

Собрать указанную схему, запустив симулятор EWB, убедится в правильности ее работы.

2) Установить заданные параметры схемы, взяв их значения для *C* и *R* из таблицы 1.1 согласно своему варианту, а в источнике *V1* – установить частоту, равную

$$f = \frac{1000 + N_{\text{вар}} \cdot 100}{10}, \text{ Гц},$$

где $N_{\text{вар}}$ – номер варианта согласно номеру списка в журнале.

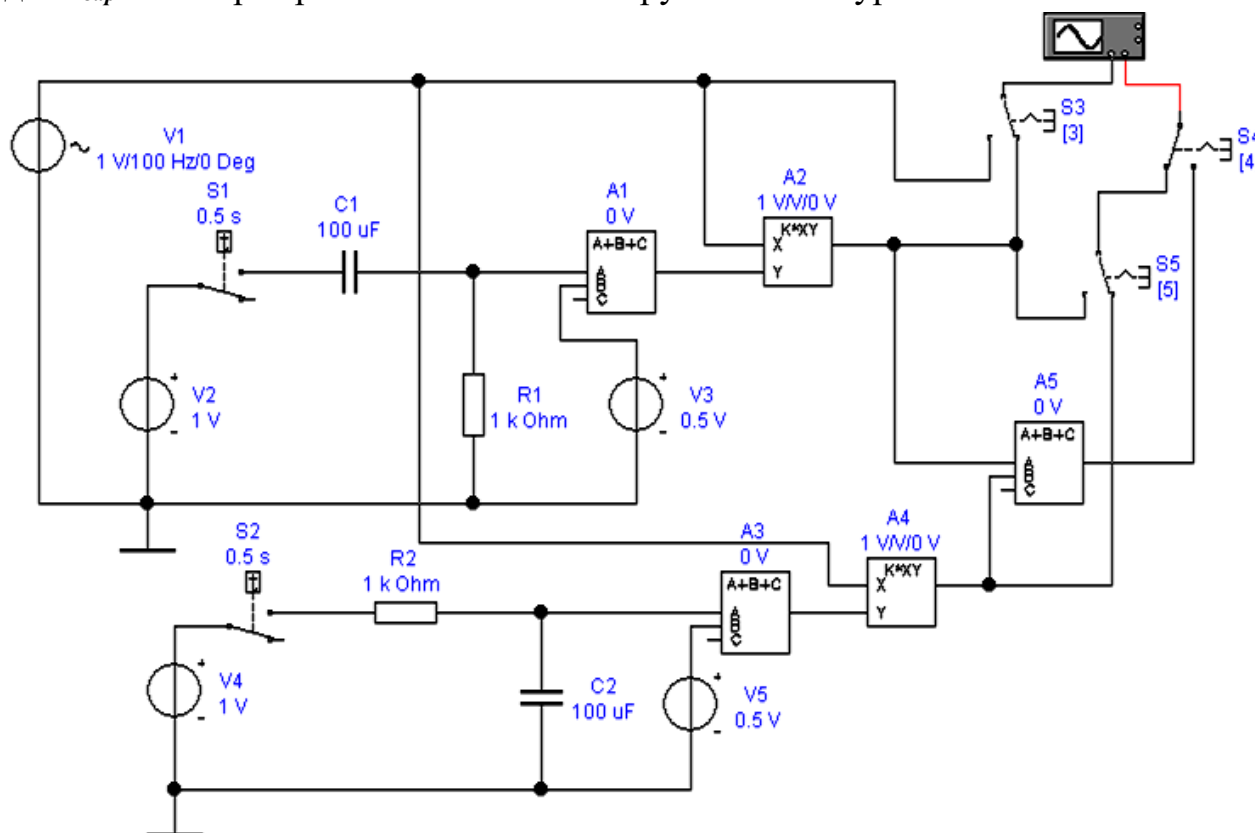


Рис. 5 – Схема моделирования бегущих волн в длинной линии

3) Провести исследование прямой бегущей волны, для этого установив переключатели *S3*, *S4* и *S5* в левое положение, осуществить следующие операции:

- запустить симулятор EWB, а после того как автоматически включаться и затем отключаться переключатели **S1** и **S2**, выключить симулятор;
- первый канал осциллографа настроить на отображение волны источника, занести полученную волну в отчет по лабораторной работе;
- второй канал осциллографа настроить на отображение прямой бегущей волны, занести полученную волну в отчет по лабораторной работе;
- проанализировать полученные волны, определив причины изменения прямой бегущей волны по сравнению с исходной волной источника.

4) Провести исследование прямой и обратной бегущих волн, для этого установив переключатели **S3** и **S5** в правое положение, а **S4** – в левое положение, осуществить следующие операции:

- запустить симулятор EWB, а после того как автоматически включаться и затем отключаться переключатели **S1** и **S2**, выключить симулятор;
- первый канал осциллографа настроить на отображение прямой бегущей волны, занести полученную волну в отчет по лабораторной работе;
- второй канал осциллографа настроить на отображение обратной бегущей волны, занести полученную волну в отчет по лабораторной работе;
- сравнить полученные волны.

5) Провести исследование суммарной волны в длинной линии, для этого установив переключатели **S3** и **S4** в правое положение, осуществить следующие операции:

- запустить симулятор EWB, а после того как автоматически включаться и затем отключаться переключатели **S1** и **S2**, выключить симулятор;
- первый канал осциллографа настроить на отображение прямой бегущей волны, занести полученную волну в отчет по лабораторной работе;
- второй канал осциллографа настроить на отображение суммарной волны, занести полученную волну в отчет по лабораторной работе;
- проанализировать суммарное колебание, определив какой волной оно является.

6) Сделать выводы по результатам проделанной работы.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- моделируемые электрические схемы, с помощью которых производится исследование,
- математические модели (формулы) и результаты расчетов,
- результаты исследований – измеренные параметры, графики волновых процессов;
- 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 и схеме замещения волнового процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ТЕМА 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Занятие 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование электрических полей.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ: ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование электрических полей.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
2. Моделирование и исследование электрических полей.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Расчет поля электрических зарядов.

Материя устроена так, что некоторые элементарные частицы, обладают свойством, которое называется электрический заряд. Это свойство проявляется в силовом взаимодействии элементарных частиц и материальных объектов, состоящих из этих элементарных частиц. Существует два типа электрических зарядов положительные и отрицательные. Положительный заряд у протона и позитрона, отрицательный у электрона. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Величина положительного и отрицательного заряда элементарной частицы одинакова $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кулона (Кл). Если в материальном объекте количество положительных и отрицательных зарядов одинаково, то он квазинейтрален. Электрическое силовое взаимодействие между такими объектами отсутствует.

Электроны более подвижны и электрический заряд материального тела чаще всего связан с недостатком или избытком электронов. Масса электрона $m_e = 0,911 \cdot 10^{-30}$ килограмм (кг). Положительно и отрицательно заряженные тела взаимодействуют так же, как и элементарные частицы. Сила взаимодействия двух тел, обладающих зарядом, рассчитывается с помощью закона Кулона

$$\vec{F}_e = \frac{q_{e1} \cdot q_{e2}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \vec{e}_r. \quad (1.1)$$

В знаменатель выражения входит коэффициент пропорциональности $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ (Ф/м) – электрическая постоянная или диэлектрическая проницаемость вакуума.

Сила, определяющая взаимодействие электрических зарядов, существует в любой точке пространства, поэтому можно говорить о векторном поле электрических сил. Силу, действующую на единичный заряд, назвали напряженностью поля электрических сил, или просто напряженностью электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_{e2}} = \frac{q_{e1}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{В/м}). \quad (1.2)$$

Электрического поля достаточно для описания силы, действующей на неподвижный электрический заряд в вакууме.

Напряженности полей, создаваемых совокупностью отдельных зарядов, складываются геометрически согласно принципу суперпозиции, т.е. независимого наложения полей:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (1.3)$$

В материальной среде эта сила изменяется из-за свойств среды. Поэтому вводят в рассмотрение векторное поле, названное электрической индукцией или полем электрического смещения. В однородных средах вектора и пропорциональны друг другу. Коэффициент пропорциональности называют диэлектрической проницаемостью. Различают абсолютную ϵ_a и относительную ϵ диэлектрическую проницаемость:

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0. \quad (1.4)$$

Электрическая индукция рассчитывается следующим образом:

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E} = \frac{q_e}{4\pi \cdot r^2} \cdot \vec{e}_r \quad (\text{Кл/м}^2). \quad (1.5)$$

Если электрический заряд распределен в некоторой области пространства, то можно ввести плотность электрического заряда Кл/м³, как производную заряда по объему:

$$\rho = \frac{dq}{dV}. \quad (1.6)$$

Полный заряд будет определяться интегрированием по объему, в котором его плотность отличается от нуля, т.е.

$$q = \int_V \rho \, dV. \quad (1.7)$$

В этом случае электрическое поле рассчитывают с помощью закона Гаусса, который входит в систему из четырех уравнений, называемых уравнениями Максвелла для электромагнитного поля. Для точки используют дифференциальную форму закона:

$$\operatorname{div} \varepsilon_a \mathbf{E} = \rho, \quad (1.8)$$

а для поля от заряда, распределенного в некотором объеме V , ограниченном поверхностью S используют интегральную форму закона:

$$\int_V \operatorname{div} \varepsilon_a \mathbf{E} \, dV = \oint_S \varepsilon_o \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = q, \quad (1.9)$$

Эти два соотношения можно пояснить таким образом. Выражение (1.8) утверждает, что электрическое поле в выбранной точке возникает только тогда, когда в этой точке плотность электрического заряда отлична от нуля. Причем, вектор напряженности электрического поля направлен по радиусу от рассматриваемой точки.

Выражение (1.9) имеет несколько иной смысл. Электрический заряд в некотором объеме V , ограниченном поверхностью S определяет суммарную дивергенцию электрического поля в объеме и поток электрического поля через поверхность S , ограничивающую этот объем.

Часто величина электрического заряда изменяется с определенной частотой f , для которой можно ввести круговую частоту $\omega = 2\pi f$. Тогда для расчета электрического поля применим метод комплексных амплитуд, в котором временная зависимость полей считается известной и уравнения (1.7) и (1.8) записываются для комплексной амплитуды электрического поля.

$$\operatorname{div} \varepsilon_{\rightarrow n} \mathbf{E} = \rho, \quad (1.10)$$

$$\int_V \operatorname{div} \varepsilon_{\rightarrow n} \mathbf{E} \, dV = \oint_S \varepsilon_{\rightarrow n} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = q, \quad (1.11)$$

В эти уравнения вошла комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\rightarrow n}$, которая учитывает и диэлектрические свойства среды, и ее проводимость σ

$$\varepsilon_{\rightarrow n} = \varepsilon_a + \frac{\sigma}{i\omega} = \varepsilon_a - i \frac{\sigma}{\omega}. \quad (1.12)$$

Движение заряженных частиц в электрическом поле.

В электрическом поле с напряженностью $\mathbf{E}$ на частицу с массой m и зарядом q действует сила $\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$. Если движение не релятивистское, а поле однородно, то частица движется с постоянным ускорением

$$\mathbf{a} = \frac{q \cdot \mathbf{E}}{m}. \quad (1.13)$$

Такое движение вполне аналогично движению частицы в однородном постоянном гравитационном поле. Для релятивистских движений масса частицы m возрастает со скоростью V , а ускорение – убывает.

Предположим, что заряженные частицы, двигавшиеся первоначально вдоль оси X (рис. 1.1) со скоростью V_0 влетают в электрическое поле плоского конденсатора посередине между его пластинами. Если зазор между пластинами d мал по сравнению с их длиной L , то краевыми эффектами можно пренебречь и считать электрическое поле между пластинами однородным. Направляя ось Y параллельно полю, мы имеем: $E_x=E_z=0$, $E_y=E$.

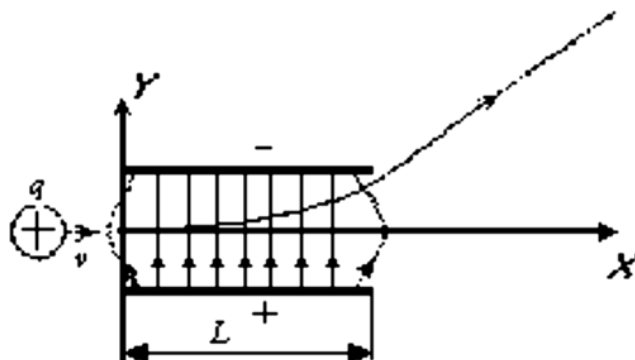


Рис. 1.1 – Движение заряженной частицы в поле плоского конденсатора

Движение частиц в этом случае происходит под действием постоянной силы и подобно движению горизонтально брошенного тела в поле тяжести.

Это означает, что движение частицы, изображенной на рис. 1.1, в общем случае представляет собой равнопеременное криволинейное движение материальной точки. Криволинейность движения обусловлена тем, что на частицу действует с одной стороны первоначальный импульс, вектор которого равен $P = m \cdot V_0$, а с другой стороны сила электрического поля $F = q \cdot E$, направленная перпендикулярно начальному движению частицы. В этом случае помимо тангенсальной составляющей вектора полного ускорения a_t , направленной по касательной к траектории движения, возникает нормальная (центростремительная) составляющая вектора полного ускорения a_n , направленная по нормали к траектории в сторону центра кривизны.

Уравнение равнопеременного движения независимо от его траектории для материальной точки имеет вид:

$$S = S_0 + V_0 \cdot t + \frac{a_t \cdot t^2}{2}, \quad (1.14)$$

где S_0 – расстояние точки от исходного положения в момент начала отсчета или иначе путь, пройденный к моменту $t=0$; V_0 – начальная скорость; a_t – касательное ускорение; t – текущее время.

Поскольку движение равнопеременное, то числовое значение скорости точки в любой момент времени определяется из уравнения

$$V = V_0 + a_t \cdot t, \quad (1.15)$$

Уравнения (1.14) и (1.15) являются основными формулами равнопеременного движения, они содержат шесть различных величин: три постоянные: S_o , V_o , a_t и три переменные: S , V , t . Следовательно, для решения задачи на равнопеременное движение точки в ее условии должно быть дано не менее четырех величин, т.к. систему двух уравнений можно решить лишь в том случае, если они содержат два неизвестных.

Для определения траектории нерелятивистского движения заряженной частицы перемещающейся с постоянной скоростью $V = V_o$ в однородном электрическом поле плоского конденсатора запишем уравнение движения в виде траектории движения вектора силы:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d(m \cdot V)}{dt}. \quad (1.16)$$

Поскольку движение частицы описывается в трехмерной декартовой системе координат и координаты точки x , y , z изменяются с течением времени, то представим уравнение движения в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка в виде проекций вектора силы на оси координат и системы дифференциальных уравнений второго порядка в виде координат точки, т.е.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dF_x}{dt} = \frac{d(m \cdot \frac{\partial V}{\partial x})}{dt} = 0 \\ \frac{dF_y}{dt} = \frac{d(m \cdot \frac{\partial V}{\partial y})}{dt} = q \cdot E \\ \frac{dF_z}{dt} = \frac{d(m \cdot \frac{\partial V}{\partial z})}{dt} = 0 \end{array} \right. \text{ и } \left\{ \begin{array}{l} x'' = \frac{\partial^2 S_x}{\partial x^2} = a \quad x = 0 \\ y'' = \frac{\partial^2 S_y}{\partial y^2} = a_y = \frac{q \cdot E}{m} \\ z'' = \frac{\partial^2 S_z}{\partial z^2} = a_z = 0 \end{array} \right. \quad (1.17)$$

Если рассматривать движение заряженной частицы с релятивистской скоростью в однородном электрическом поле, то масса этой частицы m будет релятивистской, а значит и импульс частицы будет также релятивистским:

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}}, \quad \vec{P} = m \cdot \vec{V} = \frac{m_o V}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}}. \quad (1.18)$$

Аналогично рассмотренному выше случаю для нерелятивистской частицы, запишем систему дифференциальных уравнений второго порядка, решение которой будет описывать траекторию движения релятивистской заряженной частицы в однородном электрическом поле:

$$\begin{cases} x = \frac{\partial^2 S_x}{\partial x^2} = a_x = 0 \\ y = \frac{\partial^2 S_y}{\partial y^2} = a_y = \frac{q \cdot E \left(1 - \frac{y^2}{C^2} \right)^{\frac{3}{2}}}{m_0} \\ z = \frac{\partial^2 S_z}{\partial z^2} = a_z = 0 \end{cases} \quad (1.19)$$

Электростатическое поле заряженной оси

Заряженной осью называется очень тонкий, теоретически бесконечно длинный проводник, несущий на себе заряд. Весь заряд оси указать невозможно (он равен бесконечности), поэтому указывается линейный заряд $\tau = q/l$, т.е. заряд, приходящийся на единицу длины оси. Пусть ось с положительным зарядом τ находится в среде с проницаемостью ϵ_a (см. рис. 1.2).

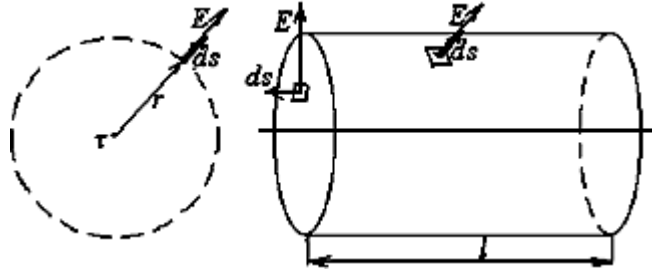


Рис. 1.2 – Заряженная ось

Используя интегральную форму теоремы Гаусса, произведем расчет напряженности поля в произвольной точке, удаленной на расстояние r от оси. С этой целью проведем через данную точку замкнутую поверхность в виде цилиндра длиной l . Поток вектора E имеет место только через боковую поверхность этого цилиндра, поскольку в точках, расположенных на его доньшках векторы E и ds перпендикулярны и их произведение равно нулю. В точках же боковой поверхности векторы E и ds совпадают по направлению и их произведение равно произведению модулей, а модуль E одинаков во всех этих точках в силу симметрии. С учетом сказанного имеем $\oint \vec{E} d\vec{s} = \int E ds = E \int ds = E \cdot 2\pi r l$.

Внутри поверхности интегрирования заряд $q = \tau l$. Поэтому $E \cdot 2\pi r l = \frac{\tau l}{\epsilon_a}$

или

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a r}, \quad (1.20)$$

т.е. напряженность в данном поле изменяется обратно пропорционально расстоянию от оси.

Потенциал поля в произвольной точке, удаленной на расстояние r от оси, равен

$$\varphi = -\int E dr = -\int \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a r} \cdot \frac{dr}{r} = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln r + A = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{1}{r} + A. \quad (1.21)$$

Постоянная интегрирования A зависит от того, где расположить точку с нулевым потенциалом. Следовательно, в данном поле потенциал изменяется по логарифмическому закону.

На практике чаще всего две заряженные оси несут на себе равные по величине и противоположные по знаку заряды τ и $-\tau$. Именно такой случай показан на рис. 1.3.

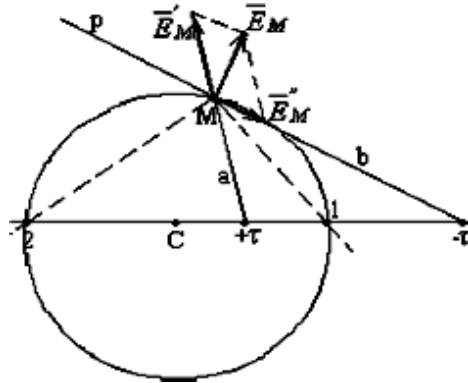


Рис. 1.3 – Две заряженные оси

Возьмем в поле произвольную точку M , положение которой будем характеризовать расстоянием a до положительной оси и расстоянием b до отрицательной оси и в первую очередь рассчитаем в ней напряженность поля, используя метод наложения: $\vec{E}_M = \vec{E}'_M + \vec{E}''_M$, где $\vec{E}'_M$ и $\vec{E}''_M$ – составляющие, создаваемые положительно и отрицательно заряженной осью соответственно. Величины этих составляющих могут быть определены по формулам:

$$E'_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a a}; \quad E''_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a a}. \quad (1.22)$$

Аналогично для потенциала $\varphi_M = \varphi'_M + \varphi''_M$, где

$$\varphi'_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{1}{a} + A; \quad \varphi''_M = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{1}{b} + A. \quad (1.23)$$

Тогда

$$\varphi_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \left(\ln \frac{1}{a} - \ln \frac{1}{b} \right) + A = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b}{a} + A. \quad (1.24)$$

Из выражения (1.24) следует, что совокупность точек, для которых соотношение $b/a = \text{const}$, представляет собой эквипотенциаль. Из геометрии известно, что геометрическим местом точек, отношение расстояний от которых до двух заданных точек является величиной постоянной, есть окружность (теорема Аполлония). Поэтому эквипотенциали в поле двух заряженных осей являются окружностями (см. рис. 1.4).

вода, то $\varphi_1 = \varphi_2$, следовательно, $\frac{d - r_o - x}{r_o - x} = \frac{d + r_o - x}{r_o + x}$. Решая это равенство относительно x , получим

$$x = \frac{d}{2} \pm \sqrt{\frac{d^2}{4} - r_o^2}.$$

В этом выражении при отсчете смещения x от точки O плюс определяет положение точки n , а минус – положение точки m . Если $d \gg r_o$, то $x_1 = 0$, $x_2 = d$, т.е. электрические и геометрические оси совпадают (нет смещения осей). После того, как определено смещение осей, задача сведена к предыдущей.

Перейдем к вопросу о ёмкости двухпроводной линии. Если два проводника разделены диэлектриком и несут на себе равные по величине и противоположные по знаку заряды, то в пространстве между ними создается электростатическое поле. Пусть напряжение между проводниками равно U . Тогда ёмкостью между проводниками называется отношение абсолютной величины заряда на одном из тел к напряжению между ними:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Единица измерения ёмкости – Фарада ($\Phi = \frac{Kл}{B}$). Так как напряжение между телами пропорционально заряду на них, то ёмкость ни от заряда, ни от напряжения не зависит, а зависит она от конфигурации и геометрических размеров тел, их взаимного расположения и от свойств диэлектрика, в котором они находятся. Существуют устройства, предназначенные для получения определенной величины ёмкости – это конденсаторы, однако ёмкостью обладают не только конденсаторы, а всякие два тела, способные нести на себе равные по величине и противоположные по знаку заряды.

Определим ёмкость двухпроводной линии. Заряд одного из проводов $q = \tau l$. Напряжение между проводами равно

$$U = \varphi_1 - \varphi_3 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{d - r_o - x}{r_o - x} - \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{r_o - x}{d - r_o - x} = \frac{\tau}{\pi\epsilon_a} \ln \frac{d - r_o - x}{r_o - x}. \quad (1.26)$$

Тогда ёмкость линии, с учетом условия $d \gg r_o$, т.е. $x = 0$, равна

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\pi \cdot \epsilon_a l}{\ln \left(\frac{d}{r} \right)}. \quad (1.27)$$

Из полученных формул видно, что ёмкость действительно зависит от размеров линии и свойств среды, в которой находятся провода, в частности, если увеличивать расстояние d между проводами, то ёмкость будет уменьшаться.

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 моделирования и исследований приведены в таблицах 1.1 – 1.3.

3. Задание для работы

Базового уровня:

- 1) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского конденсатора.
- 2) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.

Повышенного уровня:

- 3) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле заряженных тонких проводников.

Таблица 1.1 – Исходные данные для задания 4.1.

Вариант	$L, м$	$d, м$	$m_0, кг$	$q, Кл$	$E, В/м$	$V_0, м/с$
1.	1	0,05	$1,7 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$10 \cdot 10^{-14}$	100
2.	1,1	0,06	$1,8 \cdot 10^{-27}$	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$12 \cdot 10^{-14}$	110
3.	1,2	0,07	$1,9 \cdot 10^{-27}$	$4,8 \cdot 10^{-19}$	$14 \cdot 10^{-14}$	120
4.	1,3	0,08	$2 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$16 \cdot 10^{-14}$	130
5.	1,4	0,09	$2,2 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$18 \cdot 10^{-14}$	140
6.	1,5	0,1	$2,5 \cdot 10^{-27}$	$-4,8 \cdot 10^{-19}$	$20 \cdot 10^{-14}$	150
7.	1	0,06	$2,3 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$9 \cdot 10^{-14}$	140
8.	0,9	0,06	$2,1 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$8 \cdot 10^{-14}$	120
9.	0,8	0,05	$1,6 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$7 \cdot 10^{-14}$	100
10.	0,7	0,04	$1,5 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$6 \cdot 10^{-14}$	90
11.	0,6	0,04	$1,4 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^{-14}$	80
12.	0,5	0,03	$1,3 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$6 \cdot 10^{-14}$	70
13.	1	0,06	$1,6 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$7 \cdot 10^{-14}$	110
14.	1,1	0,05	$1,8 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$11 \cdot 10^{-14}$	120
15.	1,2	0,04	$1,9 \cdot 10^{-27}$	$-4,8 \cdot 10^{-19}$	$13 \cdot 10^{-14}$	130
16.	1,3	0,04	$2 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$15 \cdot 10^{-14}$	100
17.	1,4	0,03	$2,1 \cdot 10^{-27}$	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$17 \cdot 10^{-14}$	90
18.	1,5	0,05	$2,2 \cdot 10^{-27}$	$4,8 \cdot 10^{-19}$	$19 \cdot 10^{-14}$	80
19.	1	0,06	$1,7 \cdot 10^{-27}$	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$12 \cdot 10^{-14}$	70
20.	0,9	0,07	$1,5 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$11 \cdot 10^{-14}$	60
21.	0,8	0,08	$1,4 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$10 \cdot 10^{-14}$	50
22.	0,7	0,09	$1,3 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$9 \cdot 10^{-14}$	60
23.	0,6	0,1	$1,2 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$8 \cdot 10^{-14}$	70
24.	0,5	0,06	$1,8 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$7 \cdot 10^{-14}$	80
25.	1,1	0,06	$1,9 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$6 \cdot 10^{-14}$	90

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского

конденсатора.

1. Исходные данные для моделирования – плоский конденсатор длиной L и зазором (расстоянием) между пластин d создает электрическое поле напряженностью E . Заряженная частица массой m_o , обладающая зарядом q , изначально движется со скоростью V_o . Исходные данные для каждого варианта приведены в таблице 1.1.

Начальные условия для решения системы дифференциальных уравнений (1.17). В начальный момент времени $t=0$ координаты частиц равны нулю, т.е. $x_o=y_o=z_o=0$. Скорость частицы в начальный момент времени направлена вдоль оси x , т.е. $x'_o=V_o$, $y'_o=z'_o=0$.

Задача моделирования – получить траекторию движения заряженной частицы в электрическом поле плоского конденсатора.

2. Алгоритм расчета траектории движения в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные для моделирования: L, d, E, m, q, V_o .

2) Решение системы дифференциальных уравнений (1.17) осуществляется с помощью встроенной функции **rkfixed**, использующей для поиска решения метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Для этого задать граничные точки интервала $t1:=0, t2:=100$, на котором будет искаться решение дифференциальных уравнений, и число точек $N:=100$, в которых ищется приближенное решение.

3) Для применения функции **rkfixed** выполнить следующие операции:

– сформировать вектор начальных условий:

$$u := \begin{pmatrix} 0 \\ v_o \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{< } x(0) \text{ - координата частицы в начальный момент времени вдоль оси X} \\ \text{< } x'(0) \text{ - скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси X} \\ \text{< } y(0) \text{ - координата частицы в начальный момент времени вдоль оси Y} \\ \text{< } y'(0) \text{ - скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Y} \\ \text{< } z(0) \text{ - координата частицы в начальный момент времени вдоль оси Z} \\ \text{< } z'(0) \text{ - скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Z} \end{matrix}$$

– сформировать вектор первых и вторых производных:

$$D(t, u) := \begin{pmatrix} \frac{L}{N \cdot t2} \cdot u_1 \\ 0 \\ u_3 \\ \frac{q \cdot E}{m_o} \\ u_5 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{--- } x'(t) \text{ - первая производная } x \text{ по } t \\ \text{--- } x''(t) \text{ - вторая производная } x \text{ по } t \\ \text{--- } y'(t) \text{ - первая производная } y \text{ по } t \\ \text{--- } y''(t) \text{ - вторая производная } y \text{ по } t \\ \text{--- } z'(t) \text{ - первая производная } z \text{ по } t \\ \text{--- } z''(t) \text{ - вторая производная } z \text{ по } t \end{matrix}$$

4) Ввести функцию **rkfixed**

$$Z := rkfixed(u, t1, t2, N, D).$$

Эта функция возвращает матрицу, в которой первый столбец содержит точки t , в которых должны быть найдены решения; остальные столбцы содержат значения решений и их производных, т.е.

	t	x(t)	x'(t)	y(t)	y'(t)	z(t)
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	100	0	0	0
1	1	100	100	$4.706 \cdot 10^8$	$9.412 \cdot 10^8$	0
2	2	200	100	$1.882 \cdot 10^9$	$1.882 \cdot 10^9$	0
3	3	300	100	$4.235 \cdot 10^9$	$2.824 \cdot 10^9$	0
4	4	400	100	$7.529 \cdot 10^9$	$3.765 \cdot 10^9$	0
5	5	500	100	$1.176 \cdot 10^{10}$	$4.706 \cdot 10^9$	0
6	6	600	100	$1.694 \cdot 10^{10}$	$5.647 \cdot 10^9$	0
7	7	700	100	$2.306 \cdot 10^{10}$	$6.588 \cdot 10^9$	0
8	8	800	100	$3.012 \cdot 10^{10}$	$7.529 \cdot 10^9$	0
9	9	900	100	$3.812 \cdot 10^{10}$	$8.471 \cdot 10^9$	0
10	10	$1 \cdot 10^3$	100	$4.706 \cdot 10^{10}$	$9.412 \cdot 10^9$	0

5) Построить траектории движения частицы в электрическом поле конденсатора, т.е. график зависимости $y(x)$, поскольку траектория находится в плоскости XOY. Для этого ввести операторы:

$$x := Z^{(1)} \quad y := Z^{(3)}$$

где оператор $Z^{(n)}$ означает выделение n -го столбца матрицы Z .

На панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → X-Y график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить y , в места ввода переменной x . Задать границы оси абсцисс от 0 до L , а параметры оси ординат – от $-d/2$ до $d/2$.

6) Построить график изменения скорости движения частицы V_y вдоль координаты y . Для этого ввести оператор:

$$V_y := Z^{(4)}$$

На панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → X-Y график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить V_y , в места ввода переменной x . Задать параметры только оси абсцисс от 0 до $d/2$ или $-d/2$.

7) Построить график изменения скорости движения частицы V_y от времени. Для этого ввести оператор

$$T := \frac{Z^{(0)}}{t \cdot N}$$

и график, последовательно нажав на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → X-Y график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить V_y или $-V_y$, а в места ввода переменной x ввести T .

3. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от величины напряженности поля E . Для этого сначала уменьшить заданную напряженность поля в 5 раз, а затем увеличить в 5 раз. Для каждого значения произвести расчет и построить графики зависимости $y(x)$.

4. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от ее начальной скорости движения V_0 . Для этого сначала уменьшить заданную

скорость на 20%, а затем увеличить на 20%. Для каждого значения произвести расчет и построить графики зависимости $y(x)$.

5. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от ее начальной массы m_0 . Для этого сначала уменьшить массу в двое, а затем увеличить в двое. Для каждого значения произвести расчет и построить графики зависимости $y(x)$.

6. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от величины ее заряда q . Для этого сначала уменьшить заряд в двое, а затем увеличить в двое. Для каждого значения произвести расчет и построить графики зависимости $y(x)$.

7. Сделать выводы по результатам, проделанной работы. В выводах отразить, как изменяется траектория движения частицы от изменения ее параметров и параметров поля.

Задание 1.2. Смоделировать и рассчитать электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.

1. Исходные данные для моделирования – набор точечных зарядов до 10 штук, размещенный в трехмерном пространстве, для которого диэлектрическая проницаемость равна $\varepsilon = 1$.

Лабораторное задание выполняется по вариантам. В таблицах 1.2 и 1.3 приведены исходные данные. В каждом варианте задается 4 заряда. В таблице 1.3 с исходными данными для каждого заряда указано его положение – координаты в прямоугольной системе координат (x_1, y_1, z_1) – и величина точечного заряда q в кулонах, умноженная на 10^{-9} .

Задача моделирования – составить программу расчета электрического поля в 10 точках пространства, равномерно распределенных на заданном отрезке прямой, начало и конец которой заданы в табл.1.2, и рассчитать модуль вектора напряженности электрического поля, его проекции на координатные оси.

В отчете привести график изменения электрического поля и его проекций на координатные оси. Расчет провести в 11 точках, равномерно распределенных по прямой линии.

Таблица 1.2 – Координаты отрезка прямой

Вариант	Начало			Конец		
	x1	y1	z1	x2	y2	z2
1	12	14	30	16	18	40
2	8	14	30	12	18	40
3	4	14	30	8	18	40
4	0	14	30	4	18	40
5	-4	14	30	0	18	40
6	-8	14	30	-4	18	40
7	-12	14	30	-8	18	40
8	12	14	30	12	18	40
9	8	14	30	12	18	40
10	4	14	30	8	18	40
11	0	14	30	4	18	40
12	-4	14	30	0	18	40
13	-8	14	30	-4	18	40
14	-12	14	30	-8	18	40
15	12	14	30	16	18	40
16	8	14	30	12	18	40
17	4	14	30	8	18	40
18	0	14	30	4	18	40
19	-4	14	30	0	18	40
20	-8	14	30	-4	18	40
21	-12	14	30	-8	18	40
22	12	14	30	16	18	40
23	8	14	30	12	18	40
24	4	14	30	8	18	40
25	0	14	30	4	18	40
26	-4	14	30	0	18	40

Таблица 1.3 – Исходные данные для задания 4.2

Вариант	№ источн.	Заряд q	x1	y1	z1	Вариант	№ источн.	Заряд q	x1	y1	z1
1	1	$20 \cdot 10^{-9}$	13	-13	22	14	1	$20 \cdot 10^{-9}$	11	-10	21
	2	$15 \cdot 10^{-9}$	13	-12	23		2	$15 \cdot 10^{-9}$	11	-11	22
	3	$30 \cdot 10^{-9}$	13	-11	24		3	$30 \cdot 10^{-9}$	11	-12	23
	4	$25 \cdot 10^{-9}$	13	-10	25		4	$25 \cdot 10^{-9}$	11	-13	24
2	1	$40 \cdot 10^{-9}$	13	-9	23	15	1	$40 \cdot 10^{-9}$	11	-13	22
	2	$10 \cdot 10^{-9}$	13	-8	24		2	$10 \cdot 10^{-9}$	11	-12	23
	3	$25 \cdot 10^{-9}$	13	-7	25		3	$25 \cdot 10^{-9}$	11	-11	24
	4	$30 \cdot 10^{-9}$	13	-6	26		4	$30 \cdot 10^{-9}$	11	-10	25
3	1	$10 \cdot 10^{-9}$	13	-5	24	16	1	$10 \cdot 10^{-9}$	11	-9	23
	2	$15 \cdot 10^{-9}$	13	-4	25		2	$15 \cdot 10^{-9}$	11	-8	24
	3	$10 \cdot 10^{-9}$	13	-3	26		3	$10 \cdot 10^{-9}$	11	-7	25
	4	$25 \cdot 10^{-9}$	13	-2	27		4	$25 \cdot 10^{-9}$	11	-6	26
4	1	$17 \cdot 10^{-9}$	13	-1	25	17	1	$17 \cdot 10^{-9}$	11	-5	24
	2	$29 \cdot 10^{-9}$	13	0	26		2	$29 \cdot 10^{-9}$	11	-4	25
	3	$33 \cdot 10^{-9}$	13	1	27		3	$33 \cdot 10^{-9}$	11	-3	26
	4	$14 \cdot 10^{-9}$	13	2	28		4	$14 \cdot 10^{-9}$	11	-2	27

Вари- ант	№ ис- точн.	Заряд q	x1	y1	z1	Вари- ант	№ ис- точн.	Заряд q	x1	y1	z1
5	1	$40 \cdot 10^{-9}$	13	3	26	18	1	$40 \cdot 10^{-9}$	11	-1	25
	2	$30 \cdot 10^{-9}$	13	4	27		2	$30 \cdot 10^{-9}$	11	0	26
	3	$20 \cdot 10^{-9}$	13	5	28		3	$20 \cdot 10^{-9}$	11	1	27
	4	$10 \cdot 10^{-9}$	13	6	1		4	$10 \cdot 10^{-9}$	11	2	28
6	1	$33 \cdot 10^{-9}$	13	7	27	19	1	$33 \cdot 10^{-9}$	11	3	26
	2	$27 \cdot 10^{-9}$	13	8	28		2	$27 \cdot 10^{-9}$	11	4	27
	3	$18 \cdot 10^{-9}$	13	9	1		3	$18 \cdot 10^{-9}$	11	5	28
	4	$45 \cdot 10^{-9}$	13	10	2		4	$45 \cdot 10^{-9}$	11	6	1
7	1	$14 \cdot 10^{-9}$	13	11	28	20	1	$14 \cdot 10^{-9}$	11	7	27
	2	$12 \cdot 10^{-9}$	13	12	1		2	$12 \cdot 10^{-9}$	11	8	28
	3	$45 \cdot 10^{-9}$	13	13	2		3	$45 \cdot 10^{-9}$	11	9	1
	4	$20 \cdot 10^{-9}$	13	14	3		4	$20 \cdot 10^{-9}$	11	10	2
8	1	$29 \cdot 10^{-9}$	-12	14	15	21	1	$29 \cdot 10^{-9}$	-10	11	28
	2	$19 \cdot 10^{-9}$	-12	13	16		2	$19 \cdot 10^{-9}$	-10	12	1
	3	$22 \cdot 10^{-9}$	-12	12	17		3	$22 \cdot 10^{-9}$	-10	13	2
	4	$30 \cdot 10^{-9}$	-12	11	18		4	$30 \cdot 10^{-9}$	-10	14	3
9	1	$37 \cdot 10^{-9}$	-12	10	16	22	1	$37 \cdot 10^{-9}$	-10	14	1
	2	$24 \cdot 10^{-9}$	-12	9	17		2	$24 \cdot 10^{-9}$	-10	13	2
	3	$16 \cdot 10^{-9}$	-12	8	18		3	$16 \cdot 10^{-9}$	-10	12	3
	4	$45 \cdot 10^{-9}$	-12	7	19		4	$45 \cdot 10^{-9}$	-10	11	4
10	1	$18 \cdot 10^{-9}$	-12	6	17	23	1	$18 \cdot 10^{-9}$	-10	10	2
	2	$26 \cdot 10^{-9}$	-12	5	18		2	$26 \cdot 10^{-9}$	-10	9	3
	3	$14 \cdot 10^{-9}$	-12	4	19		3	$14 \cdot 10^{-9}$	-10	8	4
	4	$30 \cdot 10^{-9}$	-12	3	20		4	$30 \cdot 10^{-9}$	-10	7	5
11	1	$41 \cdot 10^{-9}$	-12	2	18	24	1	$41 \cdot 10^{-9}$	-10	6	3
	2	$14 \cdot 10^{-9}$	-12	1	19		2	$14 \cdot 10^{-9}$	-10	5	4
	3	$14 \cdot 10^{-9}$	-12	0	20		3	$14 \cdot 10^{-9}$	-10	4	5
	4	$25 \cdot 10^{-9}$	-12	-1	21		4	$25 \cdot 10^{-9}$	-10	3	6
12	1	$22 \cdot 10^{-9}$	-12	-2	19	25	1	$22 \cdot 10^{-9}$	-10	2	4
	2	$33 \cdot 10^{-9}$	-12	-3	20		2	$33 \cdot 10^{-9}$	-10	1	5
	3	$44 \cdot 10^{-9}$	-12	-4	21		3	$44 \cdot 10^{-9}$	-10	0	6
	4	$11 \cdot 10^{-9}$	-12	-5	22		4	$11 \cdot 10^{-9}$	-10	-1	7
13	1	$23 \cdot 10^{-9}$	-12	-6	20	26	1	$23 \cdot 10^{-9}$	-10	-2	5
	2	$32 \cdot 10^{-9}$	-12	-7	21		2	$32 \cdot 10^{-9}$	-10	-3	6
	3	$17 \cdot 10^{-9}$	-12	-8	22		3	$17 \cdot 10^{-9}$	-10	-4	7
	4	$19 \cdot 10^{-9}$	-12	-9	23		4	$19 \cdot 10^{-9}$	-10	-5	8

2. Алгоритм расчета поля в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- диэлектрическую проницаемость вакуума или электрическую постоянную $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36 \cdot \pi$;
- относительную диэлектрическую проницаемость среды $\epsilon = I$;
- абсолютную диэлектрическую проницаемость среды $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$;
- массив точек, в которых располагаются заряды, $i = 0 \dots 9$;

– массив точек на прямой линии, в которых необходимо рассчитать электрическое поле, $k = 0...10$;

– координаты xn , yn , zn и величины зарядов q в виде одностолбцовых десяти элементных матриц, при этом в первые четыре элемента всех столбцов вводятся значения в соответствии с заданным вариантом, а остальным элементам присваивается значение 0, например

$$\begin{matrix}
 xn := \begin{pmatrix} -10 \\ -10 \\ -10 \\ -10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &
 yn := \begin{pmatrix} -13 \\ -12 \\ -11 \\ -10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &
 zn := \begin{pmatrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &
 q := \begin{pmatrix} 11 \cdot 10^{-9} \\ 12 \cdot 10^{-9} \\ 13 \cdot 10^{-9} \\ 14 \cdot 10^{-9} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

– координаты начальной и конечной точки прямой, на которой находятся точки для расчета электрического поля $x1=$, $y1=$, $z1=$, $x2=$, $y2=$, $z2=$, взяв их значения из таблицы 1.3.

2) Ввести формулы для промежуточных расчетов:

– координат точек, в которых рассчитывается электрическое поле:

$$xp1_k := x1 + \frac{x2 - x1}{10}k \quad yp1_k := y1 + \frac{y2 - y1}{10}k \quad zp1_k := z1 + \frac{z2 - z1}{10}k ;$$

– проекций на координатные оси расстояний между точками, в которых находятся заряды и точками, для которых рассчитывается электрическое поле

$$dx_{k,i} := xp1_k - xn_i \quad dy_{k,i} := yp1_k - yn_i \quad dz_{k,i} := zp1_k - zn_i ;$$

– расстояний между точками, в которых находятся заряды и точками, для которых рассчитывается электрическое поле

$$r_{k,i} := \sqrt{\{dx_{k,i}\}^2 + \{dy_{k,i}\}^2 + \{dz_{k,i}\}^2} ;$$

– углов, которые составляет радиус вектор r с осями координат x , y , z

$$fix_{k,i} := \arccos\left(\frac{dx_{k,i}}{r_{k,i}}\right) \quad fiy_{k,i} := \arccos\left(\frac{dy_{k,i}}{r_{k,i}}\right) \quad fiz_{k,i} := \arccos\left(\frac{dz_{k,i}}{r_{k,i}}\right)$$

Индексы k, i в приведенных формулах означают, что рассчитывается величина в k -ой точке поля от i -ой точки, размещения заряда.

3) Ввести формулы расчета двумерного массива электрического поля E в точках наблюдения от отдельных источников и массивов его проекций на координатные оси EX, EY, EZ :

$$E_{k,i} := \frac{q_1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot a \cdot (r_{k,i})^2}$$

$$EX_{k,i} := E_{k,i} \cdot \sin\{fix_{k,i}\} \quad EY_{k,i} := E_{k,i} \cdot \sin\{fiy_{k,i}\} \quad EZ_{k,i} := E_{k,i} \cdot \sin\{fiz_{k,i}\}$$

4) Ввести формулы для расчета вектора суммарного поля **EP** от всех зарядов в каждой точке наблюдения, для этого рассчитывается модуль поля, **EPP** его проекции **EPX**, **EPY**, **EPZ** на координатные оси и расстояние **sp** между точками, в которых проводится измерение в плоскости **xoy**, т.е.

$$EP_k := \begin{pmatrix} \sum_i EX_{k,i} \\ \sum_i EY_{k,i} \\ \sum_i EZ_{k,i} \end{pmatrix} \quad sp_k := \sqrt{(xp1_k)^2 + (yp1_k)^2}$$

$$EPX_k := (EP_k)_0 \quad EPY_k := (EP_k)_1 \quad EPZ_k := (EP_k)_2$$

$$EPP_k := \sqrt{(EPX_k)^2 + (EPY_k)^2 + (EPZ_k)^2}$$

5) Отладить файл, созданный в программе MathCAD, на тестовом примере (вариант 26). Для того чтобы проверить, нет ли ошибок в созданной программе, возьмите исходные данные тестового варианта 26. Результаты расчетов по этому варианту представлены ниже.

Результаты некоторых расчетов:

$xp1_k =$	$yp1_k =$	$zp1_k =$	$r_{k,0} =$	$r_{k,1} =$	$r_{k,2} =$
-4	14	30	30.282	30.017	29.816
-3.6	14.4	31	31.399	31.124	30.911
-3.2	14.8	32	32.519	32.235	32.011
-2.8	15.2	33	33.64	33.348	33.113
-2.4	15.6	34	34.764	34.463	34.219
-2	16	35	35.889	35.581	35.327
-1.6	16.4	36	37.015	36.7	36.438
-1.2	16.8	37	38.143	37.822	37.551
-0.8	17.2	38	39.272	38.945	38.666
-0.4	17.6	39	40.402	40.069	39.783
0	18	40	41.533	41.195	40.902

6) Поострить графики зависимости модуля суммарного поля **EPP** от расстояния **sp** и модуля его проекций **EPX** на координатную ось X от координат точек на этой оси. Пример, графиков приведен на рис. 1.2.

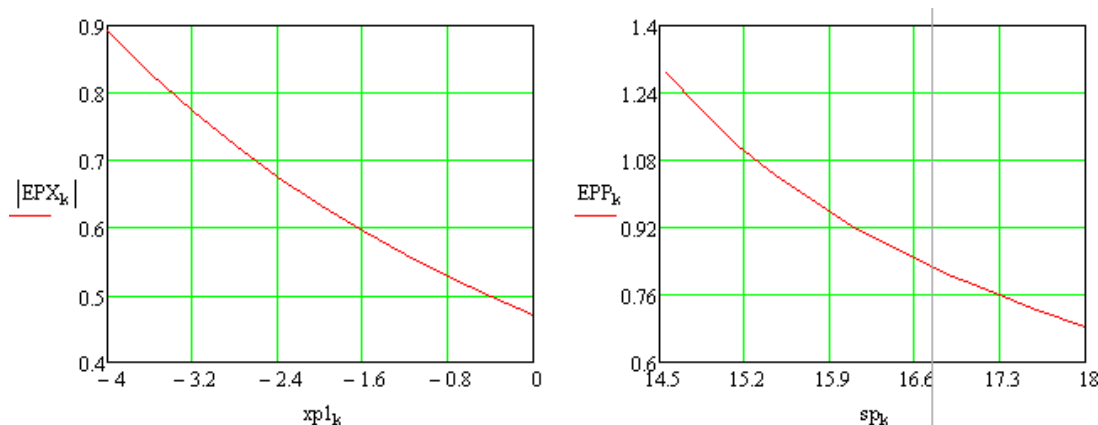


Рис. 1.2

4.2.3. Провести расчета электрического поля с помощью программы в системе «Mathcad» по своему заданному варианту.

- 1) Ввести заданные исходные данные.
- 2) Произвести вычисления.
- 3) Построить графики зависимости модуля суммарного поля **EPP** от расстояния **sp** и модуля его проекций **EPX**, **EPY**, **EPZ** на координатные оси.
4. Провести исследование зависимости суммарного поля от величины зарядов и их числа. Для этого проделать следующие операции:

- 1) Изменить величину одного из заданных зарядов на отрицательно значение. Провести вычисления и построить новый график зависимости модуля суммарного поля **EPP** от расстояния **sp**.

- 2) Взять исходные данные любого другого варианта и внести координаты **xn**, **yn**, **zn** и величины зарядов **q** в одностолбцовые матрицы вместо нулевых элементов. Провести вычисления и построить новый график зависимости модуля суммарного поля **EPP** от расстояния **sp**.

5. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

4.3. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле заряженных тонких проводников.

1. Исходные данные для моделирования: прямой нитевидный проводник длиной $l = 10$ м в фиксированный момент времени имеет линейный заряд, величиной τl . Он располагается в трехмерном пространстве со средой, имеющей относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon=1$. Расположен проводник параллельно оси **z**. В электрическом поле этого проводника располагается другой аналогичный проводник параллельно первому на расстоянии **d**, значительно превосходящем диаметр проводников, следовательно, электрические и геометрические оси проводников совпадают (нет смещения осей). Под действием электрического поля в результате явление электростатической индукции во втором проводнике наводится электрический заряд, а между проводниками возникает электрическая емкость.

Лабораторное задание выполняется по вариантам. В таблице 1.4 приведены конкретные исходные данные, а именно: величина линейного заряда проводника τl в пикокулонах на метр; координаты размещения проводника (**XI**, **YI**)

в плоскости XOY пространства; координаты смещения (ΔX , ΔY) второго проводника относительно первого.

Задача моделирования – составить в системе «Mathcad» программу моделирования электрического поля двух заряженных тонких проводников, позволяющей рассчитывать и отображать эквипотенциальные линии поля, вычислять модули напряженности электрического поля и вектора электрической индукции между проводниками, а также электрическую емкость проводников.

Таблица 1.4 – Исходные данные для задания 4.3.

Вариант	τI, нКл/м	XI, м	YI, м	ΔX, м	ΔY, м
1.	$300 \cdot 10^{-12}$	49	59	5	-1
2.	$280 \cdot 10^{-12}$	47	57	4	0
3.	$260 \cdot 10^{-12}$	45	55	3	-2
4.	$240 \cdot 10^{-12}$	43	53	2	3
5.	$220 \cdot 10^{-12}$	41	51	1	-4
6.	$200 \cdot 10^{-12}$	40	50	2	3
7.	$210 \cdot 10^{-12}$	42	48	3	-2
8.	$230 \cdot 10^{-12}$	44	46	4	1
9.	$250 \cdot 10^{-12}$	46	44	5	0
10.	$270 \cdot 10^{-12}$	48	42	-1	4
11.	$290 \cdot 10^{-12}$	50	40	-2	4
12.	$310 \cdot 10^{-12}$	51	41	-3	2
13.	$330 \cdot 10^{-12}$	53	43	-4	1
14.	$350 \cdot 10^{-12}$	55	45	-5	0
15.	$370 \cdot 10^{-12}$	57	47	-5	-1
16.	$390 \cdot 10^{-12}$	59	49	-4	1
17.	$400 \cdot 10^{-12}$	60	50	-3	2
18.	$380 \cdot 10^{-12}$	58	52	-2	2
19.	$360 \cdot 10^{-12}$	56	54	-1	4
20.	$340 \cdot 10^{-12}$	54	56	-2	-2
21.	$320 \cdot 10^{-12}$	52	58	-3	1
22.	$180 \cdot 10^{-12}$	49	60	3	-3
23.	$190 \cdot 10^{-12}$	47	53	2	2
24.	$410 \cdot 10^{-12}$	45	51	3	2
25.	$420 \cdot 10^{-12}$	40	55	5	-1

2. Алгоритм моделирования электрического поля в системе «Mathcad»:

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

– функцию $ORIGIN=1$ для того, чтобы элементы матриц и массивов нумеровались, начиная с единицы;

- диэлектрическую проницаемость вакуума или электрическую постоянную $\epsilon_0 = 10^{-9}/36 \cdot \pi$;
- относительную диэлектрическую проницаемость среды $\epsilon = 1$;
- абсолютную диэлектрическую проницаемость среды $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$;
- длину проводников $l = 10$ м;
- величину линейного заряда первого проводника $\tau 1$;
- величину линейного заряда второго проводника $\tau 2$ первоначально равную нулю;
- массив точек пространства в плоскости XOY , в которых располагаются проводники , $x = 1 \dots 100$ и $y = 1 \dots 100$;
- координаты первого проводника $X1, Y1$ и координаты смещения $\Delta X, \Delta Y$ второго проводника относительно первого.

2) Ввести формулы для расчетов:

- координат размещения второго проводника

$$X2 := X1 + \Delta X \quad Y2 := Y1 + \Delta Y ;$$

- расстояния между осями проводников:

$$d := \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} ;$$

- расстояний от проводников до точек пространства, в котором определяется электрическое поле

$$r1_{x,y} := \sqrt{(X1 - x)^2 + (Y1 - y)^2} \quad r2_{x,y} := \sqrt{(X2 - x)^2 + (Y2 - y)^2} ;$$

- потенциалов в точках поля, создаваемых каждым проводником

$$U1_{x,y} := \frac{-\tau 1 \cdot \log(r1_{x,y} + 1, e^1)}{2\pi \cdot \epsilon_a} \quad U2_{x,y} := \frac{-\tau 2 \cdot \log(r2_{x,y} + 1, e^1)}{2\pi \cdot \epsilon_a} ;$$

- суммарных потенциалов в точках поля - $U := U1 + U2$;
- разности потенциалов между проводниками

$$\Delta U := U_{X1, Y1} - U_{X2, Y2} ;$$

- модулей напряженности электрического поля и вектора электрической индукции между проводниками

$$E := \frac{\Delta U}{d} \quad D := \epsilon_a \cdot E ;$$

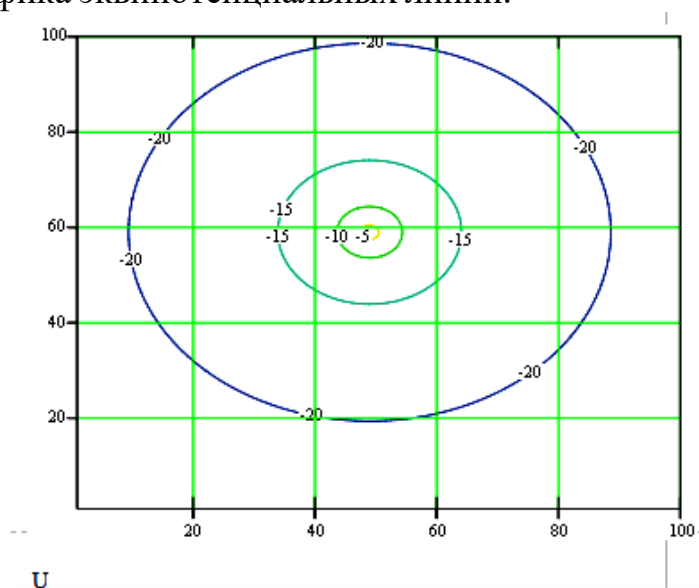
- электрической емкости проводников

$$C := \frac{\tau 1 \cdot l}{\Delta U} .$$

3) Отладить файл, созданный в программе MathCAD. Для проверки правильности работы построить график эквипотенциальных линий электрического поля, создаваемого первым проводником. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка →

График → Линии уровня). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить U .

Пример графика эквипотенциальных линий:



3. Провести исследование смоделированного электрического поля. Для этого выполнить следующие действия:

1) Последовательно устанавливая величину линейного заряда второго проводника τ_2 , равную $-0,5\tau_1$; $-0,6\tau_1$; $-0,7\tau_1$; $-0,8\tau_1$; $-0,9\tau_1$ $-\tau_1$, провести исследования:

- зависимости вида отображения поля от соотношения величин линейных зарядов τ_1/τ_2 проводников, построив графики эквипотенциальных линий электрического поля, создаваемого двумя тонкими заряженными проводниками;

- зависимости модуля напряженности поля E между проводниками от соотношения величин линейных зарядов τ_1/τ_2 проводников, построив соответствующий график;

- зависимости модуля вектора электрической индукции поля D между проводниками от соотношения величин линейных зарядов τ_1/τ_2 проводников, построив соответствующий график;

- зависимости величины емкости электрического проводников C от соотношения величин их линейных зарядов τ_1/τ_2 , построив соответствующий график.

2) Провести исследование зависимости электрической емкости заряженных проводников от их геометрических замеров и свойств среды.

- для этого установить следующие исходные данные: $\tau_2 = -\tau_1$, $\Delta Y = 0$;
- изменяя расстояние ΔX от 1 до 10, построить график зависимости электрической емкости C от расстояния между проводниками d ;
- установить $\Delta X = 1$, изменяя длину проводников от 1 до 10 м, построить график зависимости электрической емкости C от длины проводников l ;

– установить $l = 10$, изменяя величину относительной диэлектрической проницаемости ϵ среды между проводниками от 1 до 10, построить график зависимости электрической емкости C от абсолютной диэлектрической проницаемости среды ϵ_a .

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 – формулы, описывающие электрическое поле, полученные результаты и графики;
- выводы о проделанной работе, с разъяснением физического смысла полученных результатов.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма [Электронный ресурс] / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники [Электронный ресурс] / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ТЕМА 6 МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И МАГНИТНЫЕ НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ

Занятие 6 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

ВРЕМЯ – 4 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование магнитных полей.
2. Моделирование и исследование явления электромагнитной индукции.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование магнитных полей.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
2. Моделирование и исследование явления электромагнитной индукции.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Движение заряженных частиц в магнитном поле.

В постоянном магнитном поле на заряженную частицу действует сила Лоренца

$$\mathbf{F}_L = q[\vec{v} \cdot \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Эта сила перпендикулярна к скорости $\mathbf{v}$ движения частицы, а потому работы не производит. Она только искривляет траекторию, но не изменяет величину скорости частицы. Не меняется, следовательно, и масса частицы m .

Рассмотрим случай однородного магнитного поля. Если скорость частицы направлена вдоль поля $\mathbf{B}$, то сила $\mathbf{F}_L$ обратится в нуль и частица будет двигаться прямолинейно с постоянной скоростью. Это вызвано тем, что векторное произведение сонаправленных векторов равно нулю.

Если же частица движется перпендикулярно к магнитному полю, то ее скорость, оставаясь постоянной по величине, меняется по направлению. Сила Лоренца $\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}]$ в этом случае максимальна и постоянна по величине

и нормальна к траектории частицы. По второму закону Ньютона, сила Лоренца создает центростремительное ускорение, направленное к центру окружности.

Отсюда следует, что траекторией частицы будет окружность, плоскость которой перпендикулярна к магнитному полю. Направление вращения частицы в зависимости от знака заряда по окружности показано на рис. 2.1. На рисунке магнитное поле направлено к читателю, в этом случае положительно заряженная частица будет вращаться против часовой стрелки, а отрицательно заряженная частица – по часовой стрелки. Или иначе по правилу правого буравчика, если заряд q положителен, то направления вектора $\mathbf{B}$ и угловой скорости вращения ω противоположны. Если же заряд q отрицателен, то эти направления совпадают.

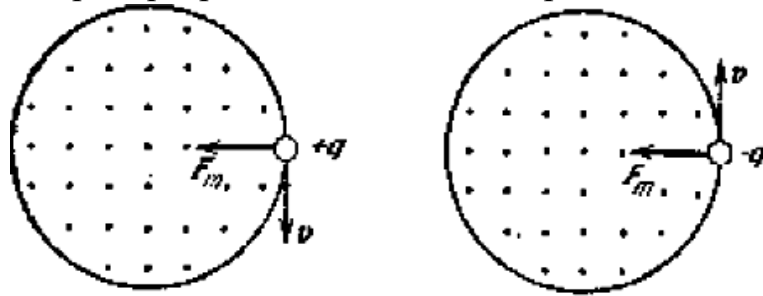


Рис. 1 – Движение частицы в магнитном поле по окружности

Радиус окружности r , называемый циклотронным радиусом, находится по второму закону Ньютона, описывающему движение материальной частицы, из условия – сила Лоренца, приложенная к частице, равна произведению массы частицы на ее центростремительное ускорение, т.е.

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}. \quad (2)$$

Следовательно, радиус окружности пропорционален скорости движения частицы

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}, \quad (3)$$

отношение q/m - называют удельным зарядом частицы.

При скорости v , намного меньшей скорости света, круговая частота ω не зависит от v , т.е.

$$\omega = \frac{|q| \cdot B}{m}. \quad (4)$$

Период вращения частицы, т.е. время T , за которое она совершает один полный оборот, равен

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{|q| \cdot B}, \quad (5)$$

т.е. период вращения не зависит от скорости частицы и радиуса траектории.

В общем виде, скорость заряженной частицы V направлена под углом α , не равным 90° , к вектору магнитной индукции $\mathbf{B}$ (см. рис. 2.2).

В этом случае движение частицы можно представить в виде суперпозиции:

1) прямолинейного равномерного движения вдоль силовых линий поля со скоростью, равной ее параллельной проекции, т.е. $V_{||} = V \cos \alpha$;

2) равномерного движения по окружности в плоскости, перпендикулярной полю, со скоростью, равной ее перпендикулярной проекции, т.е. $V_{\perp} = V \sin \alpha$; при этом радиус окружности определяется формулой

$$r = \frac{m \cdot v \cdot \sin \alpha}{q \cdot B}, \quad (6)$$

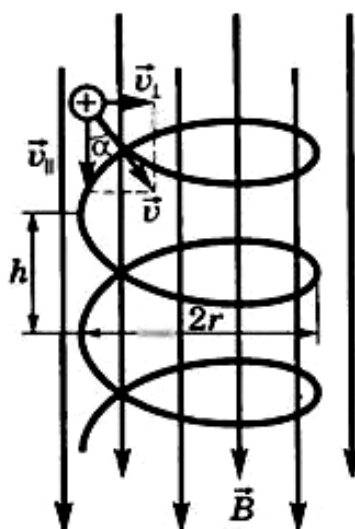


Рис. 2 – Движение заряженной частицы в магнитном поле по спирали

В результате сложения двух данных движений возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю (см. рис. 2). Шаг винтовой (спиральной) линии равен

$$h = v \cos \alpha \cdot T = \frac{2\pi \cdot m \cdot v \cdot \cos \alpha}{q \cdot B}. \quad (7)$$

Направление, в котором закручивается спираль, зависит от знака заряда частицы.

Если скорость заряженной частицы составляет угол α с направлением вектора B неоднородного магнитного поля, индукция которого возрастает в направлении движения частицы, то радиус r и шаг спирали h уменьшаются с ростом B . На этом основана фокусировка заряженных частиц в магнитном поле.

Если на движущуюся заряженную частицу помимо магнитного поля с индукцией B действует одновременно и электростатическое поле с напряженностью E , то равнодействующая сила, приложенная к частице, равна векторной сумме электрической силы и силы Лоренца: $\vec{F}_e = \vec{F}_L$. Характер движения и вид траектории зависят в данном случае от соотношения этих сил и от направления электростатического и магнитного полей.

Предположим, что заряженная частица в магнитном двигается первоначально вдоль оси X со скоростью V_0 , а вектор B направлен вдоль оси Y (т.е.

$V_{ox}=V_o$, $V_{oy}=V_{oz}=0$, $B_x=B_z=0$, $B_y=B$). Тогда уравнение движения частицы в виде траектории движения вектора силы будет иметь вид

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}, \vec{B}] = q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ 0 & B & 0 \end{vmatrix} = -\vec{i} B \dot{z} q + \vec{k} B \dot{x} q \quad (8)$$

Раскрывая данное уравнение, получим систему дифференциальных уравнений первого и второго порядка, решения которой будут описывать траекторию движения частицы:

$$\begin{cases} \frac{d(m_0 \cdot \dot{x})}{dt} = -B \dot{z} q \\ \frac{d(m_0 \cdot \dot{y})}{dt} = 0 \\ \frac{d(m_0 \cdot \dot{z})}{dt} = B \dot{x} q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ddot{x} = -\frac{qB}{m_0} \dot{z} \\ \ddot{y} = 0 \\ \ddot{z} = \frac{qB}{m_0} \dot{x} \end{cases} \quad (9)$$

Расчет магнитного поля, создаваемого электрическим током (третье уравнение Максвелла)

Из опытов было установлено, что два проводника с током, расположенные неподалеку друг от друга притягиваются или отталкиваются подобно тому, как притягиваются или отталкиваются электрические заряды. Так, если вблизи бесконечно длинного проводника с током I_1 на расстоянии r параллельно ему поместить проводник длиной ℓ_2 с током I_2 , то на него будет действовать сила:

$$F = \frac{\mu_a I_1}{2\pi r} I_2 \ell_2 \quad (10)$$

Проводники будут притягиваться друг к другу, если токи идут в разных направлениях, или отталкиваться, если токи идут в одном направлении. В выражение входит коэффициент пропорциональности, μ_a генри/метр (Гн/м). Это магнитная постоянная или магнитная проницаемость. Различают абсолютную μ_a , относительную μ магнитную проницаемость и магнитную проницаемость вакуума $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} = 1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.,

$$\mu_a = \mu \mu_0 \quad (11)$$

Сила, действующая на отрезок провода длиной 1м с током 1А называется магнитной индукцией. Бесконечно длинный провод с током I_1 создает на расстоянии r магнитную индукцию

$$\vec{B} = \frac{\mu_a I_1}{2\pi r} [\vec{e}_{\ell 1} \times \vec{e}_r] \text{ тесла (Тл)}. \quad (12)$$

Вместе с магнитной индукцией вводят напряженность магнитного поля H . Напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией через магнитную проницаемость

$$\bar{H} = \bar{B} / \mu_a \text{ (A/M)} \quad (13)$$

Если электрический ток распределен по сечению проводника, то для расчета полей нужно перейти к плотности тока

$$\bar{j}_\Sigma = dI/dS \cdot \bar{e}_S \quad (14)$$

Вектор $\bar{e}_S$ – единичный вектор, направленный перпендикулярно поперечному сечению проводника. Он необходим для того, чтобы из скалярной величины тока I получить векторную величину для плотности тока $\bar{j}$. В этом случае магнитное поле рассчитывается с помощью закона полного тока, который еще называют третьим уравнением Максвелла. Для точки используют дифференциальную форму закона:

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{j}_\Sigma + \epsilon_a \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (15)$$

а для поля от тока, распределенного по некоторой площади S , ограниченной кривой L используют интегральную форму закона:

$$\int_S \text{rot } \bar{H} d\bar{S} = \oint_L \bar{H} d\bar{l} = I_\Sigma + \epsilon_a \int_S \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} d\bar{S} \quad (16)$$

Анализ соотношений (15) и (16) показывает, что они выглядят несколько сложнее выражений для расчета электрического поля. Это связано с двумя причинами. Во-первых, в левой части уравнения (15) стоит операция нахождения ротора, а эта операция сложнее операции расчета дивергенции (см. 1.8). Магнитное поле направлено перпендикулярно к току и направлению от точки, в которой проводится расчет. Плотность тока не является источником расходящегося из этой точки магнитного поля, а определяет вращательную его составляющую. Эта операция ближе к векторному произведению, а не скалярному. Действительно, если в прямоугольной системе координат ввести фиктивный вектор с проекциями

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

то левую часть уравнения (8) можно представить в виде скалярного произведения $\epsilon_a \bar{\nabla} \bar{E}$, а левую часть уравнения (15) в виде векторного произведения $\bar{\nabla} \times \bar{H}$.

Во-вторых, в уравнении (16) в правой части кроме плотности тока присутствует еще одно слагаемое:

$$\bar{j}_{\Sigma \text{ см}} = \epsilon_a \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (17)$$

Из структуры выражения (16) следует считать эту величину еще одним видом тока. Ее называют током смещения. Таким, образом, магнитное поле создается током проводимости или током смещения.

Процесс возникновения магнитного поля от второго слагаемого в правой части выражения (15) можно рассмотреть и по-другому. Магнитное поле возникает тогда, когда есть ток или изменяющееся электрическое поле. Изменяющееся электрическое поле создает переменное магнитное поле. Такой процесс можно назвать индукцией. Впрочем, электромагнитной индукцией принято называть обратный процесс – возникновение электрического поля при изменении магнитного.

Выражения для расчета магнитного поля (15) и (16) можно записать для переменных токов, изменяющихся с определенной круговой частотой, воспользовавшись методом комплексных амплитуд.

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + i\omega \underline{\epsilon}_n \vec{E} \quad (18)$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \vec{I}_z + i\omega \int_S \underline{\epsilon}_n \vec{E} d\vec{S} \quad (19)$$

Итак, получено уравнение Максвелла, позволяющие рассчитать магнитное поле, создаваемое электрическими токами проводимости и смещения.

Применим принцип перестановочной двойственности к третьему уравнению Максвелла и запишем закон электромагнитной индукции последовательно в дифференциальной (20), интегральной (21) форме и для комплексной амплитуды напряженности полей (22), (23).

$$\text{rot} \vec{E} = -\vec{j}_m - \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (20)$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -I_m - \mu_0 \int_S \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} d\vec{S} \quad (21)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\vec{j}_m - i\omega \underline{\mu}_n \vec{H} \quad (22)$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\vec{I}_m - i\omega \int_S \underline{\mu}_n \vec{H} d\vec{S} \quad (23)$$

Методические рекомендации по решению практических задач

Рассмотрим методику расчета магнитного поля, создаваемого набором проводников с током, в области пространства описываемого координатами x, y .

Представим, что через точку a , описываемую координатами x_n и y_n , и точку $b(x_k, y_k)$ проходит проводник с током I_l (см. рис. 3). Необходимо рассчитать магнитное поле в точке c .

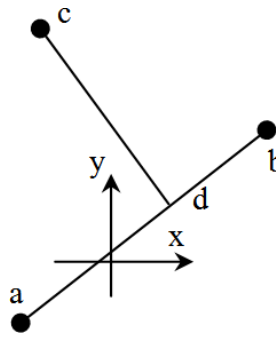


Рис. 3.

Магнитная индукция для бесконечного проводника с током рассчитывается из соотношения

$$\vec{B} := \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} [\vec{e}_l \times \vec{e}_r] \quad (24).$$

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ представляет собой векторное произведение и направлен перпендикулярно двум прямым ab и cd (см. рис. 3). Одна из них (ab) – проводник, по которому проходит ток. Вторая (cd) – перпендикуляр, опущенный из точки, в которой рассчитывается магнитная индукция на эту прямую. Расположим эти обе прямые в плоскости чертежа (см. рисунок). Тогда магнитная индукция в точке c будет всегда направлена перпендикулярно плоскости чертежа.

По ходу вычисления нужно найти расстояние между точкой, в которой рассчитывается индукция (c) и прямой по которой проходит ток (ab). Для этого выполним две операции:

- 1) составим уравнение прямой – проводника с током;
- 2) определим расстояние от выбранной точки до этой прямой.

Уравнение прямой на плоскости в общем виде имеет вид: $Ax + By + C = 0$, где A, B, C – постоянные коэффициенты. Если прямая проходит через две точки с координатами начальной точки (x_n, y_n) и конечной точки (x_k, y_k) , то ее уравнение можно записать так:

$$x(y_k - y_n) + y(x_n - x_k) + (x_k y_n - x_n y_k) = 0, \quad (25)$$

т.е. $A = (y_k - y_n)$; $B = (x_n - x_k)$; $C = (x_k y_n - x_n y_k)$.

Расстояние от точки, для которой проводится расчет, с координатами (x_p, y_p) , до прямой – проводника с током находится по формуле

$$r(x_p, y_p) := \pm \frac{Ax_p + By_p + C}{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot (-\text{sign}C)}. \quad (26)$$

Итак, все величины в выражении (24) для расчета магнитного поля определены. Если магнитное поле в расчетной точке создается за счет токов, протекающих по нескольким проводникам, то величина магнитной индукции в точке определяется по принципу суперпозиции, как сумма магнитных индукций от каждого источника поля, т.е.

$$BS(x_p, y_p) := \sum_i BI(x_p, y_p)_i \quad (27)$$

Если в переменное магнитное поле поместить проводящий контур, то в нем возникнет ЭДС. Рассмотрим методику расчета электродвижущей силы, созданной переменным магнитным полем в контуре.

Воспользуемся выражением (2.21), на основании которого запишем

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\dot{I}_M - i\omega \int_S \mu_0 \vec{H} d\vec{S} = -\dot{I}_M - i\omega \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (28)$$

В левой части равенства стоит выражение, которое и определяет электродвижущую силу. Первое слагаемое в правой части – магнитный ток. Если в условии задачи он отсутствует, то он равен нулю. Второе слагаемое должно быть использовано для расчета. Для расчета интеграла необходимо определить значения магнитной индукции в каждой точке поверхности, ограниченной контуром. Если пространство ограничивается прямоугольным контуром, в котором в $(ixm \times iym)$ числе точек подсчитана магнитная индукция, то интеграл можно заменить суммой по поверхности прямоугольника площадью $x1 \times y1$, т.е.

$$\frac{1}{-i\omega} \oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \vec{B} d\vec{S} \approx \sum_k B_k \Delta S_k = \Delta S \sum_k B_k = \frac{x1 \cdot y1}{ixm \cdot iym} \sum_k B_k \quad (29)$$

Тогда для расчета ЭДС нужно ввести выражение:

$$E = -i\omega \frac{x1 * y1}{ixm * iym} \sum_{ix} \sum_{iy} B_{S_{ix,iy}} \quad (30)$$

Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:

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

2. Исходные данные для моделирования и исследования

Варианты заданий для моделирования и исследований приведены в таблицах 1.1 – 1.3.

Таблица 1.1 – Координаты отрезка прямой

Вариант	Начало			Конец		
	x1	y1	z1	x2	y2	z2
1	12	14	30	16	18	40
2	8	14	30	12	18	40
3	4	14	30	8	18	40
4	0	14	30	4	18	40
5	-4	14	30	0	18	40
6	-8	14	30	-4	18	40
7	-12	14	30	-8	18	40
8	12	14	30	12	18	40
9	8	14	30	12	18	40
10	4	14	30	8	18	40
11	0	14	30	4	18	40
12	-4	14	30	0	18	40
13	-8	14	30	-4	18	40
14	-12	14	30	-8	18	40
15	12	14	30	16	18	40
16	8	14	30	12	18	40
17	4	14	30	8	18	40
18	0	14	30	4	18	40
19	-4	14	30	0	18	40
20	-8	14	30	-4	18	40
21	-12	14	30	-8	18	40
22	12	14	30	16	18	40
23	8	14	30	12	18	40
24	4	14	30	8	18	40
25	0	14	30	4	18	40
26	-4	14	30	0	18	40

3. Задание для работы

Базового уровня:

- 1) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в магнитном поле.
- 2) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» магнитное поле от дискретного набора постоянных электрических токов.

Повышенного уровня:

- 3) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в магнитном поле.

1. **Исходные данные для моделирования** – в трехмерном пространстве существует однородное магнитное поле, у которого вектор магнитной индукции $\mathbf{B}$ направлен в вдоль оси Y . В пространство поля попадает заряженная частица массой m_0 , обладающая зарядом q , движущаяся с нерелятивистской скоростью V_0 под углом α к магнитному полю. В начальный момент времени координаты частицы были равными нулю.

Задача моделирования – в системе «Mathcad» получить траекторию движения заряженной частицы в однородном магнитном поле, рассчитать силу Лоренца, радиус окружности и шаг винтовой траектории движения заряда.

Исходные данные для моделирования по каждому варианту приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Исходные данные для моделирования.

Вариант	m_0, кг	q, Кл	B, В/м	V_0, м/с	α, град
1.	$1,7 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$10 \cdot 10^{-8}$	1000	40
2.	$1,8 \cdot 10^{-27}$	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$9 \cdot 10^{-8}$	1100	50
3.	$1,9 \cdot 10^{-27}$	$4,8 \cdot 10^{-19}$	$8 \cdot 10^{-8}$	1200	30
4.	$2 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$7 \cdot 10^{-8}$	1300	40
5.	$2,2 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$6 \cdot 10^{-8}$	1400	50
6.	$2,5 \cdot 10^{-27}$	$-4,8 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^{-8}$	1500	60
7.	$2,3 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$4 \cdot 10^{-8}$	1400	70
8.	$2,1 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$3 \cdot 10^{-8}$	1200	80
9.	$1,6 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$2 \cdot 10^{-8}$	1000	70
10.	$1,5 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-8}$	900	60
11.	$1,4 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	800	50
12.	$1,3 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	700	40
13.	$1,6 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	1100	50
14.	$1,8 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	1200	65
15.	$1,9 \cdot 10^{-27}$	$-4,8 \cdot 10^{-19}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$	1300	85
16.	$2 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	1000	45
17.	$2,1 \cdot 10^{-27}$	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	900	55
18.	$2,2 \cdot 10^{-27}$	$4,8 \cdot 10^{-19}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	800	35
19.	$1,7 \cdot 10^{-27}$	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$	700	45
20.	$1,5 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	600	55
21.	$1,4 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	500	65
22.	$1,3 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$6,6 \cdot 10^{-8}$	600	75
23.	$1,2 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$	700	85
24.	$1,8 \cdot 10^{-27}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$3,8 \cdot 10^{-8}$	800	75
25.	$1,9 \cdot 10^{-27}$	$-3,2 \cdot 10^{-19}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	900	65

2. Алгоритм моделирования в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные по своему варианту: B , m_0 , q , V_0 , α .

2) Задать граничные точки интервала $t1 := 0$, $t2 := 10$, на котором будет искать решение дифференциальных уравнений (9) для определения траектории движения заряда, а также число точек $N := 1000$, в которых приближенно ищется это решение.

3) Ввести операторы для расчета проекций вектора скорости на оси координат:

$$V_x = V_0 \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) \quad V_y = V_0 \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) \quad V_z = 0.$$

Ввести вектор скорости в виде

$$V = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}.$$

4) Ввести оператор для расчета вектора силы Лоренца:

$$F = |q| \cdot V \cdot B.$$

5) Сформировать вектор начальных условий для решения системы дифференциальных уравнений (9):

$$u = \begin{pmatrix} 0 \\ V_x \\ 0 \\ V_y \\ 0 \\ V_z \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \text{координаты частицы в начальный момент времени по оси X,} \\ \leftarrow \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси X,} \\ \leftarrow \text{координаты частицы в начальный момент времени по оси Y,} \\ \leftarrow \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Y,} \\ \leftarrow \text{координаты частицы в начальный момент времени по оси Z,} \\ \leftarrow \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Z.} \end{array}$$

6) Сформировать вектор первых и вторых производных для решения системы дифференциальных уравнений (2.9):

$$D(t, u) = \begin{pmatrix} u_1 \\ -B \cdot q \\ \frac{mo}{u_3} \cdot u_5 \\ u_3 \\ 0 \\ \frac{B \cdot q}{mo} \cdot u \\ 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow x(t) - \text{первая производная } x \text{ по } t, \\ \leftarrow x''(t) - \text{вторая производная } x \text{ по } t, \\ \leftarrow y'(t) - \text{первая производная } y \text{ по } t, \\ \leftarrow y''(t) - \text{вторая производная } y \text{ по } t, \\ \leftarrow z'(t) - \text{первая производная } z \text{ по } t, \\ \leftarrow z''(t) - \text{вторая производная } z \text{ по } t. \end{array}$$

7) Для решения системы дифференциальных уравнений (9) методом Рунге-Кутты четвертого порядка ввести функцию *rkfixed*. Она вычисляет матрицу, первый столбец которой содержит точки, в которых должны быть найдены решения, а остальные столбцы содержат значения решений (координаты) и их первых производных:

$$Z = rkfixed(u, t1, t2, N, D).$$

8) Ввести операторы для расчета радиуса *R* окружности траектории движения заряда и шага *h* винтовой (спиральной) линии траектории движения, а также циклической частоты ω вращения:

$$R = \frac{mo \cdot V_x}{|q| \cdot B} \quad h = \frac{2\pi \cdot mo \cdot V_y}{|q| \cdot B}, \quad .$$

9) Для построения траектории движения частицы ввести операторы, определяющие координаты:

$$x = Z^{\langle 1 \rangle}, \quad y = Z^{\langle 3 \rangle}, \quad z = Z^{\langle 5 \rangle},$$

где оператор $Z^{\langle n \rangle}$ означает выделение n -го столбца матрицы Z .

10) Для построения траектории движения частицы ввести 2-мерные графики зависимости $z(x)$ и $z(y)$, а также 3-мерный график зависимости $z(x, y)$.

Для ввода 2-мерных графиков на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  $\rightarrow$  или иначе (Вставка $\rightarrow$ График $\rightarrow$ X-Y график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить z , в места ввода переменной – x или y .

Для ввода 3-мерного графика траектории движения частицы на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  $\rightarrow$  или иначе (Вставка $\rightarrow$ График $\rightarrow$ 3-х мерный график), при этом в открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить координаты функции в скобках, т.е. (x, y, z) .

3. Провести проверку соответствия разработанной модели реальной физической системе. В данном случае необходимо установить – совпадает ли полученная траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле с известными теоретическими результатами. Для этого с помощью 3-мерного графика построить траекторию движения частицы и сопоставить ее с траекторией, приведенной на рис 2.

4. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от величины магнитной индукции B и ее направления. Для этого сначала уменьшить заданную магнитную индукцию поля в 2 раз, а затем исходную увеличить в 2 раз, затем установить исходное значение B с отрицательным знаком, что означает изменение направление вектора индукции на противоположное.

Для каждого значения магнитной индукции B произвести:

- расчет вектора силы Лоренца F , радиуса окружности R , шага винтового движения h и частоты вращения ω ;
- получить траекторию движения заряженной частицы в виде 3-х мерного графика и 2-мерных графиков зависимости $z(x)$ и $z(y)$;
- определить направление вращения.

Проанализировать полученные результаты и установить, как зависят перечисленные характеристики траектории движения от величины магнитной индукции.

5. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от ее начальной скорости движения V_0 . Для этого сначала уменьшить заданную скорость в 2 раза, а затем исходную увеличить в 2 раза.

Для каждого значения скорости V_0 произвести:

- расчет вектора силы Лоренца F , радиуса окружности R , шага винтового движения h ;

- получить траекторию движения заряженной частицы в виде 3-х мерного графика и 2-мерных графиков зависимости $z(x)$ и $z(y)$;
- определить направление вектора силы Лоренца.

Проанализировать полученные результаты и установить, как зависят перечисленные характеристики траектории движения от начальной скорости.

6. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от ее начальной массы m_0 . Для этого сначала уменьшить массу в двое, а затем увеличить в двое.

Для каждого значения массы частицы m_0 произвести:

- расчет вектора силы Лоренца F , радиуса окружности R , шага винтового движения h и частоты вращения ω ;
- получить траекторию движения заряженной частицы в виде 3-х мерного графика и 2-мерных графиков зависимости $z(x)$ и $z(y)$.

Проанализировать полученные результаты и установить, как зависят перечисленные характеристики траектории движения от величины массы частицы.

7. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от величины ее заряда q и его знака. Для этого сначала уменьшить заряд в двое, а затем увеличить в двое, при этом для каждой величины заряда изменить знак на противоположенный.

Для каждого значения заряда частицы $\pm q$ произвести:

- расчет вектора силы Лоренца F , радиуса окружности R , шага винтового движения h и частоты вращения ω ;
- получить траекторию движения заряженной частицы в виде 3-х мерного графика и 2-мерных графиков зависимости $z(x)$ и $z(y)$;
- определить направление вращения.

Проанализировать полученные результаты и установить, как зависят перечисленные характеристики траектории движения от величины и знака заряда частицы.

8. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от величины угла α между векторами скорости движения магнитной индукции. Для этого сначала уменьшить угол в два раза, а затем установить его равным 90° , т.е. провести моделирование частного случая, когда вектор скорости направлен вдоль оси X , т.е. перпендикулярно вектору магнитной индукции B .

Для каждого значения угла α произвести:

- расчет вектора силы Лоренца F , радиуса окружности R , шага винтового движения h ;
- получить траекторию движения заряженной частицы в виде 3-х мерного графика и 2-мерных графиков зависимости $z(x)$ и $z(y)$.

Проанализировать полученные результаты и установить, как зависят перечисленные характеристики траектории движения от величины угла α .

9. Сделать выводы по результатам, проделанной работы. В выводах отразить, как зависят траектория движения заряженной частицы и ее параметры (R ,

h, ω) от изменения параметров частицы (q, m_0, V_0) и параметров магнитного поля (B, F).

Задание 1.2. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» магнитное поле от дискретного набора постоянных электрических токов.

1. Исходные данные для моделирования – в трехмерном пространстве, для которого диэлектрическая и магнитная проницаемости равны соответственно $\epsilon=1$ и $\mu=1$, в плоскости XOY размещены 4 бесконечно длинных проводника с постоянными токами. Первый проводник проходят через точки с координатами (x_{n1}, y_{n1}) и (x_{k1}, y_{k1}) ; второй проводник – с координатами (x_{n2}, y_{n2}) и (x_{k2}, y_{k2}) ; третий проводник – с координатами (x_{n2}, y_{n2}) и (x_{k2}, y_{k2}) ; четвертый проводник проходит через точки с координатами (x_{n3}, y_{n3}) и (x_{k3}, y_{k3}) . Варианты с исходными данными координат, через которые проходят проводники, и величинами электрических токов в проводниках приведены в таблице 1.3.

Задача моделирования – составить программу расчета магнитной индукции в 100 точках пространства, равномерно распределенных в заданном прямоугольнике, координаты которого $(x1, y1), (x1, y2), (x2, y2), (x2, y1)$. По рассчитанным данным построить трехмерный график распределения поля в пределах заданного прямоугольника.

Варианты координат прямоугольной области пространства, в которой рассчитывается магнитное поле, приведены в таблице 1.1

Таблица 1.3 – Исходные данные для моделирования магнитного поля

Вариант	№ провод.	Ток, мА	x_{n1}	y_{n1}	x_{k1}	y_{k1}	Вариант	№ провод.	Ток, мА	x_{n1}	y_{n1}	x_{k1}	y_{k1}
1	1	$(20+13j) \cdot 10^{-3}$	-2	-3	-2	-6	14	1	$(14+7j) \cdot 10^{-3}$	2	1	0	6
	2	$(15-17j) \cdot 10^{-3}$	-2	-6	-8	-6		2	$(12-6j) \cdot 10^{-3}$	0	6	7	6
	3	$(30+10j) \cdot 10^{-3}$	-8	-6	-8	-3		3	$(45+23j) \cdot 10^{-3}$	7	6	5	1
	4	$(25-25j) \cdot 10^{-3}$	-8	-3	-2	-3		4	$(20-11j) \cdot 10^{-3}$	5	1	2	1
2	1	$(40+9j) \cdot 10^{-3}$	-2	-1	0	-6	15	1	$(29-13j) \cdot 10^{-3}$	-8	-4	-3	-5
	2	$(10-15j) \cdot 10^{-3}$	0	-6	-9	-6		2	$(19+9j) \cdot 10^{-3}$	-3	-5	-3	-8
	3	$(25+11j) \cdot 10^{-3}$	-9	-6	-7	-1		3	$(22+12j) \cdot 10^{-3}$	-3	-8	-8	-10
	4	$(30-23j) \cdot 10^{-3}$	-7	-1	-2	-1		4	$(30-15j) \cdot 10^{-3}$	-8	-10	-8	-4
3	1	$(10+13j) \cdot 10^{-3}$	-2	-1	0	-6	16	1	$(37+19j) \cdot 10^{-3}$	-8	-4	-3	-5
	2	$(10-13j) \cdot 10^{-3}$	0	-6	-7	-3		2	$(24+14j) \cdot 10^{-3}$	-3	-5	-3	-8
	3	$(10+8j) \cdot 10^{-3}$	-7	-3	-2	-2		3	$(16-8j) \cdot 10^{-3}$	-3	-8	-8	-10
	4	$(25+19j) \cdot 10^{-3}$	-7	-3	-1	-4		4	$(45+21j) \cdot 10^{-3}$	-8	-10	-8	-4
4	1	$(17-11j) \cdot 10^{-3}$	-8	-4	-3	-5	17	1	$(18+10j) \cdot 10^{-3}$	2	-1	0	-6
	2	$(29+13j) \cdot 10^{-3}$	-3	-5	-3	-8		2	$(26+13j) \cdot 10^{-3}$	0	-6	7	-3
	3	$(33+18j) \cdot 10^{-3}$	-3	-8	-8	-10		3	$(14-7j) \cdot 10^{-3}$	7	-3	2	-2
	4	$(14-6j) \cdot 10^{-3}$	-8	-10	-8	-4		4	$(30+17j) \cdot 10^{-3}$	7	-3	1	-4
5	1	$(40-23j) \cdot 10^{-3}$	2	-3	2	-6	18	1	$(41+14j) \cdot 10^{-3}$	-8	-4	-3	-5
	2	$(30+14j) \cdot 10^{-3}$	2	-6	8	-6		2	$(14+41j) \cdot 10^{-3}$	-3	-5	-3	-8
	3	$(20-17j) \cdot 10^{-3}$	8	-6	8	-3		3	$(14-13j) \cdot 10^{-3}$	-3	-8	-8	-10

Вари- ант	№ про- вод.	Ток, мА	xn1	yn1	xk1	yk1	Вари- ант	№ про- вод.	Ток, мА	xn1	yn1	xk1	yk1
	4	$(10+10j) \cdot 10^{-3}$	8	-3	2	-3		4	$(25+6j) \cdot 10^{-3}$	-8	-10	-8	-4
6	1	$(33+3j) \cdot 10^{-3}$	2	-1	0	-6	19	1	$(22+11j) \cdot 10^{-3}$	2	-3	2	-6
	2	$(27+7j) \cdot 10^{-3}$	0	-6	9	-6		2	$(33+23j) \cdot 10^{-3}$	2	-6	8	-6
	3	$(18-8) \cdot 10^{-3}$	9	-6	7	-1		3	$(44+14j) \cdot 10^{-3}$	8	-6	8	-3
	4	$(45+23j) \cdot 10^{-3}$	7	-1	2	-1		4	$(11-2) \cdot 10^{-3}$	8	-3	2	-3
7	1	$(14+7j) \cdot 10^{-3}$	2	-1	0	-6	20	1	$(23-10j) \cdot 10^{-3}$	2	-3	2	-6
	2	$(12-6j) \cdot 10^{-3}$	0	-6	7	-3		2	$(32+16j) \cdot 10^{-3}$	2	-6	8	-6
	3	$(45+23j) \cdot 10^{-3}$	7	-3	2	-2		3	$(17+7j) \cdot 10^{-3}$	8	-6	8	-3
	4	$(20-11j) \cdot 10^{-3}$	7	-3	1	-4		4	$(19-9j) \cdot 10^{-3}$	8	-3	2	-3
8	1	$(29-13j) \cdot 10^{-3}$	-8	4	-3	5	21	1	$(20+13j) \cdot 10^{-3}$	2	-3	2	3
	2	$(19+9j) \cdot 10^{-3}$	-3	5	-3	8		2	$(15-17j) \cdot 10^{-3}$	2	3	8	3
	3	$(22+12j) \cdot 10^{-3}$	-3	8	-8	10		3	$(30+10j) \cdot 10^{-3}$	8	3	8	-3
	4	$(30-15j) \cdot 10^{-3}$	-8	10	-8	4		4	$(25-25j) \cdot 10^{-3}$	8	-3	2	-3
9	1	$(37+19j) \cdot 10^{-3}$	2	-3	2	-6	22	1	$(40+9j) \cdot 10^{-3}$	-2	1	0	6
	2	$(24+14j) \cdot 10^{-3}$	2	-6	8	-6		2	$(10-15j) \cdot 10^{-3}$	0	6	-7	3
	3	$(16-8j) \cdot 10^{-3}$	8	-6	8	-3		3	$(25+11j) \cdot 10^{-3}$	7	3	2	2
	4	$(45+21j) \cdot 10^{-3}$	8	-3	2	-3		4	$(30-23j) \cdot 10^{-3}$	7	3	1	4
10	1	$(18+10j) \cdot 10^{-3}$	-2	3	-2	6	23	1	$(10+13j) \cdot 10^{-3}$	-2	1	0	6
	2	$(26+13j) \cdot 10^{-3}$	-2	6	-8	6		2	$(10-13j) \cdot 10^{-3}$	0	6	-7	3
	3	$(14-7j) \cdot 10^{-3}$	-8	6	-8	3		3	$(10+8j) \cdot 10^{-3}$	7	3	2	2
	4	$(30+17j) \cdot 10^{-3}$	-8	3	-2	3		4	$(25+19j) \cdot 10^{-3}$	7	3	1	4
11	1	$(41+14j) \cdot 10^{-3}$	-8	-4	-3	-5	24	1	$(17-11j) \cdot 10^{-3}$	-2	-3	-2	-6
	2	$(14+41j) \cdot 10^{-3}$	-3	-5	-3	-8		2	$(29+13j) \cdot 10^{-3}$	-2	-6	-8	-6
	3	$(14-13j) \cdot 10^{-3}$	-3	-8	-8	-10		3	$(33+18j) \cdot 10^{-3}$	-8	-6	-8	-3
	4	$(25+6j) \cdot 10^{-3}$	-8	-10	-8	-4		4	$(14-6j) \cdot 10^{-3}$	-8	-3	-2	-3
12	1	$(22+11j) \cdot 10^{-3}$	2	3	2	6	25	1	$(40-23j) \cdot 10^{-3}$	8	-4	3	-5
	2	$(33+23j) \cdot 10^{-3}$	2	6	8	6		2	$(30+14j) \cdot 10^{-3}$	3	-5	3	-8
	3	$(44+14j) \cdot 10^{-3}$	8	6	8	3		3	$(20-17j) \cdot 10^{-3}$	3	-8	8	-10
	4	$(11-2) \cdot 10^{-3}$	8	3	2	3		4	$(10+10j) \cdot 10^{-3}$	8	-10	8	-4
13	1	$(23-10j) \cdot 10^{-3}$	2	1	0	-4	26	1	$(33+3j) \cdot 10^{-3}$	8	-4	3	-5
	2	$(32+16j) \cdot 10^{-3}$	0	-4	9	-4		2	$(27+7j) \cdot 10^{-3}$	3	-5	3	-8
	3	$(17+7j) \cdot 10^{-3}$	9	-4	7	1		3	$(18-8) \cdot 10^{-3}$	3	-8	8	-10
	4	$(19-9j) \cdot 10^{-3}$	7	1	2	1		4	$(45+23j) \cdot 10^{-3}$	8	-10	8	-4

2. Построить на одном рисунке геометрическую модель проводников и прямоугольной области, в которой производится расчет магнитного поля.

Пример геометрической модели представлен на рис. 4. На этом рисунке черной линией обозначен 1-й проводник с током, создающий магнитное поле, синей – 2-й проводник, красной – 3-й проводник, зеленой – 4-й проводник. Бесконечно длинные проводники проходят через точки с заданными координатами, приведенными в таблице 1.3.

Пунктирной линией на рис. 4 изображена прямоугольная область пространства, в которой определяется магнитное поле, создаваемое проводниками с токами. Данная область пространства строится на базе отрезка, проходящего через точки (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) .

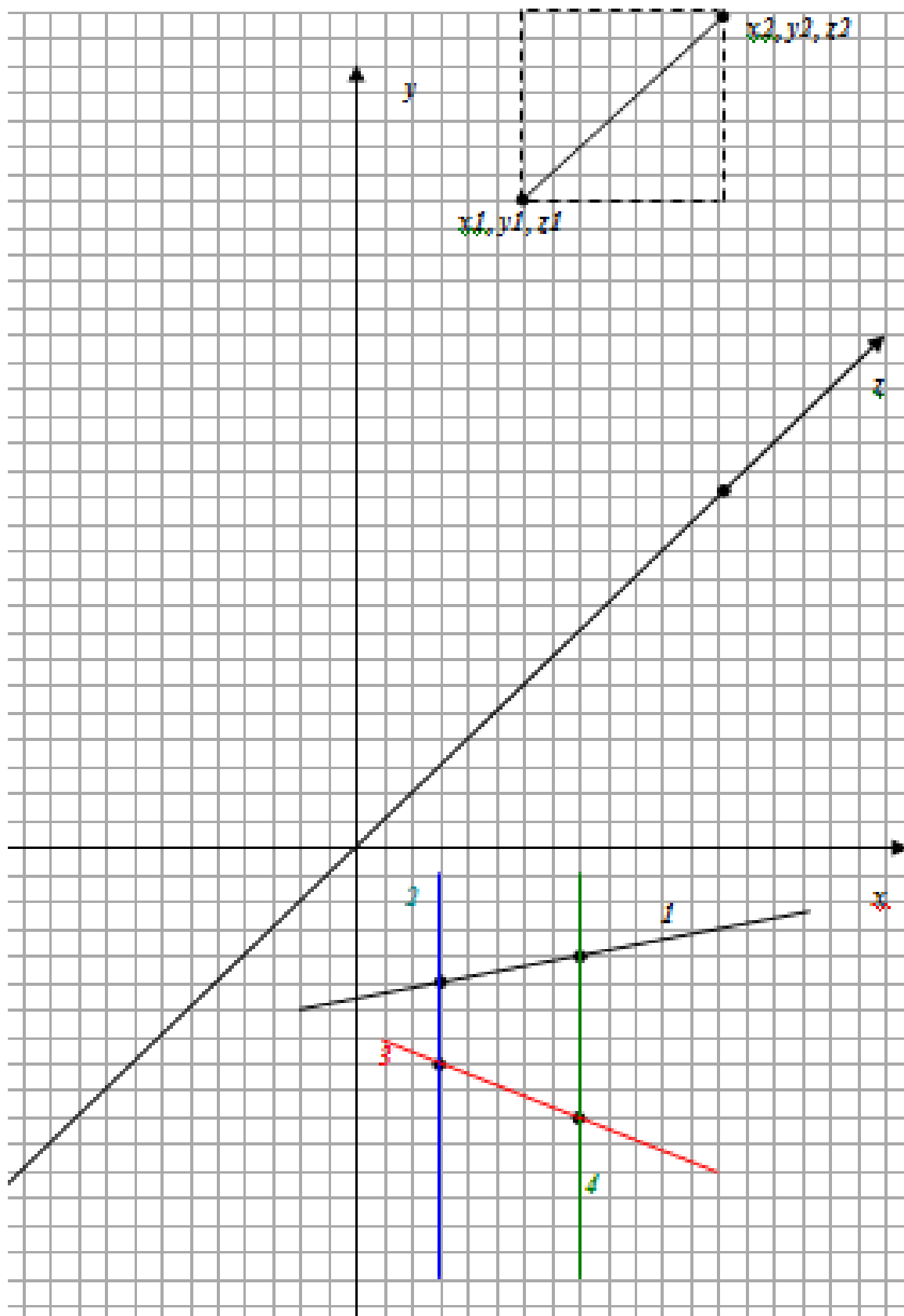


Рис. 4 – Пример геометрической модели для задания 1.2

Геометрическая модель позволяет априори определить, какие проводники с током вносят больший или меньший вклад в создаваемое магнитное поле в исследуемой области пространства.

3. Алгоритм расчета поля в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- диэлектрическую проницаемость вакуума или электрическую постоянную $\epsilon_0 = 10^{-9}/36 \cdot \pi$;
- относительную диэлектрическую проницаемость среды $\epsilon = 1$;
- магнитную проницаемость вакуума или магнитную постоянную $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$;
- относительную магнитную проницаемость среды $\mu = 1$;
- номер проводника с током, $i = 0 \dots 3$;
- координаты начальных точек x_n, y_n и конечных точек x_k, y_k , через которые проходят проводники, а также величины их токов, взяв из таблицы 1.3 только реальную часть, в виде одностолбцовых четырех элементных матриц, например

$$x_n := \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 8 \\ 8 \end{pmatrix} \quad y_n := \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 6 \\ 3 \end{pmatrix} \quad x_k := \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \\ 8 \\ 2 \end{pmatrix} \quad y_k := \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \quad I := \begin{pmatrix} 11 \cdot 10^{-3} \\ 12 \cdot 10^{-3} \\ 13 \cdot 10^{-3} \\ 14 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

- координаты диагонали прямоугольной области $(x1, y1), (x2, y2)$ из таблицы 1.1, в точках которой рассчитывается магнитное поле, например:

$$x1 := -12 \quad y1 := 14 \quad x2 := -4 \quad y2 := 18 ;$$

- $M=10$ – число элементов в матрице координат точки, в которой рассчитывается магнитное поле,

- ix, iy – текущий номер столбца и строки матрицы координат точки, в которой рассчитывается магнитное поле -

$$ix := 0..M \quad iy := 0..M$$

2) Ввести формулы для промежуточных расчетов:

- абсолютной диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$;
- абсолютной магнитной проницаемости среды $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$;
- текущих координаты по оси x и y для точек, в которых будет рассчитываться магнитное поле:

$$x_{p_{ix}} := x1 + \frac{ix \cdot (x2 - x1)}{M} \quad y_{p_{iy}} := y1 + \frac{iy \cdot (y2 - y1)}{M} ;$$

- матриц коэффициентов уравнения i -ой прямой, описывающей проводник, по которому проходит ток:

$$\underline{\underline{A_i}} := yk_i - y_{n_i} \quad \underline{\underline{B_i}} := xn_i - xk_i \quad \underline{\underline{C_i}} := xk_i \cdot y_{n_i} - xn_i \cdot yk_i ;$$

3) Ввести формулы для расчетов:

– кратчайшего расстояния от точки, для которой проводится расчет, до всех прямых линий на которых расположены проводники с током

$$\begin{aligned} R0_{ix,iy} &:= \frac{A_0 \cdot xp_{ix} + B_0 \cdot yp_{iy} + C_0}{\left| \sqrt{(A_0)^2 + (B_0)^2} \right| \cdot (-\text{sign}(C_0))} & R1_{ix,iy} &:= \frac{A_1 \cdot xp_{ix} + B_1 \cdot yp_{iy} + C_1}{\left| \sqrt{(A_1)^2 + (B_1)^2} \right| \cdot (-\text{sign}(C_1))} \\ R2_{ix,iy} &:= \frac{A_2 \cdot xp_{ix} + B_2 \cdot yp_{iy} + C_2}{\left| \sqrt{(A_2)^2 + (B_2)^2} \right| \cdot (-\text{sign}(C_2))} & R3_{ix,iy} &:= \frac{A_3 \cdot xp_{ix} + B_3 \cdot yp_{iy} + C_3}{\left| \sqrt{(A_3)^2 + (B_3)^2} \right| \cdot (-\text{sign}(C_3))} ; \end{aligned}$$

– рассчитать значения расстояний, введя операторы R0=, R1=, R2= и R3=, если расстояния окажутся отрицательными, что физически не допустимо, то для получения положительного результата ввести знак минус в знаменатель соответствующего выражения, например:

$$R0_{ix,iy} := \frac{A_0 \cdot xp_{ix} + B_0 \cdot yp_{iy} + C_0}{-\left| \sqrt{(A_0)^2 + (B_0)^2} \right| \cdot (-\text{sign}(C_0))} ;$$

– магнитной индукции в текущей точке поля от каждого проводника

$$BI0_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_0}{2\pi \cdot R0_{ix,iy}} \quad BI1_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_1}{2\pi \cdot R1_{ix,iy}} \quad BI2_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_2}{2\pi \cdot R2_{ix,iy}} \quad BI3_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_3}{2\pi \cdot R3_{ix,iy}}$$

– величину суммарной магнитной индукции поля в рассматриваемых точках пространства:

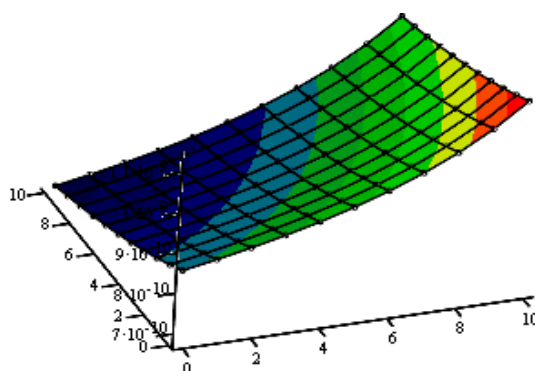
$$BS := BI0 + BI1 + BI2 + BI3 ;$$

– величину напряженности магнитного поля в рассматриваемых точках пространства:

$$\underline{\underline{H}} := \frac{BS}{\mu a} .$$

4) Поостроить графики распределения магнитной индукции и напряженности магнитного поля в заданных точках пространства. Для визуализации магнитного поля в заданной пространства вывести в программе трехмерный график, в котором координаты x и y указывают точки поля, а координата z – значение магнитной индукции в этих точках поля. Для построения графика на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или иначе Вставка → График → 3-х мерный график), при этом в открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить функцию **BS** или **H**.

5) Отладить файл, созданный в программе MathCAD. Пример результатов моделирования приведен на рис 5.



BS

Рис. 5

4.2.4. Провести расчет магнитного поля с помощью программы в системе «Mathcad» по своему заданному варианту:

- 1) Ввести заданные исходные данные.
- 2) Произвести вычисления.
- 3) Поострить график распределения магнитной индукции и напряженности магнитного поля в заданных точках пространства.
- 4) Определить в точках поля максимальное и минимальное значение напряженности магнитного поля. Для этого ввести операторы $\max(H)$ и $\min(H)$ и нажав на клавишу равно вычислить из значения, затем в матрицах **BS** и **H** найти эти значения и определить координаты этих точек поля. Нанести эти координаты на рисунок с геометрической моделью.

5. Провести исследование зависимости магнитной индукции и напряженности магнитного поля от числа проводников с током. Для этого проделать следующие операции:

- в матрице токов оставить поочередно один из токов, а другим присвоить значения 0 (ноль);
- произвести вычисление и построить график распределения магнитной индукции в заданных точках пространства;
- повторить вычисление для других проводников и построение графиков;

6. Провести исследование зависимости магнитной индукции и напряженности магнитного поля от величины токов в проводниках. Для этого проделать следующие операции:

- в матрице токов установить заданные исходные данные;
 - произвольно изменить на порядок в большую сторону величину одного из токов;
 - провести вычисления характеристик поля и построить графики;
 - произвольно изменить знаки двух токов;
 - провести вычисления характеристик поля и построить графики.
7. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.3. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.

1. Исходные данные для моделирования – в трехмерном пространстве, для которого диэлектрическая и магнитная проницаемости равны соответственно $\epsilon=1$ и $\mu=1$, в плоскости XOY размещены 4 бесконечно длинных проводника с переменными токами, представленными в комплексном виде. Первый проводник проходят через точки с координатами (x_{n1}, y_{n1}) и (x_{k1}, y_{k1}) ; второй проводник – с координатами (x_{n2}, y_{n2}) и (x_{k2}, y_{k2}) ; третий проводник – с координатами (x_{n2}, y_{n2}) и (x_{k2}, y_{k2}) ; четвертый проводник проходит через точки с координатами (x_{n3}, y_{n3}) и (x_{k3}, y_{k3}) . Варианты с исходными данными координат, через которые проходят проводники, и величинами комплексных электрических токов в проводниках приведены в таблице 1.3. **Частота переменного тока задается номером варианта N , умноженным на 10^6 Гц.**

Задача моделирования – составить программу расчета величины электродвижущей силы, созданной переменным магнитным полем в проводящем контуре, ограничивающем прямоугольную область с координатами $(x1, y1)$, $(x1, y2)$, $(x2, y2)$, $(x2, y1)$. По рассчитанным данным построить зависимость ЭДС в контуре от времени в течение нескольких периодов.

Варианты координат контура, в котором рассчитывается ЭДС, созданная переменным магнитным полем, приведены в таблице 1.1.

Для решения данной задачи необходимо модернизировать программу для расчета магнитной индукции, созданную в предыдущей лабораторной работе так, чтобы можно было рассчитать ЭДС индукции в контуре (рамке) от набора переменных токов.

2. Загрузить в системе «Mathcad» файл с программой, разработанной при выполнении предыдущего задания, и сохранить его под новым именем.

3. Алгоритм расчета ЭДС индукции в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы дополнительные исходные данные:

- мнимую единицу $j := \sqrt{-1}$;
- линейную частоту переменного тока $f = N \cdot 10^6$, Гц.
- величины комплексных токов в виде матрицы

$$I := \begin{bmatrix} (11 + 3j) \cdot 10^{-3} \\ (12 + 6j) \cdot 10^{-3} \\ (13 + 4j) \cdot 10^{-3} \\ (14 + 3j) \cdot 10^{-3} \end{bmatrix};$$

- ввести формулу для расчета круговой частоты переменного тока $\omega := 2\pi \cdot f$.

2) Удалить в ранее разработанной программе оператор расчета напряженности поля и графики.

3) Ввести формулу для расчета ЭДС, создаваемую в контуре

$$E := -j \cdot \omega \cdot \frac{x1 \cdot x2}{M \cdot M} \cdot \left[\sum_{ix} \left(\sum_{iy} BS_{ix, iy} \right) \right]$$

4) Ввести операторы для расчета модуля и фазу ЭДС

$$EM := |E| \quad \phi := \arg(E) \cdot \frac{180}{\pi}$$

5) Задать временной цикл

$$t := 0, \frac{6\pi}{100 \cdot \omega} \dots \frac{120\pi}{\omega}$$

6) Ввести операторы для расчета ЭДС во временной области:

$$ET(t) := |E| \cdot \cos(\omega \cdot t + \arg(E))$$

7) Построить график зависимость ЭДС от времени. Для этого на панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)  →  (или Вставка → График → X-Y график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить t , в места ввода переменной $ET(t)$. Задать максимальное значение $t = 10^{-6} / N$.

На рис. 6 приведен пример полученной ЭДС.

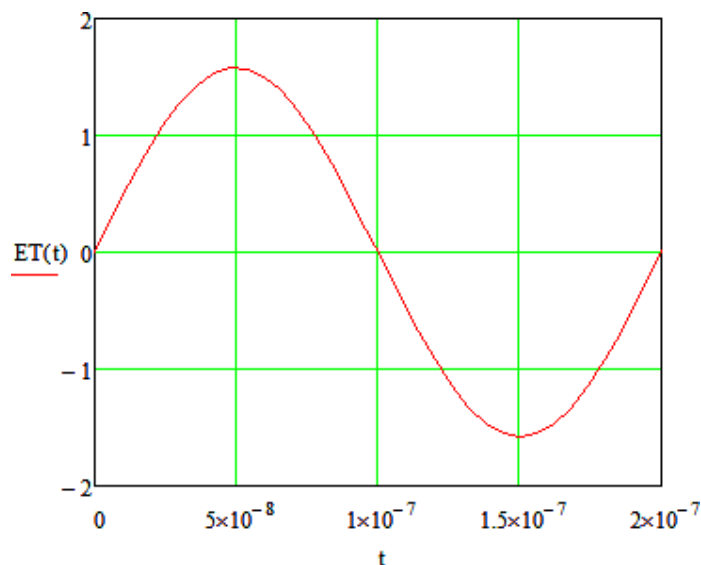


Рис. 6

4. Провести исследование зависимости ЭДС индукции в контуре от частоты переменного тока. Для этого менять значения частоты от f до $11f$ с шагом $2f$ рассчитать значения модуля ЭДС индукции. Построить зависимость $|E|$ от частоты f . В отчете привести графики зависимости ЭДС от времени для частот переменного тока f и $11f$.

5. Провести исследование зависимости ЭДС индукции от числа источников (проводников) переменного тока. Для этого проделать следующие операции:

- в матрице токов оставить поочередно один из токов, умножая значения других токов на 0 (ноль);

- произвести вычисления модуля и фазы ЭДС индукции; построить график временной зависимости ЭДС индукции;
- повторить вычисление для других проводников и построение графиков;
- определить, какой проводник с током создает наибольшую ЭДС индукции в контуре.

6. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ моделирования,
- результаты моделирования и исследований – формулы, описывающие магнитное поле и электромагнитную индукцию, полученные результаты и графики;
- выводы о проделанной работе, с разъяснением физического смысла полученных результатов.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ТЕМА 7 **ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ**

Занятие 7 **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

ВРЕМЯ – 4 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование электромагнитных волн.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование электромагнитных волн.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
2. Моделирование и исследование электромагнитных волн.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Математическое описание электромагнитных волн получают, как результат решения однородных уравнений Гельмгольца, которые непосредственно вытекают из уравнений Максвелла.

Уравнения Гельмгольца

Вторую пару уравнений Максвелла не всегда удобно использовать из-за того, что в оба вектора $\vec{E}$ и $\vec{H}$ входят и в первое, и во второе уравнение пары. Обычно эти уравнения преобразуют так, чтобы вектора разделились. Это преобразование можно проделать во временной области и для комплексных амплитуд. В первом случае уравнения называют волновыми, а во втором – уравнениями Гельмгольца. При анализе электромагнитных процессов в технических средах применяется уравнения Гельмгольца

$$\Delta \vec{H} + \gamma^2 \vec{H} = -\text{rot } \vec{j}_\Sigma + i\omega \epsilon_a \vec{j}_M + \text{grad } \frac{\rho_M}{\mu_n}; \quad (1)$$

$$\Delta \vec{E} + \gamma^2 \vec{E} = \text{rot } \vec{j}_M + i\omega \mu_a \vec{j}_\Sigma + \text{grad } \frac{\rho_\Sigma}{\epsilon_n}, \quad (2)$$

где $\gamma = \omega \sqrt{\epsilon_n \mu_n}$ – постоянная распространения электромагнитного поля.

Это дифференциальные уравнения второго порядка с ненулевой правой частью. В таком виде уравнения Гельмгольца используются редко. Чаще используют однородные уравнения, описывающие электромагнитные волны вдали от источника, т.е.

$$\Delta \vec{H} + \gamma^2 \vec{H} = 0; \quad (3)$$

$$\Delta \vec{E} + \gamma^2 \vec{E} = 0. \quad (4)$$

Плотность потока мощности электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга

Электромагнитное поле способно накапливать и переносить энергию. Законы изменения, сохранения и распространения энергии можно получить из уравнений Максвелла.

Для конечного объема V несложно получить такое соотношение:

$$\begin{aligned} \int_V \operatorname{div}[\vec{E} \times \vec{H}] \cdot dV &= \oint_S [\vec{E} \times \vec{H}] dS = \oint_S \vec{\Pi} dS = \\ &= - \int_V (\vec{J}_M \vec{H} + \vec{J}_E \vec{E}) \cdot dV - \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_a H^2}{2} + \frac{\mu_a E^2}{2} \right) \cdot dV, \end{aligned} \quad (5)$$

которое называют теоремой Пойнтинга в среде без потерь. Теорема Пойнтинга это форма закона сохранения энергии для электромагнитного поля.

Рассмотрим сначала нижнюю строчку выражения. Первый интеграл – мощность электромагнитного поля, связанная с протеканием электрического и магнитного тока, Второй интеграл – мощность, накопленная в электрическом и магнитном поле. Итак, нижняя строка описывает полную мощность, накопленную в электромагнитном поле с учетом мощностей электрического и магнитного тока. Если эта величина изменяется, то появляется поток вектора

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (6)$$

через поверхность S , ограничивающую объем V . Источник вектора Пойнтинга (см. первый интеграл в верхней строке выражения (5)) – изменение мощности токов, протекающих в поле (первый интеграл в нижней части выражения (5)) или изменение энергии самого поля в объеме V (второй интеграл там же).

Мощность, запасенная в электромагнитном поле, изменяется за счет потока мощности через ограничивающую объем поверхность. Вектор Пойнтинга можно ввести и для комплексных амплитуд. В этом случае

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}^* \quad P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\vec{\Pi}) \quad Q = \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\vec{\Pi}) \quad S = \frac{1}{2} \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (7)$$

Вектор содержит действительную часть – активную мощность P и мнимую часть Q – реактивную мощность. Если между векторами $\vec{E}$ и $\vec{H}$ нет сдвига фаз, то мощность будет чисто активной, при сдвиге фаз $\pi/2$ – чисто реактивной.

Плоские электромагнитные волны

Электромагнитную волну называют плоской, если и электрическое, и магнитное поле не изменяется в плоскости перпендикулярной направлению ее рас-

пространения. Плоская волна – это наиболее часто используемая модель электромагнитного волнового процесса в открытом пространстве. Выражение для плоской волны удобно искать в прямоугольной системе координат (x, y, z).

Пусть плоская волна распространяется вдоль оси z , то есть вектор Пойнтинга имеет единственную проекцию Π_z , которую можно найти, спроектировав выражение (3.6) на ось z .

$$\bar{\Pi}_z = \bar{e}_z (E_x H_y - E_y H_x). \quad (8)$$

Отсюда следует, что в плоской волне отличны от нуля только поперечные составляющие электромагнитного поля. Электромагнитное поле поперечное.

В плоскости перпендикулярной направлению распространения (плоскость XOY) координатные оси пока можно расположить произвольно. Направим ось x по электрическому полю, тогда $E_y = 0$. Теперь, в выражении (3.8) останется одно слагаемое,

$$\bar{\Pi}_z = \bar{e}_z E_x H_y. \quad (9)$$

Таким образом, плоскую волну можно представить в виде электромагнитного поля, содержащего одну проекцию электрического поля E_x и одну проекцию магнитного поля H_y .

Изменение этих проекций во времени и пространстве можно получить, решая уравнение Гельмгольца для электрического поля в прямоугольной системе координат и рассчитывая магнитное поле с помощью уравнения электромагнитной индукции. Для комплексных амплитуд полей, при условии, что на пути распространения радиоволн нет никаких препятствий и поэтому отраженной волны нет, получим:

$$\underline{E}_x = A \exp(-i \underline{\gamma} z), \quad (10)$$

$$\underline{H}_y = \frac{A}{\underline{Z}_c} \exp(-i \underline{\gamma} z), \quad (11)$$

$$\underline{\gamma} = \omega \sqrt{\underline{\epsilon}_n \underline{\mu}_n}, \quad \underline{Z}_c = \frac{\underline{\gamma}}{\omega \underline{\mu}_n} = \sqrt{\frac{\underline{\mu}_n}{\underline{\epsilon}_n}} \quad (12)$$

Величину $\underline{Z}_c$ называют волновым сопротивлением среды. Волновое сопротивление позволяет рассчитать магнитное поле в плоской волне, если известно электрическое. В общем случае волновое сопротивление – величина комплексная. Его мнимая часть определяется электрической и магнитной проводимостью среды. В среде без потерь мнимая часть волнового сопротивления равна нулю и электрическое и магнитное поле в пространстве взаимно перпендикулярны.

В выражения (10, 11) входит комплексная постоянная распространения $\underline{\gamma}$. Ее действительная и мнимая часть по-разному влияют на свойства электромагнитного поля. Обычно ее записывают в таком виде:

$$\underline{\gamma} = \beta - i\alpha. \quad (13)$$

Действительную часть постоянной распространения называют волновым числом или фазовой постоянной, а мнимую – постоянной затухания. Воспользовавшись новой формой постоянной распространения, перепишем выражения для комплексных амплитуд электрического и магнитного поля в плоской волне

$$\vec{E}_x = A \exp(-\alpha z) \exp(-i\beta z), \quad (14)$$

$$\vec{H}_y = \frac{A}{Z_c} \exp(-\alpha z) \exp(-i\beta z). \quad (15)$$

Полученные выражения для изображения полей E и H можно преобразовать в функцию координат и времени, описывающую реальные поля, а не их изображения. Для этого каждое изображение нужно умножить на мгновенный комплекс $\exp(i\omega \cdot t)$ и от полученного произведения взять действительную часть. Проделаем это и получим:

$$E_x(t) = A \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z); \quad (16)$$

$$H_y(t) = \frac{A}{Z_c} \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z - \phi_z) \quad (17)$$

Здесь Z_c модуль комплексного волнового сопротивления Z_c , а ϕ_z – его фаза.

Итак, получены выражения для комплексного изображения электрического и магнитного поля в плоской волне (14) и (15) и выражения для расчета значения самого электрического и магнитного поля (16) и (17).

Ввиду большой значимости этих выражений, обсудим полученный результат. Начнем с выражения (16) для электрического поля. Выражение содержит периодическую функцию – косинус. Аргумент косинуса непрерывно изменяется в пространстве и во времени. Его называют фазой электрического поля плоской волны Φ ,

$$\Phi_E = \omega t - \beta z. \quad (18)$$

Фаза магнитного поля отличается на фазовый угол волнового сопротивления,

$$\Phi_H = \omega t - \beta z - \phi_z.$$

Косинус периодическая функция, поэтому через 2π радиан значения полей повторяются. Если зафиксировать координату и изменять время, то значения поля повторяются через

$$T = 2\pi/\omega. \quad (19)$$

Это значение называют периодом по времени, или просто периодом.

Если же сделать мгновенную фотографию, то есть зафиксировать время и смотреть, как изменяются поля с изменением координат, то несложно установить, что значения поля повторяются через

$$\lambda = 2\pi/\beta. \quad (20)$$

Это значение называют периодом по координате, или длиной волны.

Из (3.18) видно, что фаза плоской волны в плоскости перпендикулярной оси z постоянна. Это и есть основное свойство плоской волны.

Уравнение поверхности постоянной фазы – плоскость перпендикулярная оси z . Эта плоскость перемещается со скоростью

$$v_{\phi} = \omega/\beta, \quad (21)$$

которая называется фазовой скоростью.

Каждая величина, входящая в выражение для фазы (18) имеет свое название. Кроме переменных координаты z и времени t в выражение входит круговая частота ω и волновое число β .

Выражение, которое стоит перед функцией косинуса в (16) называют амплитудой электрического поля в плоской волне, та же величина в (17) – амплитуда магнитного поля плоской волны.

Отношение амплитуды электрического поля к амплитуде магнитного поля – волновое сопротивление. Волновое сопротивление определяется только параметрами среды и не зависит от величины электрического и магнитного поля (нелинейные среды мы пока не рассматриваем). Обе амплитуды уменьшаются при увеличении координаты z с постоянной затухания α .

Плоская монохроматическая волна – это идеализация реального электромагнитного процесса. Известно, что информация передается модулированным колебанием, которое, как правило, имеет узкий спектр, располагающийся вблизи некоторой центральной частоты. Такой сигнал можно заменить монохроматической плоской волной, амплитуда которой изменяется по определенному закону. Скорость перемещения максимума амплитуды этой волны и называют групповой скоростью.

Возьмем узкополосный немонахроматический сигнал $E(t)$. Используя преобразование Фурье, его можно представить в виде конечного или бесконечного числа гармоник с амплитудой $G(\omega)$, то есть в виде ряда или интеграла Фурье. Запишем интеграл Фурье.

$$\bar{E}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{G}(\omega) \exp(i\omega t - i\beta z) d\omega \quad (22)$$

Сигнал считаем узкополосным, то есть $\Delta\omega_{\max}/\omega_0 \ll 1$, где $\Delta\omega_{\max}$ – максимальное отклонение по круговой частоте от центральной частоты ω_0 . Воспользуемся этим свойством сигнала для того, чтобы представить его в виде гармонического колебания с несущей круговой частотой ω_0 . Для этого волновое число β разложим в степенной ряд вблизи несущей.

Учитывая то, что отклонение частоты от центральной невелико, в ряду удержим лишь первые два слагаемые

$$\beta \approx \beta_0 + (\omega - \omega_0) \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega \rightarrow \omega_0} = \frac{\omega_0}{v_{\phi}} + \frac{\omega - \omega_0}{v_{ГР}} \quad (23)$$

Волновое число узкополосного немонахроматического сигнала представлено в виде двух слагаемых. Первое слагаемое – волновое число монохромати-

ческой несущей. Второе слагаемое возникает из-за того, что существуют спектральные составляющие с частотой, отличной от несущей. Их распространение описывается с помощью понятия групповой скорости.

$$v_{\text{гп}} = \frac{1}{\left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega \rightarrow \omega_0}} . \quad (24)$$

Перепишем экспоненту в выражении (22) с учетом введенных обозначений, т.е.

$$\exp i\omega t - i\beta z = \exp i\omega_0 t - i\beta_0 z \exp \left(i \frac{\omega - \omega_0}{v_{\text{гп}}} v_{\text{гп}} t - z \right)$$

Само выражение (3.22), теперь запишется так:

$$\bar{E}(t) = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{G}(\omega) \exp \left(i \frac{\omega - \omega_0}{v_{\text{гп}}} (v_{\text{гп}} t - z) \right) d\omega \right\} \exp(i\omega_0 t - \beta_0 z) . \quad (25)$$

Узкополосный немонахроматический сигнал (22) заменен эквивалентным монохроматическим (см. выражение 25) с круговой частотой ω_0 и волновым числом β_0 – соответствующим центральной частоте немонахроматического сигнала и амплитудой, определяемой выражением (25) перед мнимой экспонентой. Этот сигнал перемещается во времени со скоростью $V_{\text{гп}}$.

Сферические волны

Сферическую волну можно получить от – точечного источника. Если среда однородна во всех направлениях, то фаза волны постоянна на поверхности сферы. Это и будет сферическая волна. Задача по расчету электромагнитного поля в этом случае имеет сферическую симметрию. Ее следует решать в сферической системе координат.

На рисунке 1 приведена сферическая система координат. Эта система формируется тремя координатными поверхностями, проходящими через интересующую нас точку M , и полярной осью $\theta Z'$, проходящей через начало координат. Одна поверхность – сфера с центром в начале координат, вторая – плоскость, содержащая полярную ось и точку M , а третья – плоскость, перпендикулярная полярной оси.

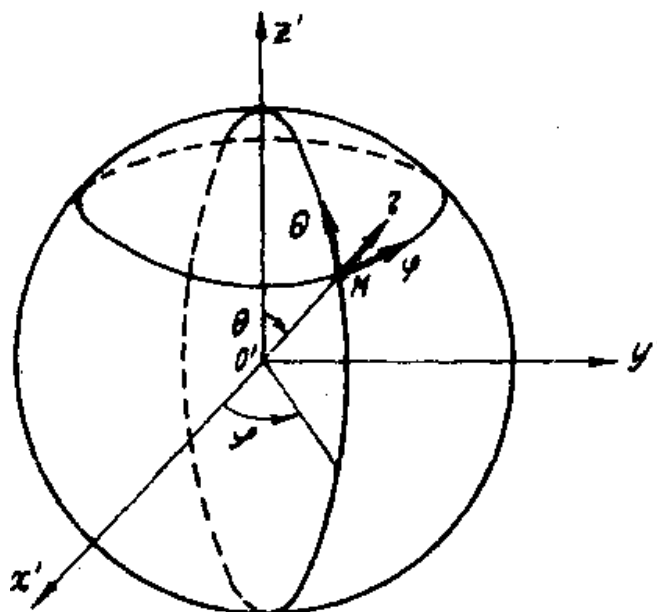


Рис. 1 – Сферическая волна

Каждая пара координатных поверхностей, образует в пересечении координатную линию. Координатная линия может быть прямой или кривой. Система координат называется прямолинейной, если все координатные линии прямые. Если хотя бы одна координатная линия не прямая, система координат называется криволинейной. Сферическая система координат – криволинейна.

Координатную систему называют ортогональной, если в любой точке M касательные к координатным линиям образуют прямоугольный трехгранник. Сферическая система координат ортогональна.

Если в точке M (рис. 1) задан вектор электрического поля E . Его принято обозначать прямой со стрелкой, берущей начало в точке M . Не следует забывать, что этот вектор описывает, электрическое поле в точке M , а прямая со стрелкой – лишь удобный способ графического отображения характеристик векторного поля в этой точке. Чтобы определить его проекции в нелинейной системе координат необходимо найти направление координатных осей в этой точке. Координатные оси всегда прямые. Они определяются как касательные к координатным линиям. На рис. 1 это прямые r , ϕ и θ .

Будем рассматривать однородную симметричную сферическую волну, у которой электрическое и магнитное поле не зависят от угловых координат ϕ и θ . Единственная координата, вдоль которой изменяется поле – радиус r . Выберем систему координат так, чтобы электрическое поле было направлено по оси ϕ . Расчет показывает, что если на пути электромагнитной волны нет препятствий и, следовательно, не возникает отражений, то

$$\dot{E}_{\phi} = \frac{A}{r} \exp(-i\beta r) \quad (26)$$

где A – амплитуда электрического поля в начале координат Ее значение зависит от условий возбуждения.

Если в плоской волне без потерь по мере распространения амплитуда поля не изменяется, то в сферической волне она уменьшается обратно пропорционально расстоянию от точки, в которой волна была возбуждена (от начала координат). Это объясняется довольно просто. Поверхность занятая плоской волной по мере распространения волны не изменяется, чего нельзя сказать о сферической волне. По мере распространения площадь поверхности, которую покрывает фронт сферической волны, увеличивается. Следовательно, на единицу площади приходится все меньше энергии и напряженность поля должна уменьшаться, что и следует из (26).

Воспользовавшись законом электромагнитной индукции, найдем магнитное поле

$$\dot{H}_\theta = -\frac{\beta}{\omega\mu_a} \dot{E}_\varphi = -\frac{\dot{E}_\varphi}{Z_c} \quad (27)$$

У сферических волн связь между электрическим и магнитным полем такая же, как и у плоских волн. Они связаны через волновое сопротивление среды. Магнитное поле перпендикулярно электрическому и направлению распространения. Вектор Пойнтинга направлен по радиусу, т.е.

$$\dot{\vec{P}} = \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^* = \dot{E}_\varphi \dot{H}_\theta \vec{e}_r \quad (28)$$

Выражения (26), (27) описывают комплексное изображение электрического и магнитного поля в сферической волне. Запишем выражения для полей как функцию координат и времени, описывающую реальные поля, а не их изображения.

$$E_x(t) = \frac{A}{r} \exp(-\alpha r) \cos(\omega t - \beta r) \quad ; \quad (29)$$

$$H_\theta(t) = \frac{A}{r Z_c} \exp(-\alpha r) \cos(\omega t - \beta r - \phi_z) \quad (30)$$

Цилиндрические волны

Цилиндрические волны радиально расходятся от некоторой оси в пространстве, на которой расположен проводник с током. Структура цилиндрических волн существенно сложнее структуры плоских и сферических волн. Она требует введения цилиндрической системы координат (рис. 2).

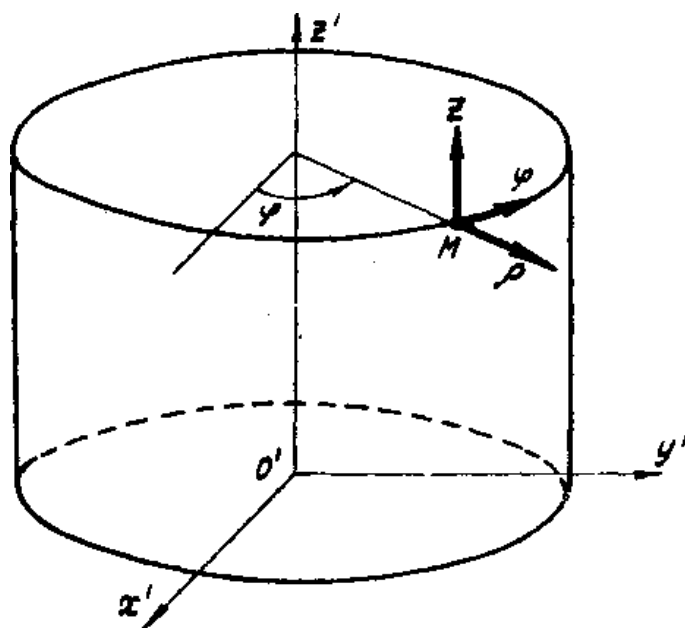


Рис. 2 – Цилиндрическая волна

Система координат формируется тремя координатными поверхностями, проходящими через интересующую нас точку M , и полярной осью $0'Z'$, проходящей через начало координат. Опишем эти поверхности. Одна поверхность – цилиндр, ось которого совпадает с полярной осью $0'Z'$; вторая – плоскость, перпендикулярная полярной оси; а третья – плоскость, касательная к цилиндру и проходящая через точку M .

Каждая пара координатных поверхностей, образует в пересечении координатную линию. Цилиндрическая система координат ρ, φ, z (см. рис. 2) – ортогональная и криволинейная. Координатные оси это прямые ρ, φ, z (см. рис. 2).

Простейшая монохроматическая симметричная цилиндрическая волна с источником в центре удовлетворяет двумерному уравнению Гельмгольца и описывается с помощью первой функции Ханкеля нулевого порядка $H_0(x)$, которая в свою очередь формируются из цилиндрических функций первого $J_0(x)$ и второго $Y_0(x)$ рода нулевого порядка.

Цилиндрические функции первого ($J_0(x)$ – функция Бесселя) и второго рода ($Y_0(x)$ – функция Неймана) – это хорошо изученные неэлементарные функции действительного аргумента, для которых существуют таблицы значений и которые, наряду с другими введены в основные математические программы, например, в MathCAD. На рис. 3 приводятся графики этих функций.

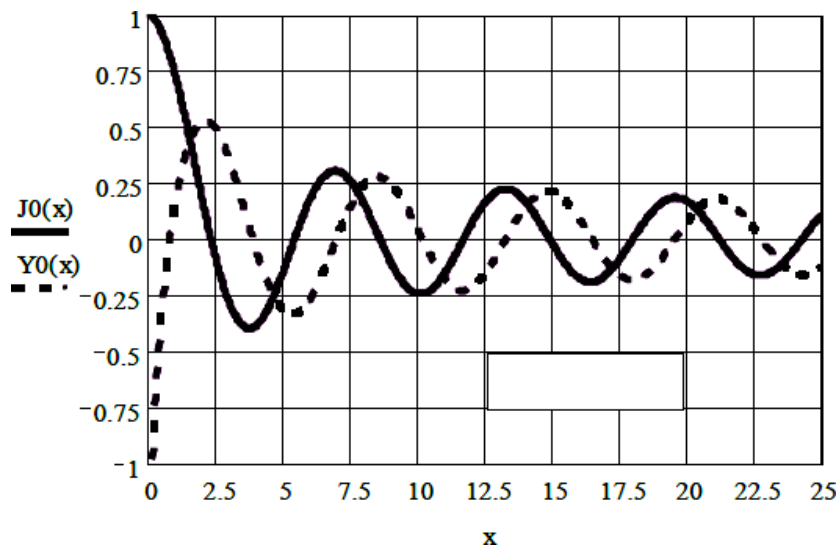


Рис. 3 – Графики функций Бесселя $J_0(x)$ и Неймана $Y_0(x)$

В начале координат функция Бесселя $J_0(x)$ равна единице, а функция Неймана $Y_0(x)$ стремится к $-\infty$. Затем, по мере нарастания аргумента обе функции – изменяются и по величине и по знаку вблизи нуля и все больше приближаются к синусоиде. В цилиндрической системе координат эти функции выполняют ту же роль, что и функции синус и косинус в прямоугольной системе координат.

В прямоугольной системе координат функции синус и косинус используются записи комплексного числа в тригонометрической форме, т.е.

$$z = a + bi = c(\cos + i \sin).$$

Аналогично цилиндрические функции первого и второго рода тоже можно использовать для записи комплексных чисел в цилиндрической системе координат, т.е.

$$H_0(x) = J_0(x) + i N_0(x).$$

Это и есть функция Ханкеля нулевого порядка, которая используется для описания цилиндрических волн. На рис. 3.4 приводится график модуля функции Ханкеля. Модуль функции, определяет амплитуду цилиндрической волны и уменьшается по мере увеличения ее аргумента. Следовательно, по мере распространения амплитуда цилиндрической волны будет уменьшаться.

На рис. 3.4 сплошной линией построен график модуля функции Ханкеля, а пунктиром – функция $A1/\sqrt{x}$, где $A1$ подобрана так, чтобы при $x = 25$ значение функции совпадало с функцией Ханкеля. Графики практически полностью повторяют друг друга и лишь слегка расходятся при малом значении аргумента.

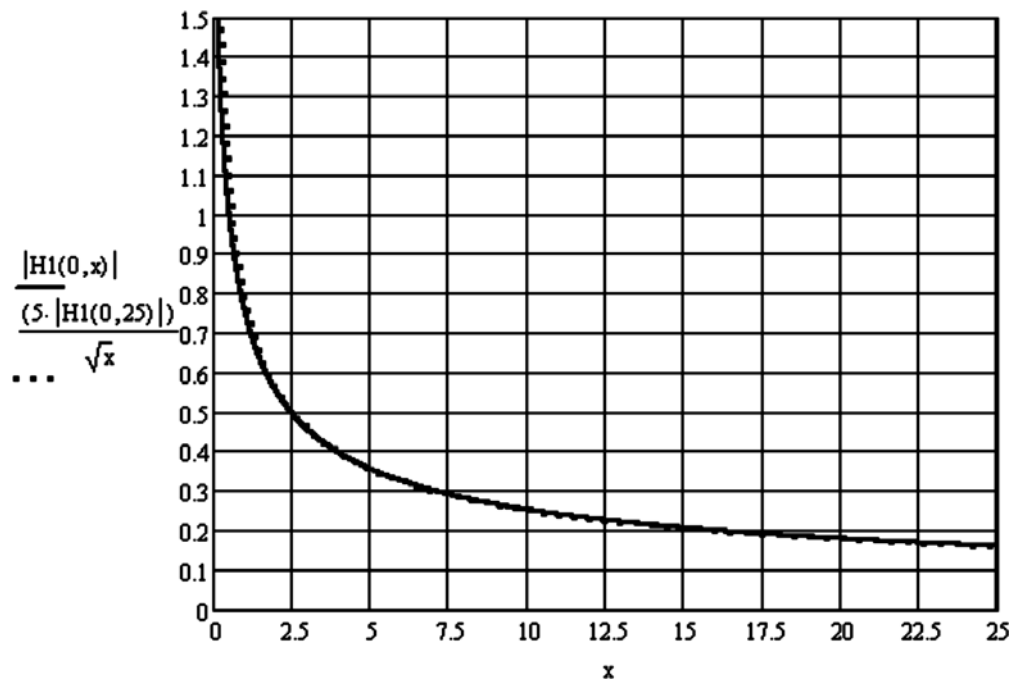


Рис. 4 – График модуля функции Ханкеля

Таким образом, в практических приложениях для расчета электрического поля цилиндрической волны можно пользоваться упрощенным выражением, использующим вместо функции Ханкеля функцию $\sqrt{x}$.

Электрическое поле в цилиндрической волне с помощью функции Ханкеля записывается так:

$$E(\rho, t) = \text{Re}\{H_0(\beta\rho) e^{i\omega t}\}, \quad (31)$$

где ω – круговая частота, а β – волновое число. На больших расстояниях от оси ($\beta\rho \gg 1$) волновое поле приобретает вид:

$$E(\rho, t) = \frac{A}{\sqrt{\rho}} \cos(\omega t - \beta\sqrt{\rho}) \quad (32)$$

Только в этом асимптотическом представлении в цилиндрической волне можно однозначно выделить амплитуду и фазу. В этом приближении фазовая скорость цилиндрической волны совпадает с фазовой скоростью плоской волны. По мере удаления от оси квадрат модуля амплитуды убывает как $1/\rho$, а поверхность цилиндра, охватывающая источник, растет пропорционально ρ , так что, в соответствии с законом сохранения энергии, суммарное значение потока энергии, уносимого от источника на оси, остается постоянным. Электромагнитную волну приближенно можно рассматривать как плоскую с медленно изменяющейся амплитудой. Тогда магнитное поле в волне можно найти, воспользовавшись волновым сопротивлением среды, как это и делалось для плоской волны.

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 моделирования и исследований приведены в пункте 4.1.

3. Задание для работы

Базового уровня:

1) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» параметры плоской электромагнитной волны.

2) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» пространственно-временное распределение векторов напряженностей плоской электромагнитной волны.

Повышенного уровня:

3) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственно-временного распределения векторов напряженностей сферических и цилиндрических электромагнитных волн.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» параметры плоской электромагнитной волны.

1. Исходные данные для моделирования – плоская монохроматическая электромагнитная волна распространяется в среде немагнитного диэлектрика, имеющего следующие параметры: относительная диэлектрическая проницаемость - $\epsilon = 81$, диэлектрическая проводимость - σ_e равна номеру варианта умноженному на 10^{-2} Сименс, относительная магнитная проницаемость $\mu = 1$ и магнитной проводимостью $\sigma_m = 0$. Перед входом в эту среду амплитуда электрического поля E_0 равна номеру варианта, умноженному на 10^{-3} В/м, а частота f – номер варианта, умноженный на 10^7 Герц.

Задача моделирования – в системе «Mathcad» составить программу для расчета и исследования параметров плоской электромагнитной волны, распространяющейся в заданной среде. Программа должна рассчитывать следующие параметры: постоянную (коэффициент) распространения, волновое число, постоянную (коэффициент) затухания, волновое сопротивление, показатель преломления среды, а также фазовую скорость плоской волны.

2. Алгоритм разработки программы в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

– мнимую единицу,

– параметры среды ϵ , σ_e , μ , σ_m ;

– начальные параметры волны E_0 и f ;

– постоянные величины. $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

2) Ввести формулы для расчета параметров среды:

- круговой (циклической) частоты волны – $\omega := 2\pi \cdot f$;
- комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей

$$\epsilon n := \epsilon \cdot \epsilon_0 - i \frac{\sigma_e}{\omega} \quad \mu n := \mu \cdot \mu_0 - i \frac{\sigma_m}{\omega} ;$$

- скорости света – $c_{\text{ср}} := \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$;

- показателя преломления – $n := \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$;

- волновых сопротивлений вакуума и среды – $Z_{\text{св}} := \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad Z_c := \sqrt{\frac{\mu n}{\epsilon n}}$.

3) Ввести формулы для расчета параметров плоской электромагнитной волны:

- постоянной (коэффициента) распространения волны – $\gamma := \omega \cdot \sqrt{\mu n \cdot \epsilon n}$;

- волнового числа или фазовой постоянной – $\beta := \text{Re}(\gamma)$;

- постоянной (коэффициента) затухания волны – $\alpha := \text{Im}(\gamma)$;

- длина волны – $\lambda := \frac{2\pi}{\beta}$;

- фазовой скорости плоской волны – $v_f := \frac{\omega}{\beta}$.

3. Провести расчет параметров плоской электромагнитной волны в воздухе. Для этого выполнить следующие операции:

1) Ввести в составленную программу исходные данные – параметры для воздуха: $\epsilon=1$, $\sigma_e=0$, $\mu=1$, $\sigma_m=0$.

2) Рассчитать параметры среды: показатель преломления n , волновое сопротивление Z_c , сравнить значение последнего с волновым сопротивлением вакуума.

3) Рассчитать параметры плоской электромагнитной волны: коэффициент распространения волны γ , волновое число β , коэффициент затухания волны α , длину волны λ , фазовую скорость плоской волны v_f .

4) Оценить рассчитанные величины, сделать выводы.

4. Провести расчет параметров плоской электромагнитной волны в среде немагнитного диэлектрика. Для этого выполнить следующие операции:

1) Ввести в составленную программу заданные исходные данные – ϵ , σ_e , μ , σ_m .

2) Рассчитать параметры среды: показатель преломления n , волновое сопротивление Z_c , сравнить их значения со значениями для воздуха.

3) Рассчитать параметры плоской электромагнитной волны: коэффициент распространения волны γ , волновое число β , коэффициент затухания волны α , длину волны λ , фазовую скорость плоской волны v_f .

5. Оценить рассчитанные величины, сделать выводы о влиянии реальной среды на параметры плоской электромагнитной волны, определить во сколько раз изменились значения длины волны и фазовой скорости.

Задание 1.2. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» пространственно-временное распределение векторов напряженностей плоской электромагнитной волны.

1. Доработать программу, составленную в предыдущем пункте, и построить графики пространственных и временных зависимостей напряженностей электрического и магнитного полей плоской волны. Для этого выполнить следующие действия.

1) Введите диапазон и шаг изменения времени и пространственной координаты

$$t := 0, \frac{0.01}{\omega} .. \frac{20}{\omega} \quad u := 0, \frac{0.01}{\beta} .. \frac{100}{\beta} .$$

2) Ввести формулы для расчета:

– комплексной амплитуды электрического поля плоской волны в среде, т.е. $EK(u) := E_0 \cdot \exp(-i \cdot \gamma \cdot u)$;

– комплексной амплитуды магнитного поля плоской волны в среде

$$HK(u) := \frac{EK(u)}{Z_c} ;$$

– мгновенного значения электрического поля плоской волны в точке с продольной координатой u в момент времени t

$$E(u, t) := \operatorname{Re}(EK(u) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t)) ;$$

– мгновенного значения магнитного поля плоской волны в точке с продольной координатой u в момент времени t

$$H(u, t) := \operatorname{Re}(HK(u) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t)) .$$

3) Построить на одном графике две зависимости электрического и магнитного полей в плоской волне от времени в точке $u = 0$, т.е. распределение электромагнитной волны во времени. В связи с тем, что амплитуда электрического поля значительно больше магнитного поля, то для удобства сравнительного анализа графиков необходимо мгновенное значение магнитного поля умножить на коэффициент, величиной примерно в 2 раза меньшей, чем модуль волнового сопротивления $|Z_c|$, например как приведено на рис. 5. При этом на графике должно расположиться 3 – 5 периодов колебаний. Для этого необходимо либо изменить на графике верхний предел временной координаты t , либо изменить диапазон изменения времени в цикле программы.

Построить на двух других графиках по две зависимости электрического и магнитного полей в плоской волне от времени в точках пространства с координатами $u = 10/\beta$ и $20/\beta$. Сделать выводы о том, чем отличаются графики и по какой причине.

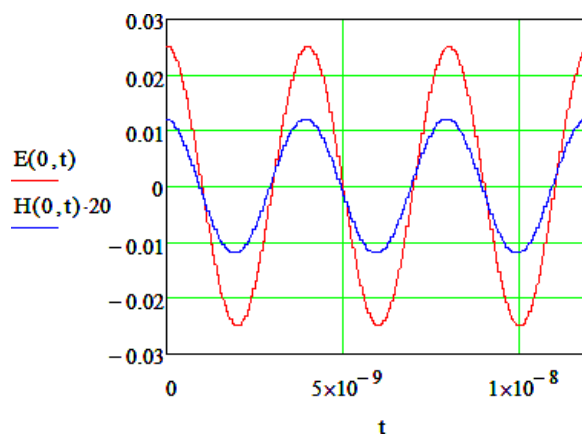


Рис. 5

4) Построить на одном графике две зависимости электрического поля в плоской волне от продольной координаты в точках $t = 0$ и $10/\omega$, т.е. распределение напряженности электрического поля плоской волны в пространстве.

По продольной оси координат u отложить столько колебаний, чтобы было видно затухание сигнала по мере его распространения.

Построить на другом графике две зависимости магнитного поля в плоской волне от продольной координаты в точках $t = 0$ и $10/\omega$, т.е. распределение напряженности магнитного поля плоской волны в пространстве.

Сделать выводы, каковы особенности этих графиков, определить от каких параметры среды они зависят.

5) Ввести формулы для расчета:

– комплексно сопряженного значения амплитуды магнитного поля плоской волны

$$HR1(u) := \text{Re}(HK(u)) - i \cdot \text{Im}(HK(u)) ;$$

– плотность потока активной мощности вдоль оси координат u

$$PSR(u) := \frac{1}{2} \cdot \text{Re}(EK(u) \cdot HR1(u)) ;$$

– плотность потока реактивной мощности вдоль оси координат u

$$QSR(u) := \frac{1}{2} \cdot \text{Im}(EK(u) \cdot HR1(u)) .$$

6) Построить на одном графике две зависимости средних активной и реактивной мощностей от продольной координаты u . Обоснуйте полученные результаты.

2. Сделать выводы по результатам выполненного задания.

Задание 1.3. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственного распространения сферических и цилиндрических электромагнитных волн.

1. Доработать и видоизменить программу, составленную в предыдущем пункте, и построить графики пространственных зависимостей напряженностей электрического поля в плоской, цилиндрической и сферической волнах. Для этого выполнить следующие действия.

1) Удалить в новой программе формульные операторы расчета мощностей и все построенные графики.

2) Изменить диапазон и шаг пространственной координаты

$$u := \frac{1}{\beta}, \frac{1.01}{\beta} .. \frac{50}{\beta}$$

3) Ввести формулы для расчета:

– комплексной амплитуды электрического поля сферической волны в

среде, т.е.
$$EKS(u) := \frac{E_0 \cdot \exp(-i \cdot \gamma \cdot u)}{u};$$

– комплексной амплитуды электрического поля цилиндрической волны в

среде, т.е.
$$EKC(u) := \frac{E_0 \cdot \exp(-i \cdot \gamma \cdot u)}{\sqrt{u}};$$

– мгновенного значения электрического поля сферической волны в точке с продольной координатой u в момент времени t

$$ES(u, t) := \operatorname{Re}(EKS(u) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t));$$

– мгновенного значения электрического поля цилиндрической волны в точке с продольной координатой u в момент времени t

$$EC(u, t) := \operatorname{Re}(EKC(u) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t)).$$

2. Провести исследования особенностей распределения сферических и цилиндрических волн в пространстве по отношению к плоской волне в реальной исследуемой среде. Для этого выполнить следующие операции.

1) Построить на одном графике три зависимости напряженностей электрических полей для плоской, сферической и цилиндрических волн от продольной координаты u при $t = 0$, т.е. распределения амплитуд электромагнитных волн в пространстве.

2) Выбрать начало графика по оси координат u таким образом, чтобы вы-
берете так, чтобы для цилиндрической волны выполнялось условие $\beta u \gg 1$, т.е.
обеспечивалось справедливость выражение (3.32). Например, график можно
начинать со значения продольной координаты $u_0 = 5/\beta$, заканчивать $30/\beta$.

3) Сделать выводы о причинах такого распределения амплитуд напряжен-
ностей электрических полей в сферических и цилиндрических волнах.

3. Рассмотреть особенности распределения сферических и цилиндрических
волн в пространстве по отношению к плоской волне среде без потерь. Для этого
выполнить следующие операции:

– ввести в составленную программу новые исходные данные для вакуума:
 $\varepsilon=1, \sigma_e=0, \mu=1, \sigma_m=0$.

– получить новые графики распределения волн в пространстве;

– сделать выводы.

4. Сделать выводы по результатам выполненного задания.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ моделирования,
- результаты моделирования и исследований – формулы, описывающие электромагнитные поля, полученные результаты и графики;
- выводы о проделанной работе, с разъяснением физического смысла полученных результатов.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ТЕМА 9 ЭКРАНИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПРИРОДЫ

Занятие 8 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Исследование принципов экранирования полей и паразитных связей

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.

- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике

- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности

- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.

- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1

	90 мин
Вводная часть	10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе	8 мин
Вступительная часть	2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:	75 мин
1. Исследование принципов экранирования полей и паразитных связей	75 мин
Заключительная часть	5 мин
Подведение итогов	3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы	2 мин

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ И ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ.

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Под экранированием в общем случае понимается как защита приборов от воздействия внешних полей, так и локализация излучения каких-либо средств, препятствующая проявлению этих излучений в окружающей среде.

Эффективность экранирования определяется степенью ослабления составляющих поля (электрической или магнитной). Она определяется как отношение действующих значений напряженности полей в данной точке пространства при отсутствии и наличии экрана. Так как отношение этих величин достигает больших значений, то удобнее пользоваться логарифмическим представлением эффективности экранирования:

$$K_E = 20 \lg \frac{E_0}{E_1}, dB \quad K_E = 20 \lg \frac{H_0}{H_1}, dB \quad (1)$$

где K_E – коэффициент ослабления (экранирования) по электрической составляющей, K_H коэффициент ослабления (экранирования) по магнитной составляющей, $E_0(H_0)$ – напряженность электрической (магнитной) составляющей поля в отсутствии экрана, $E_1(H_1)$ – напряженность электрической (магнитной) составляющей поля при наличии экрана в той же точке пространства.

Теоретическое решение задачи экранирования чрезвычайно затруднительно, поэтому в зависимости от типа решаемой задачи представляется удобным рассматривать *отдельные виды экранирования*: электрическое, магнито-статическое и электромагнитное. Последнее является наиболее общим и часто применяемым, так как в большинстве случаев экранирования приходится иметь дело либо с переменными, либо с флуктуирующими и реже – действительно со статическими полями.

Главным фактором, определяющим качество экрана, являются радиофизические свойства материала и конструкционные особенности. Это позволяет при

расчете эффективности экрана в реальных условиях пользоваться наиболее простым его представлением: сфера, цилиндр, плоскопараллельный лист и т. п.

Экранирование с хорошим контактом делается медной сеткой или фольгой по всем стенам, потолку и полу, окна закрывают алюминиевыми жалюзи. Принцип действия экранирования представлен на рис. 1.

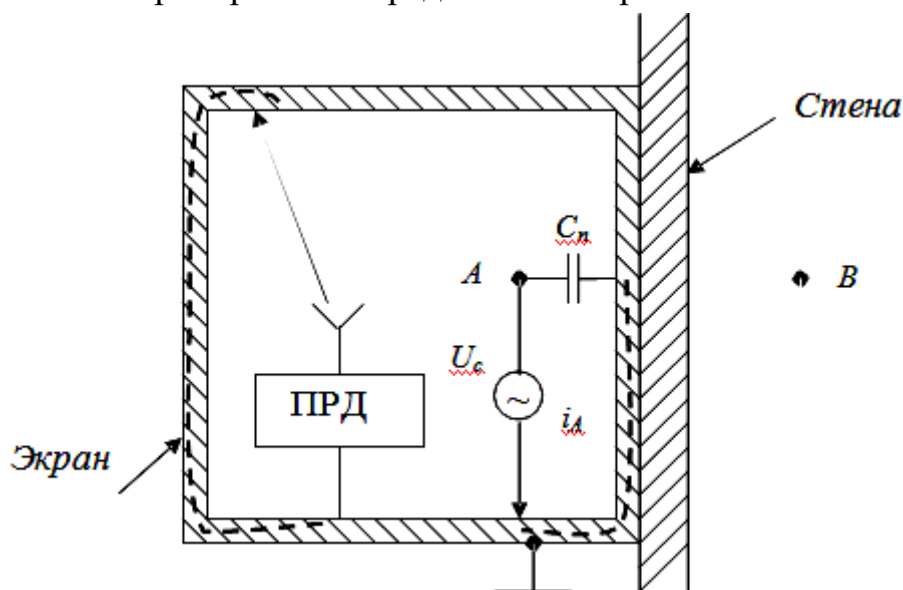


Рис. 1 – Принцип действия экранирования источника ЭМИ

Без экрана информация из точки А от сигнала U_c передавалась в точку В через паразитную емкость C_n , а сигналы от передатчика излучались в пространство. При наличии экрана сигнал с точки А через C_n замыкается на экран, с передатчика сигнал также замыкается на экран. Эффект излучения за пределы помещений снижается в 10 – 1000 раз. Таким образом, в место нахождения агента информация не поступает.

При невозможности использования экранирующих коробов наиболее важные информационные сигналы передаются с использованием экранированных проводов.

Подавление емкостных паразитных связей

Емкостная паразитная связь между двумя электрическими цепями возникает через ближнее электрическое поле. ***Для снижения паразитной емкости между электрическими цепями вводится токопроводящий экран***, соединенный с общим проводом и замыкающий на общий провод большую часть электрических силовых линий.

Введением экрана, имеющего сопротивление, равное нулю относительно общего провода, теоретически наводку можно снизить до нуля. Практически же всегда из-за наличия проводников и технологических отверстий и возникновения краевых эффектов имеется остаточное ближнее электрическое поле и, следовательно, остаточная емкость.

При экранировании электрического поля очень важно создать низкое сопротивление экрана относительно корпуса (общего провода). Появление любого сопротивления, особенно индуктивного, в цепи соединения экрана с общим проводом создает эффект паразитной связи через посторонний провод, поэтому все

металлические элементы конструкции всегда должны тщательно соединяться между собой и с общим проводом.

Подавление индуктивных паразитных связей

Паразитная индуктивная связь возникает между двумя электрическими цепями через ближнее магнитное поле. Для снижения величины магнитных полей используют **два вида экранирования: магнитостатическое и динамическое.**

Магнитостатическое экранирование или экранирование шунтированием магнитного поля основано на применении экранов из ферромагнитных материалов с большой магнитной проницаемостью. Эффективность экранирования снижается при наличии в конструкции экрана стыков и швов, идущих поперек линий магнитного поля и снижающих эффективное значение магнитной проницаемости экрана. Сущность **динамического экранирования** заключается в том, что переменное магнитное поле ослабляется по мере проникновения в металл, так как внутренние слои экранируются вихревыми токами, возникающими в слоях, расположенных ближе к поверхности.

Экранирование проводов и катушек индуктивности

При экранировании реальных элементов, например трансформаторов, катушек индуктивности, проводов и т. д., обычно требуется одновременное экранирование от электрических и магнитных полей.

Наилучшую защиту, как от электрического, так и от магнитного полей обеспечивают информационные линии связи типа экранированного бифиляра, трифиляра (трех скрученных вместе проводов, из которых один используется в качестве электрического экрана), триаксиального кабеля (изолированного коаксиального кабеля, помещенного в электрический экран), экранированного плоского кабеля (плоского многопроводного кабеля, покрытого с одной или обеих сторон медной фольгой). Чтобы уменьшить уровень ПЭМИ, необходимо особенно тщательно выполнять соединение оболочки провода (экрана) с корпусом аппаратуры. Экранированные провода и кабели следует применять в основном для соединения отдельных блоков и узлов друг с другом. Кабельные экраны выполняются в форме цилиндра из сплошных оболочек, в виде спирально намотанной на кабель плоской ленты или в виде оплетки из тонкой проволоки. Экраны однослойные и многослойные. Материал: свинец, сталь, медь, алюминий или их сочетание.

Для полного экранирования проводов от электрических и магнитных полей необходимо добиваться, чтобы весь обратный ток протекал по экрану, т. е. чтобы токи, протекающие по экранируемому проводу и экрану, были равны между собой (рис. 2, а). Для этого необходимо выводы генератора и нагрузки подключать к проводу и экрану непосредственно без промежуточных проводников, а соединение с корпусом производить в одной точке, лучше со стороны приемника сигнала.

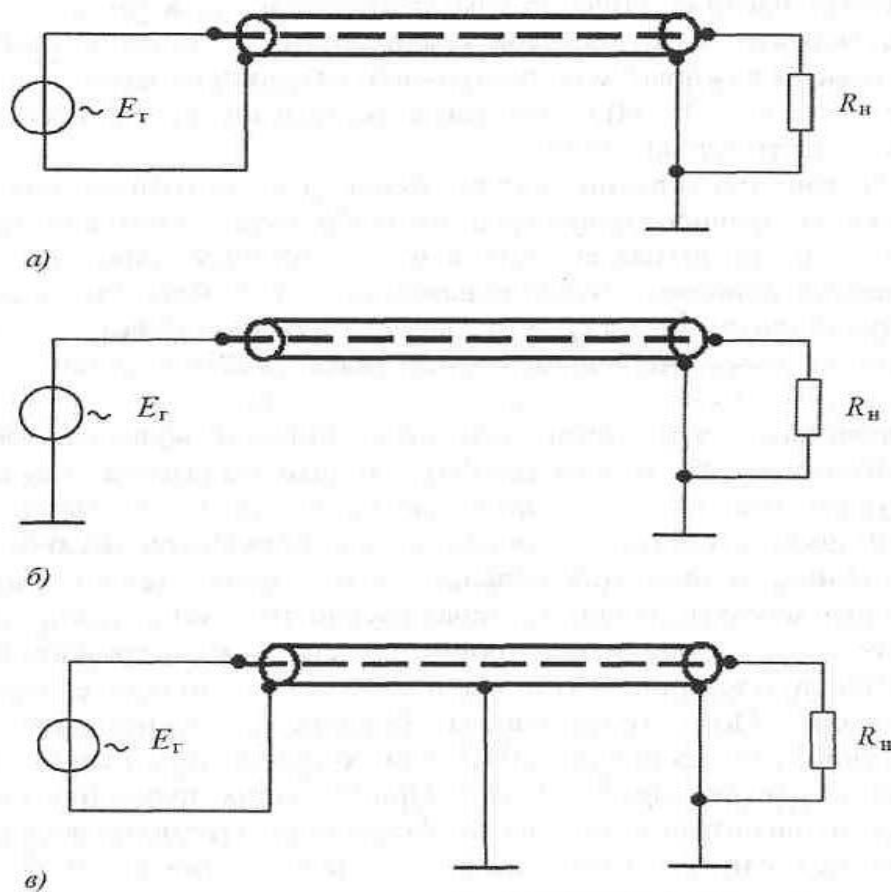


Рис. 2 – Полное экранирование провода от электрических и магнитных полей (а), экранирование провода от электрических полей (б), экранирование и замыкание части экрана провода на корпус (в)

При подключении общего провода генератора к корпусу, а не к экрану (рис. 2, б) получается экранирование только от электрических полей, при отсутствии соединения экрана с общим проводом никакого экранирующего эффекта не возникает. При замыкании экрана на корпус (рис. 3.2, в) нарушается магнитное экранирование части провода, расположенного между точкой замыкания экрана на корпус и нагрузкой. В этом случае довольно часто наблюдается, что при отключении соединения экрана около нагрузки уровень наводок снижается. Если это явление наблюдается, необходимо найти и устранить замыкание экрана на корпус.

На высоких частотах из-за поверхностного эффекта обратный ток протекает в основном по внутренней поверхности экрана, поэтому на частотах более 10 МГц замыкание экранов на корпус не снижает эффективности экранирования. Экранироваться могут не только отдельные блоки аппаратуры и их соединительные линии, но и помещения в целом.

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 14»;

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

1. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.
2. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.
3. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.

4.1.1. Собрать и отладить схему замещения, представленную на рис. 3, с указанными на схеме параметрами. Данной схемой моделируется электромагнитное излучение, создаваемое источником, помещенным в экран в соответствии с рис. 1, приведенным в теоретической части. В данной схеме замещения емкость $C1$ представляет собой паразитную емкость между точкой излучения и экраном, а емкость $C2$ – паразитная емкость между экраном и точкой приема. Поскольку емкости равны, то можно считать, что экран находится посередине между точками излучения и приема. Сопротивления $R1$ и $R2$ – сопротивления среды. $R3$ – сопротивление экрана. $R4$ – входное сопротивление измерителя (приемника) излучения.

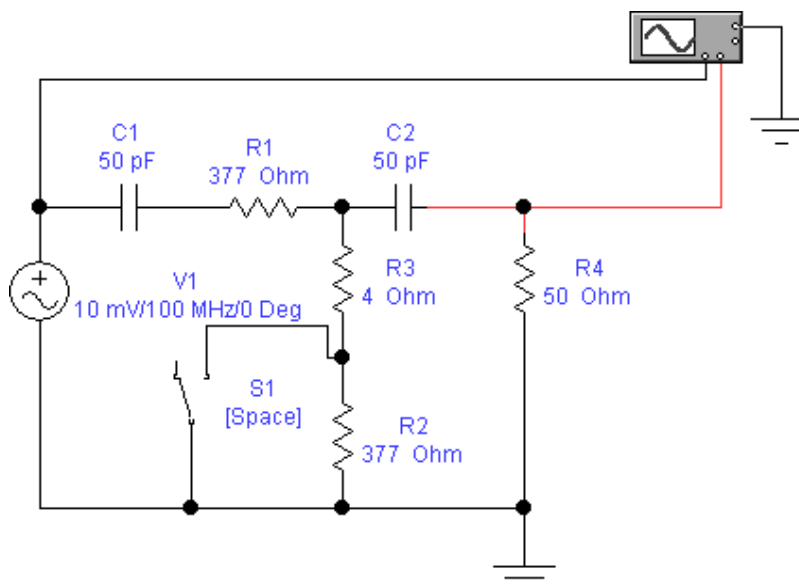


Рис. 3 – Моделируемая эквивалентная схема экранирования источника электромагнитного излучения

2. Провести исследование смоделированной схемы замещения. Для этого выполнить следующие операции:

1) При отключенном заземлении экрана произвести измерение напряжения сигнала ЭМИ в точке *A* по 1-му каналу осциллографа, а по 2-му каналу – напряжение сигнала ЭМИ в точке *B*. Отобразить в отчете эпюры напряжения сигналов U_A и U_B электромагнитного излучения.

2) Рассчитать коэффициент эффективности экранирования (коэффициент ослабления) для случая незаземленного экрана.

3) Смоделировать перенос экрана, для этого изменить величины паразитных емкостей, например $C1=100$ пФ, а $C2=10$ пФ или наоборот. Повторить пункты 1) и 2). Сделать выводы.

4) Заземлить экран, затем произвести измерение напряжения сигнала ЭМИ в точке *A* по 1-му каналу осциллографа, а по 2-му каналу – напряжение сигнала ЭМИ в точке *B*. Отобразить в отчете эпюры напряжения сигналов U_A и U_B электромагнитного излучения.

5). Рассчитать коэффициент эффективности экранирования (коэффициент ослабления) для случая заземленного экрана.

6) Сделать выводы об эффективности электромагнитного экранирования.

Задание 1.2. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.

1. Собрать и отладить схему замещения, представленную на рис. 4, с указанными на схеме параметрами. Данной схемой моделируется пример экранирования кабеля, представленный на рис. 2, б), то есть осуществляется экранирование только электрического поля. В этом случае между проводом и экраном возникает паразитная индуктивная связь, которая смоделирована за счет трансформатора Т1. В трансформаторе Т1 установить коэффициент трансформации $n = 1$, индуктивность рассеяния $LE = 0.1$ мкГн, а индуктивность первичной обмотки $LM = 5$ мкГн. В схеме замещения R1 моделирует внутренне сопротивление источника ЭДС (сигнала), R2 – сопротивление центральной жилы кабеля, R3 – сопротивление оплетки (экрана) кабеля, R4 – сопротивление заземления.

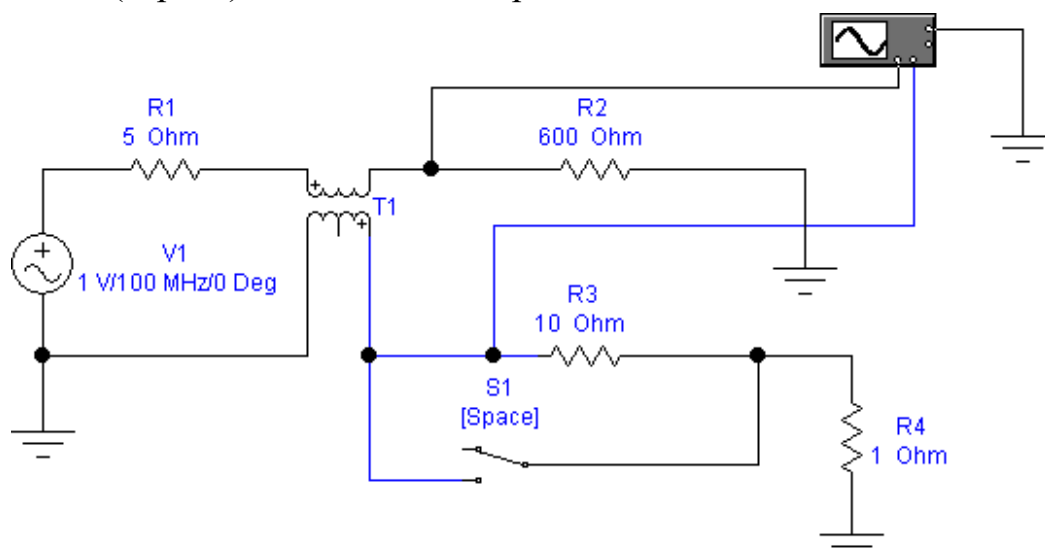


Рис. 4 – Моделируемая эквивалентная схема электрического экранирования провода

2. Провести исследование смоделированной схемы замещения. Для этого выполнить следующие операции:

1) При отключенном заземлении экрана произвести измерение напряжения U_c электрического тока в проводнике по 1-му каналу осциллографа, а по 2-му каналу – напряжение наводки $U_{HЭ}$ на экране провода. Отобразить в отчете эпюры напряжения сигналов U_c и $U_{HЭ}$.

2) Рассчитать коэффициент эффективности экранирования (коэффициент ослабления) при незаземленном экране.

3) Заземлить экран кабеля, затем произвести измерение напряжения U_c электрического тока в проводнике по 1-му каналу осциллографа, а по 2-му каналу – напряжение наводки $U_{HЭ}$ на экране провода. Отобразить в отчете эпюры напряжения сигналов U_c и $U_{HЭ}$.

4) Рассчитать коэффициент эффективности экранирования (коэффициент ослабления) при заземленном экране.

5) Сделать выводы об эффективности экранирования.

Задание 1.3. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.

1. Собрать и отладить схему замещения, представленную на рис. 5, с указанными на схеме параметрами. Данной схемой моделируется пример экранирования кабеля, представленный на рис. 2, в). В этом случае между проводом и экраном может возникнуть паразитная емкостная связь, которая смоделирована за счет емкости $C1$. В схеме замещения $R1$ моделирует внутренне сопротивление источника ЭДС (сигнала), $R2$ – сопротивление центральной жилы кабеля, $R3$ – сопротивление оплетки (экрана) кабеля, $R4$ – сопротивление заземления.

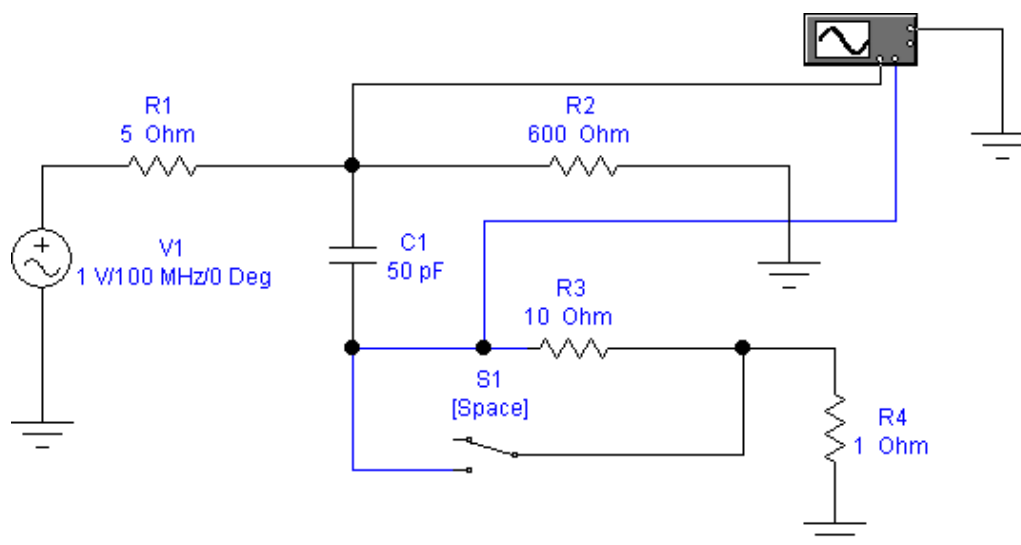


Рис. 5 – Моделируемая эквивалентная схема магнитного экранирования провода

2. Провести исследование смоделированной схемы замещения. Для этого выполнить следующие операции:

1) При отключенном заземлении экрана произвести измерение напряжения U_c электрического тока в проводнике по 1-му каналу осциллографа, а по 2-му

каналу – напряжение наводки $U_{HЭ}$ на экране провода. Отобразить в отчете эпюры напряжения сигналов U_c и $U_{HЭ}$.

2) Рассчитать коэффициент эффективности экранирования (коэффициент ослабления) при незаземленном экране.

3) Заземлить экран, затем произвести измерение напряжения U_c электрического тока в проводнике по 1-му каналу осциллографа, а по 2-му каналу – напряжение наводки $U_{HЭ}$ на экране провода. Отобразить в отчете эпюры напряжения сигналов U_c и $U_{HЭ}$.

4) Рассчитать коэффициент эффективности экранирования (коэффициент ослабления) при заземленном экране.

5) Сделать выводы об эффективности экранирования.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схемотехнические модели устройств;
- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ТЕМА 10

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Занятие 9

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ВРЕМЯ – 4 часа.

Учебные вопросы:

1. Исследование распределения тока и напряжения в RL - цепи.
2. Исследование распределения тока и напряжения в RC - цепи.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Исследование распределения тока и напряжения в RL - цепи.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
1. Исследование распределения тока и напряжения в RC - цепи.		50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В RL - ЦЕПИ.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Варианты заданий для предварительного расчета и исследования

Вариант №	Е, В	R, Ом	L, мГн	С, мкФ	Вариант №	Е, В	R, Ом	L, мГн	С, мкФ
1	100	50	0.10	0.010	31	150	50	0.16	0.015
2	120	40	0.12	0.015	32	160	40	0.18	0.016
3	140	60	0.13	0.016	33	170	60	0.19	0.020
4	150	70	0.15	0.020	34	180	70	0.20	0.018
5	160	80	0.11	0.018	35	190	80	0.10	0.019
6	170	90	0.14	0.019	36	200	90	0.12	0.011
7	180	55	0.16	0.011	37	130	55	0.13	0.012
8	190	65	0.18	0.012	38	120	65	0.15	0.009
9	200	45	0.19	0.009	39	140	45	0.11	0.021
10	130	35	0.20	0.021	40	150	35	0.14	0.020
11	120	70	0.10	0.020	41	160	70	0.16	0.018
12	140	80	0.12	0.018	42	170	80	0.18	0.019

Вариант №	Е, В	R, Ом	L, мГн	С, мкФ	Вариант №	Е, В	R, Ом	L, мГн	С, мкФ
13	150	90	0.13	0.019	43	180	90	0.19	0.011
14	160	55	0.15	0.011	44	190	55	0.10	0.012
15	170	65	0.11	0.012	45	200	65	0.12	0.009
16	180	45	0.14	0.009	46	130	45	0.13	0.021
17	190	35	0.16	0.021	47	120	35	0.15	0.020
18	200	70	0.18	0.020	48	140	70	0.11	0.018
19	130	80	0.19	0.018	49	150	80	0.11	0.010
20	120	70	0.10	0.010	50	160	70	0.14	0.015
21	140	80	0.12	0.015	51	170	80	0.16	0.016
22	150	90	0.13	0.016	52	100	90	0.18	0.020
23	160	55	0.15	0.020	53	120	55	0.19	0.018
24	170	65	0.11	0.018	54	140	65	0.20	0.009
25	100	45	0.11	0.009	55	150	45	0.16	0.021
26	120	35	0.14	0.021	56	160	35	0.18	0.020
27	140	70	0.16	0.020	57	170	70	0.19	0.018
28	150	80	0.18	0.018	58	150	80	0.20	0.019
29	160	90	0.19	0.019	59	160	90	0.10	0.011
30	170	55	0.20	0.011	60	170	55	0.12	0.015

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

- 1.1) Исследование распределения напряжения в неразветвленной RL - цепи.
- 1.2) Исследование распределения тока в разветвленной RL - цепи.

1.4. Порядок выполнения работы

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, источник напряжения управляемый током, резистор, индуктивную катушку, конденсатор, осциллограф, амперметр и вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов между током и напряжением.

Задание 1.1. Исследование распределения напряжения в неразветвленной RL - цепи

- 1.1. Собрать схему электрической цепи (см. рис. 1).

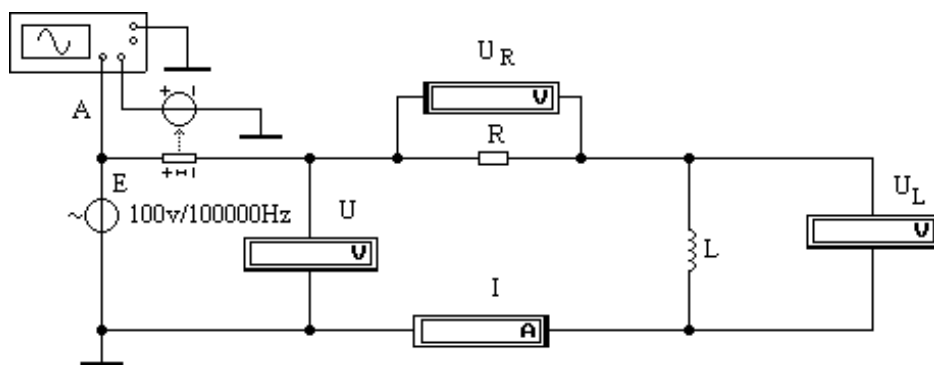


Рис. 1 – Схема исследования RL- цепи

1.2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и индуктивности L , значения ЭДС E и частоты $f = 10^5$ Гц источника. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "В" осциллографа установить желательный цвет осциллограммы (например, красный).

1.3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу 2 результатов исследований.

Таблица 2 – Результаты исследований неразветвленных цепей синусоидального тока

Вид цепи	параметры	I, A	U, B	U_R, B	U_L, B	U_C, B	T_2-T_1, c	$\varphi(t),$ градусы
RL- цепь	$0.5L=$					-		
	$L=$					-		
	$2L=$					-		
RC- цепь	$0.5C=$				-			
	$C=$				-			
	$2C=$				-			

1.4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма напряжения $u(t)$), а визирную линейку 2 – в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма тока $i(t)$). Значение временного промежутка T_2-T_1 занести в таблицу 2.

- 1.5. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Здесь $T = 1/f$ – период синусоидальной ЭДС источника. Значение сдвига фаз занести в таблицу 2.
- 1.6. Установить индуктивность катушки $0.5L$, выполнить п.п. 1.3 – 1.5.
- 1.7. Установить индуктивность катушки $2L$, выполнить п.п. 1.3 – 1.5.
- 1.8. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$ исследовать зависимость напряжения в RL- цепи от частоты, для этого выполнить пункты 1.3 – 1.5.
- 1.9. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений для всех исследуемых случаев.
- 1.10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.2 Исследование распределения тока в разветвленной RL - цепи.

- 1.1. Собрать схему электрической цепи (рис. 1).

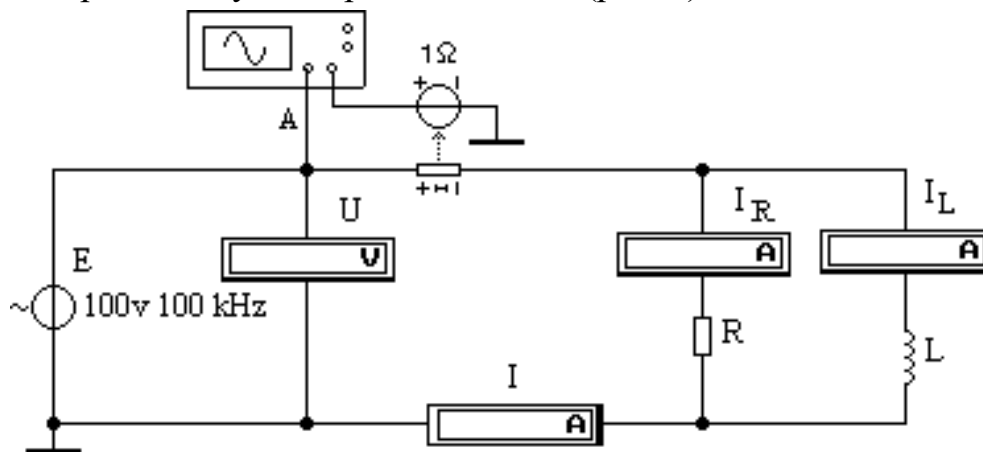


Рис. 1 – Схема исследования RL-цепи

1.2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и индуктивности L , значения ЭДС E и частоты $f = 10^5$ Гц источника. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет осциллограммы (например, красный).

1.3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу результатов исследований.

Таблица 3 – Результаты исследований разветвленных цепей синусоидального тока.

Вид цепи	Параметры	U, В	I, А	I _R , А	I _L , А	I _C , А	T ₂ -T ₁ , с	φ(t), град
RL-цепь	0.5L=					-		
	L=					-		
	2L=					-		
RC-цепь	0.5C=				-			
	C=				-			
	2C=				-			

1.4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма напряжения $u(t)$), а визирную линейку 2 – в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма тока $i(t)$). Значение временного промежутка **T₂-T₁** занести в таблицу 2.

1.5. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Здесь $T=1/f$ – период синусоидальной ЭДС источника.

1.6. Установить индуктивность катушки 0.5L, выполнить п.п. 1.3 – 1.5.

1.7. Установить индуктивность катушки 2L, выполнить п.п. 1.3 – 1.5.

1.8. Устанавливая частоту источника 0.2f, 0.5f, 2f, 5f исследовать зависимость тока в разветвленной RL- цепи от частоты, для этого выполнить пункты 1.3 – 1.5.

1.9. По результатам исследований построить векторные диаграммы токов и напряжения для всех исследуемых случаев.

1.10. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета. Сделать выводы.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В RC - ЦЕПИ.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по второму учебному вопросу

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1.

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

2.1) Исследование распределения напряжения в неразветвленной RC - цепи.

2.2) Исследование распределения тока в разветвленной RC - цепи.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 2.1 Исследование распределения напряжения в неразветвленной RC - цепи.

2.1. Собрать схему электрической цепи (см. рис. 2).

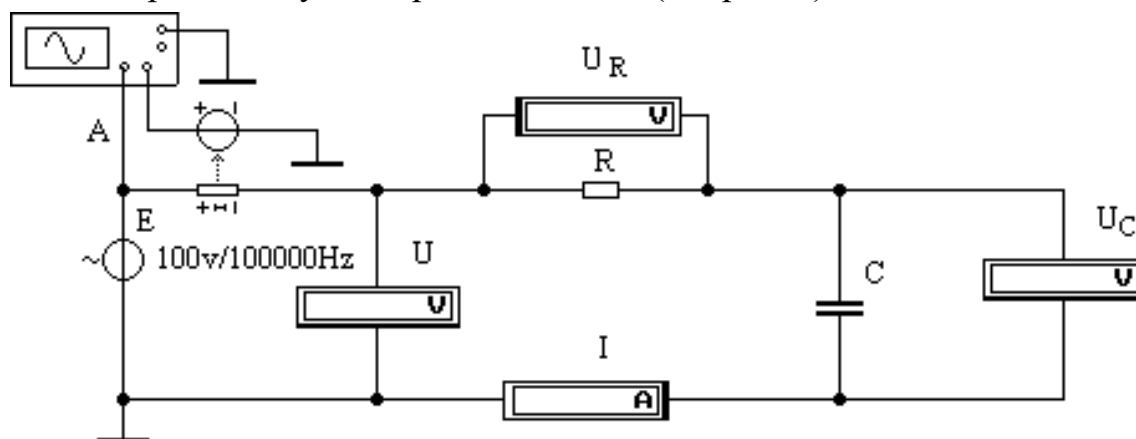


Рис. 2 – Схема исследования RC- цепи

2.2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и емкости конденсатора C, значение ЭДС источника $E = 150\text{В}$ и частоты $f = 10^5$ Гц. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "В" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный).

2.3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу 2 результатов исследований.

2.4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$ и занести в таблицу 2.

2.5. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Значение сдвига фаз занести в таблицу 2.

2.6. Установить емкость конденсатора $0.5C$, выполнить п.п. 2.3 – 2.5.

2.7. Установить емкость конденсатора $2C$, выполнить п.п. 2.3 – 2.5.

2.8. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$ исследовать зависимость напряжения в RC- цепи от частоты, для этого выполнить пункты 2.3 – 2.5.

2.9. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений для всех исследуемых случаев.

2.10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 2.2 Исследование распределения тока в разветвленной RC - цепи

2.1. Собрать схему электрической цепи (рис. 2).

2.2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и емкости конденсатора C, значение ЭДС источника $E = 150\text{В}$ и частоты $f = 10^5$ Гц. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный).

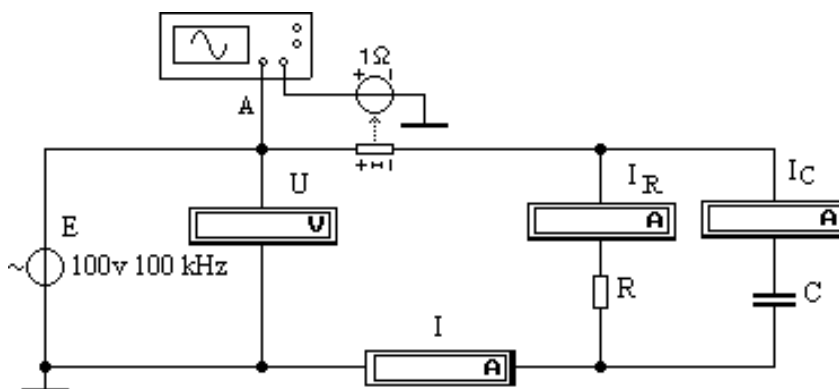


Рис. 2 – Схема исследования RC-цепи

2.3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку - «0-1» перевести в положение 1 - «Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу результатов исследований.

2.4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка (сдвига) $T_2 - T_1$ и занести в таблицу 2.

2.5. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$.

2.6. Установить емкость конденсатора $0.5C$, выполнить п.п. 2.3 – 2.5.

2.7. Установить емкость конденсатора $2C$, выполнить п.п. 2.3 – 2.5.

2.8. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$ исследовать зависимость тока в разветвленной RC-цепи от частоты, для этого выполнить пункты 2.3 – 2.5.

2.9. По результатам исследований построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследуемых случаев.

2.10. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета. Сделать выводы.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,

- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схемотехнические модели устройств;
- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ТЕМА 11

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Занятие 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Исследование распределения тока и напряжения в колебательной цепи.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1

Вводная часть	90 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе	10 мин
Вступительная часть	8 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:	2 мин
1. Исследование распределения тока и напряжения в колебательной цепи.	50 мин
Заключительная часть	50 мин
Защита отчетов по лабораторной работе	30 мин
Подведение итогов	25 мин
Задание студентам для самостоятельной работы	3 мин
	2 мин

1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЗОНАНСНОЙ ЦЕПИ

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1.1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Варианты заданий для предварительного расчета и исследования

Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ
1	100	50	0.10	0.010	31	150	50	0.16	0.015
2	120	40	0.12	0.015	32	160	40	0.18	0.016
3	140	60	0.13	0.016	33	170	60	0.19	0.020
4	150	70	0.15	0.020	34	180	70	0.20	0.018
5	160	80	0.11	0.018	35	190	80	0.10	0.019
6	170	90	0.14	0.019	36	200	90	0.12	0.011
7	180	55	0.16	0.011	37	130	55	0.13	0.012
8	190	65	0.18	0.012	38	120	65	0.15	0.009
9	200	45	0.19	0.009	39	140	45	0.11	0.021
10	130	35	0.20	0.021	40	150	35	0.14	0.020
11	120	70	0.10	0.020	41	160	70	0.16	0.018
12	140	80	0.12	0.018	42	170	80	0.18	0.019
13	150	90	0.13	0.019	43	180	90	0.19	0.011
14	160	55	0.15	0.011	44	190	55	0.10	0.012
15	170	65	0.11	0.012	45	200	65	0.12	0.009
16	180	45	0.14	0.009	46	130	45	0.13	0.021
17	190	35	0.16	0.021	47	120	35	0.15	0.020
18	200	70	0.18	0.020	48	140	70	0.11	0.018
19	130	80	0.19	0.018	49	150	80	0.11	0.010
20	120	70	0.10	0.010	50	160	70	0.14	0.015
21	140	80	0.12	0.015	51	170	80	0.16	0.016
22	150	90	0.13	0.016	52	100	90	0.18	0.020

Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ
23	160	55	0.15	0.020	53	120	55	0.19	0.018
24	170	65	0.11	0.018	54	140	65	0.20	0.009
25	100	45	0.11	0.009	55	150	45	0.16	0.021
26	120	35	0.14	0.021	56	160	35	0.18	0.020
27	140	70	0.16	0.020	57	170	70	0.19	0.018
28	150	80	0.18	0.018	58	150	80	0.20	0.019
29	160	90	0.19	0.019	59	160	90	0.10	0.011
30	170	55	0.20	0.011	60	170	55	0.12	0.015

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

1.1) Исследование распределения напряжения в последовательном колебательном контуре

1.2) Исследование распределения напряжения в параллельном колебательном контуре

1.4. Порядок выполнения работы

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, источник напряжения управляемый током, резистор, индуктивную катушку, конденсатор, осциллограф, амперметр и вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов между током и напряжением.

Задание 1.1. Исследование распределения напряжения в последовательном колебательном контуре

1. Собрать схему электрической цепи (см. рис. 1).

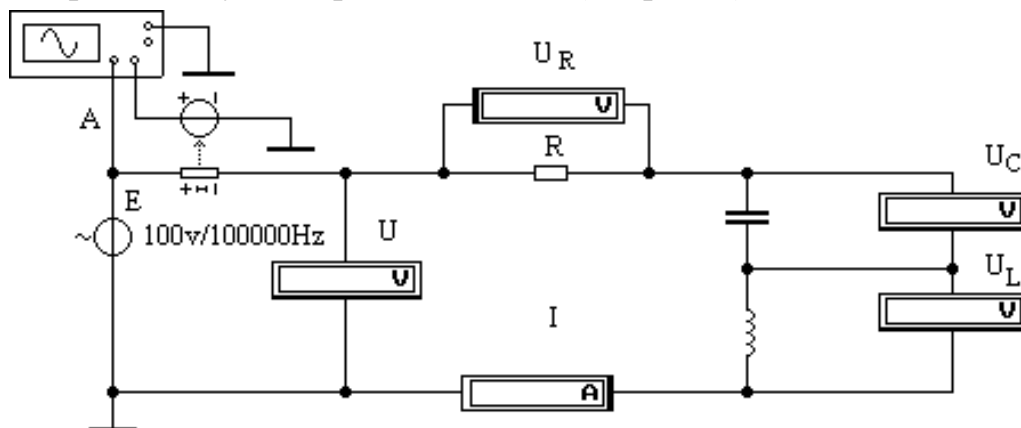


Рис. 1 – Схема исследования RLC- цепи

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R , индуктивности L и емкости конденсатора $C_{рез} = \frac{I}{4\pi^2 \cdot 10^{10} \cdot L}$, значение ЭДС и частоты $f = 10^5$ Гц источника E .

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу 2 результатов исследований.

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$ и занести в таблицу 2.

Таблица 2– Результаты исследований RLC цепи

Вид цепи	параметры	I, A	U, B	U_R , B	U_L , B	U_C , B	$T_2 - T_1$, с	$\varphi(t)$, градусы
RLC-цепь	$C < C_{рез}$							
	$C_{рез} =$							
	$C > C_{рез}$							

5. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Значение сдвига фаз занести в таблицу 2.

6. Установить емкость конденсатора $C < C_{рез}$, выполнить п.п. 3.3 – 3.5.

7. Установить емкость конденсатора $C > C_{рез}$, выполнить п.п. 3.3 – 3.5.

8. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$ исследовать зависимость напряжения в RLC- цепи от частоты, для этого выполнить пункты 3 – 5.

9. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений для всех исследуемых случаев.

10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.2 Исследование распределения тока в параллельном колебательном контуре.

1. Собрать схему электрической цепи (рис. 2).

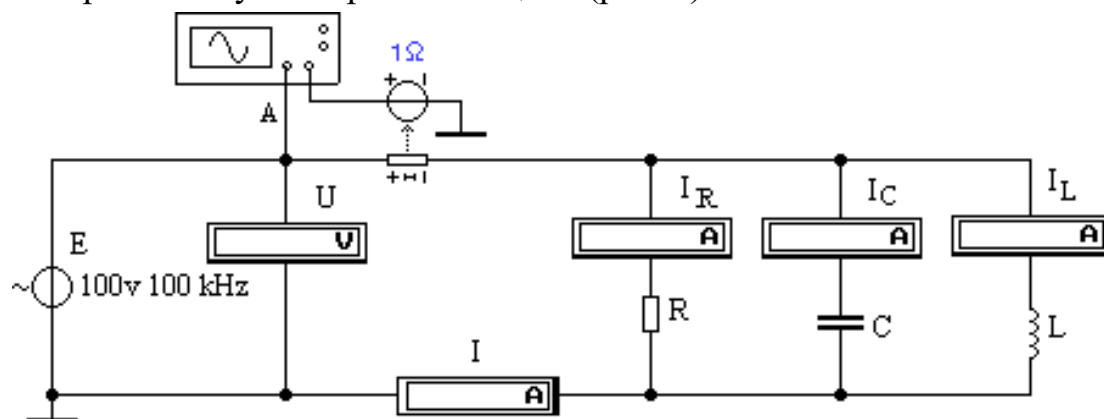


Рис. 2 – Схема исследования RLC-цепи

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R , индуктивности L и емкости конденсатора $C_{рез} = \frac{I}{4\pi^2 \cdot 10^{10} \cdot L}$, значение ЭДС и частоты $f = 10^5$ Гц источника E .

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу результатов исследований.

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$ и занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты исследований RLC цепи

Вид цепи	Параметры	U, В	I, А	I _R , А	I _L , А	I _C , А	T ₂ -T ₁ , с	φ(t), град
RLC-цепь	C < C _{рез}					-		
	C _{рез} =					-		
	C > C _{рез}					-		

5. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$.

6. Установить емкость конденсатора $C < C_{рез}$, выполнить п.п. 3.3 – 3.5.

7. Установить емкость конденсатора $C > C_{рез}$, выполнить п.п. 3.3 – 3.5.

8. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$, исследовать зависимость тока в RLC- цепи от частоты $C = C_{рез}$, для этого выполнить пункты 3 – 5.

9. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений для всех исследуемых случаев.

10. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета. Сделать выводы.

1.5. Составить отчет о проделанной работе в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схемотехнические модели устройств;
- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

1.6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ТЕМА 12 ПАРАЗИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Занятие 11 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАВОДОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ЗА СЧЕТ ВНЕШНИХ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ

ВРЕМЯ – 4 часа.

Учебные вопросы:

- 1. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних емкостных и гальванических паразитных связей.**
- 2. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних индуктивных паразитных связей.**

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних емкостных и гальванических паразитных связей.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
2. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних индуктивных паразитных связей.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАВОДОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ЗА СЧЕТ ВНЕШНИХ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Порядок расчета наводок в каналах связи при внешней параллельной паразитной связи

В электронных устройствах чаще других имеет место внешняя параллельная емкостная паразитная связь. Эквивалентная схема паразитной емкостной связи представлена на рис. 2.1. Сопротивление Z_{ex1} представлено в виде параллельно соединенных R_{ex1} и C_{ex1} . Второй канал показан упрощенно, так как его параметры слабо влияют на значение наводки из второго канала в первый.

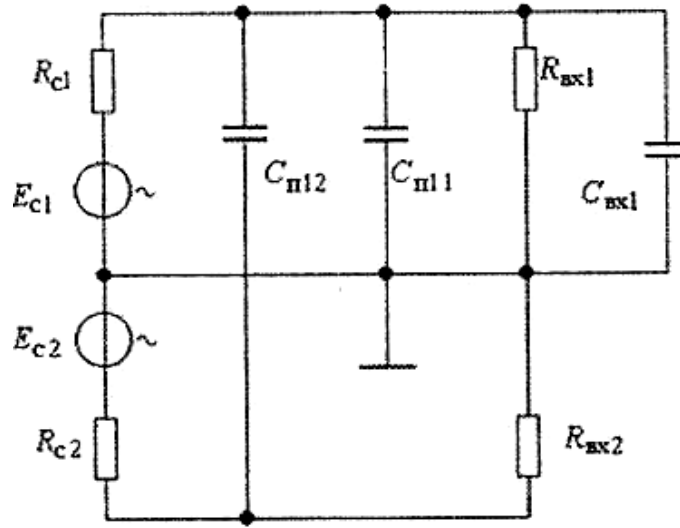


Рис. 1 – Эквивалентная схема внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами

Рассмотрим порядок расчета помехи $U_{n.n12}$, наводимой из второго канала в первый. Напряжение сигнала во втором канале (на сопротивлении $R_{вх2}$) определяется выражением

$$U_{c2} = E_{c2} R_{вх2} / (R_{c2} + R_{вх2}). \quad (1)$$

Входное сопротивление первого канала для сигнала наводки образуется параллельным соединением следующих элементов: выходного сопротивления генератора R_{c1} , паразитной емкости C_{n11} , входного сопротивления сигнала $R_{вх}$ и входной емкости приемника сигнала, то есть

$$Z_{к1} = X_{c1} \parallel R_{к1},$$

где X_{c1} – импеданс паразитной емкости C_{n1} ;

$$C_{к1} = C_{n11} + C_{вх1} + C_{n12}; \quad R_{к1} = R_{вх1} R_{c1} / (R_{вх1} + R_{c1}).$$

Здесь $R_{к1}$ и $C_{к1}$ – входное сопротивление и собственная емкость первого канала.

При гармоническом сигнале во втором канале амплитуда помехи в первом канале определяется по выражению

$$U_{n.n12} = \frac{U_{c2} \cdot T_{n12} \cdot \omega_{c2}}{\sqrt{1 + T_{к1}^2 \omega_{c2}^2}}, \quad (2)$$

где $T_{к1} = R_{к1} C_{к1}$ – постоянная времени первого канала связи; $T_{n12} = R_{к1} C_{n12}$ – постоянная времени цепи паразитной связи первого канала со вторым; ω_{c2} – частота гармонического сигнала во втором канале.

Передающая функция канала емкостной параллельной паразитной связи

$$W_{n.n12}(p) = \frac{p C_{n12} \cdot R_{к1}}{(p R_{к1} \cdot C_{к1} + 1)} = \frac{T_{n12} p}{(T_{к1} p + 1)}, \quad (3)$$

а в соответствии с передаточной функцией определяется амплитудно-частотная характеристика

$$A_{n.n12}(\omega) = \frac{T_{n12} \cdot \omega_{c2}}{\sqrt{1 + T_{\kappa 1}^2 \omega_{c2}^2}} \quad (4)$$

Для случая внешней резистивной параллельной паразитной связи, представленной на рис. 2, передаточная функция определяется выражением

$$W_{n.n12}(p) = \frac{R_{\kappa 1}}{R_{n12}} \cdot \frac{1}{T_{\kappa 1} p + 1} \quad (5)$$

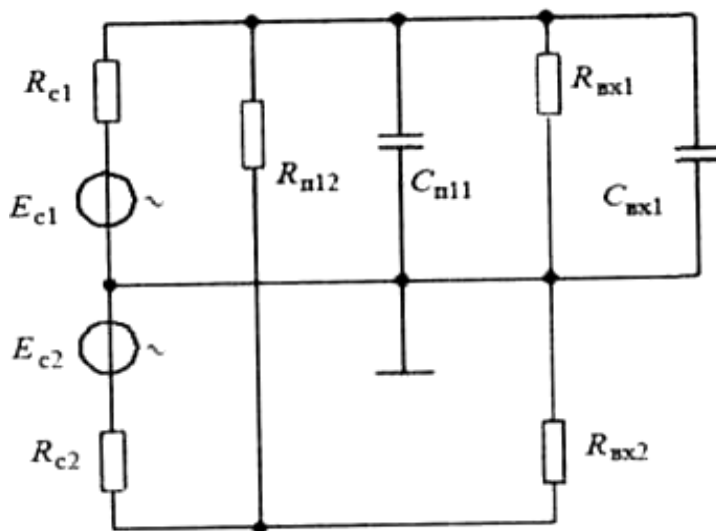


Рис. 2 – Эквивалентная схема внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами

При гармоническом сигнале E_{c2} в соответствии с (5) амплитуда помехи (наводки) равна

$$U_{n.n12} = \frac{U_{c2} \cdot R_{\kappa 1}}{(R_{n12} \cdot \sqrt{1 + T_{\kappa 1}^2 \omega_{c2}^2})} \quad (6)$$

Порядок расчета наводок в каналах связи при внешней паразитной связи последовательного типа

Появление паразитных связей последовательного вида возможно при наличии общих проводов и не равных нулю значений выходных сопротивлений вторичных источников питания, шин питания, цепей заземления.

Причиной появления последовательной помехи (наводки) на высоких частотах является паразитная связь из-за взаимной индуктивности между проводами (рис. 2.3). В этом случае отсутствие общих проводов не гарантирует отсутствие токовой наводки.

При гармоническом сигнале токовая наводка

$$U_{\tau, \text{п}12} = E_{\text{с}2} \omega_{\text{с}2} M_{\text{п}12} / (R_{\text{вх}2} + R_{\text{с}2}). \quad (7)$$

В формуле (7) $R_{\text{вх}2}$ и $R_{\text{с}2}$ рассчитываются по методике, рассмотренной в предыдущем вопросе.

В случае импульсных сигналов величина токовой наводки в первом канале связи определяется крутизной фронтов t_{ϕ} импульса во втором канале:

$$U_{\tau, \text{п}12} = M_{\text{п}12} \frac{di_2}{dt} = \frac{E_{\text{с}2}}{t_{\phi}} \cdot \frac{M_{\text{п}12}}{R_{\text{с}2} + R_{\text{вх}2}}. \quad (8)$$

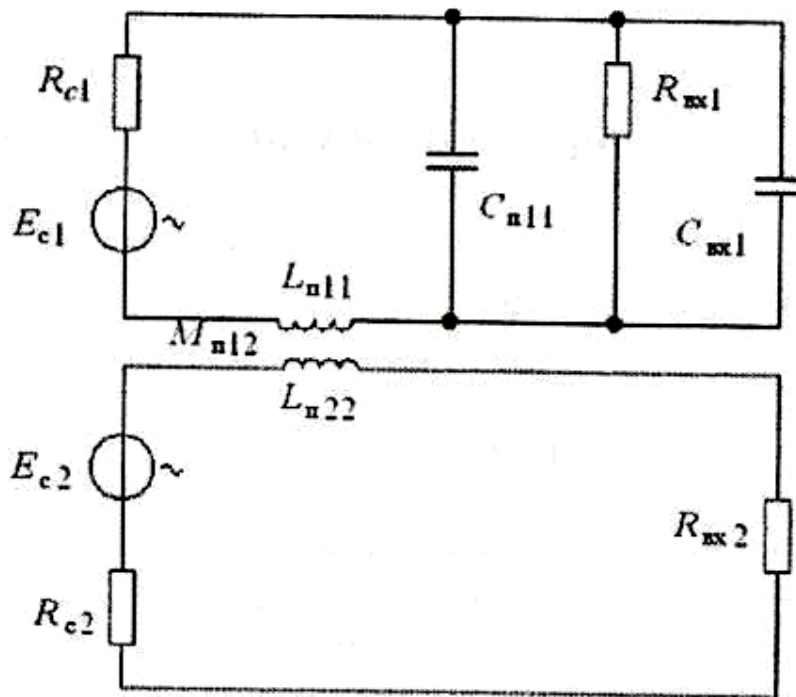


Рис. 3 – Эквивалентная схема последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индукцию

Таким образом, паразитные связи могут проявляться и при отсутствии гальванического соединения источника и приемника наводки.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по второму учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «MathCAD – 14».

2. Исходные данные для моделирования и исследования

3. Задание для работы

1) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

2) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

3) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индуктивность между двумя каналами.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

1. Запустить моделирующую программу «Electronics Workbench – 5.12». Собрать схему по рис. 4 с указанными на схеме параметрами.

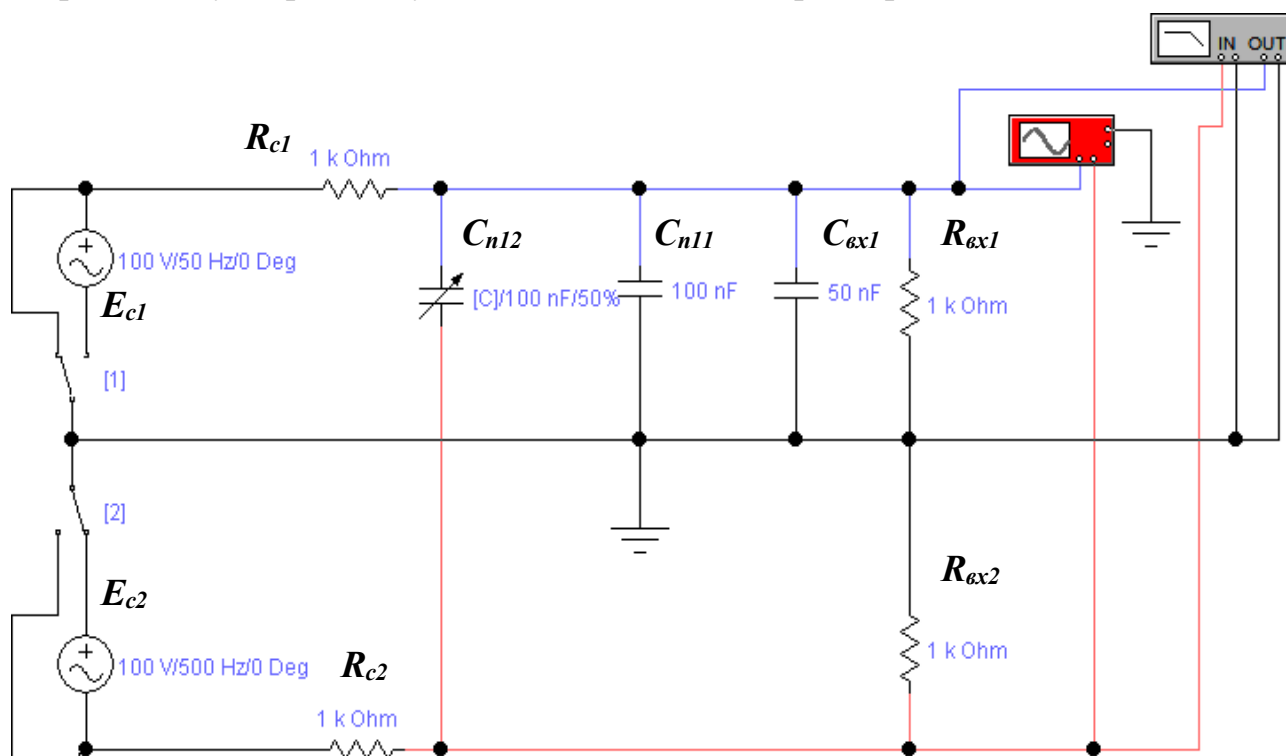


Рис. 4 – Моделируемая эквивалентная схема внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами

4.1.2. Провести расчет наводок в первом канале от влияния второго канала по приведенным выше расчетным соотношениям (2) и (4), определив амплитуду сигнала U_{c2} , амплитуду наводки (помехи) U_{n12} в 1-м канале и амплитудно-частотную характеристику A_{n12} канала емкостной параллельной паразитной связи.

Для этого в программе «Mathcad – 14» составить программу расчета, листинг которой приведен на рис. 5.

```

Ec1 := 100      Ec2 := 100      f1 := 50      f2 := 500

Rc1 := 1000     Rc2 := 1000     Rbx1 := 1000    Rbx2 := 1000

Cbx1 := 50·10-9    Cn11 := 100·10-9    Cn12 := 50·10-9

w1 := 2·π·f1    w2 := 2·π·f2

Uc2 :=  $\frac{Ec2 \cdot Rbx2}{Rc2 + Rbx2}$ 

Ck1 := Cn11 + Cbx1 + Cn12

Rk1 :=  $\frac{Rbx1 \cdot Rc1}{Rbx1 + Rc1}$     Tk1 := Rk1·Ck1    Tn12 := Rk1·Cn12

Un12 :=  $\frac{Uc2 \cdot Tn12 \cdot w2}{\sqrt{1 + Tk1^2 \cdot w2^2}}$ 

i := 0..10000    F(i) := i·100

W(i) := 2·π·F(i)

A(i) :=  $\frac{Tn12 \cdot W(i)}{\sqrt{1 + Tk1^2 \cdot W(i)^2}}$ 

```

Рис. 5 – Листинг программы «Расчет наводок при внешней емкостной параллельной связи»

3. Провести исследование смоделированной схемы замещения. Для этого выполнить следующие операции:

1) При отключенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} осциллографом произвести измерение напряжения наводки U_{n12} в первом канале. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигнала U_{c2} и наводки U_{n12} .

2) Сравнить измеренные значения сигналов с расчетными значениями.

3) При отключенном с помощью переключателя [2] источнике питания E_{c2} второго канала и включенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} первого канала осциллографом произвести измерение напряжения наводки U_{n21} во втором канале от первого. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигнала U_{c1} и наводки U_{n21} .

4) При включенных источниках питания обоих каналов с помощью осциллографа визуально оценить взаимное влияние каналов друг на друга. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигналов U_{c1} и U_{c2} .

5) При отключенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} первого канала и включенном с помощью переключателя [2] источнике питания E_{c2} второго канала измерителем АЧХ (*Bode plotter*) произвести измерение амплитудно-частотной характеристики A_{n12} канала емкостной параллельной паразитной связи. Сравнить измеренную АЧХ канала паразитной связи с рассчитаной. Определить для данной эквивалентной схемы наиболее опасные частоты, при которых наводка во втором канале имеет максимальную

амплитуду. Измеренную и рассчитанную АЧХ отобразить в отчете о лабораторной работе.

б) Исследовать зависимость величины сигнала наводки U_{n12} от величины паразитной емкости C_{n12} . Для этого с помощью нажатия клавиш «Shift» и «C» изменять значения емкости C_{n12} от 0 до 100 nF, измеряя осциллографом величину сигнала наводки U_{n12} . Построить график зависимости U_{n12} от C_{n12} .

4. Сделать выводы о взаимном влиянии каналов связи друг на друга при наличии емкостной параллельной паразитной связи.

Задание 1.2. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами

1. Запустить моделирующую программу «Electronics Workbench – 5.12». Собрать схему по рис. 6 с указанными на схеме параметрами.

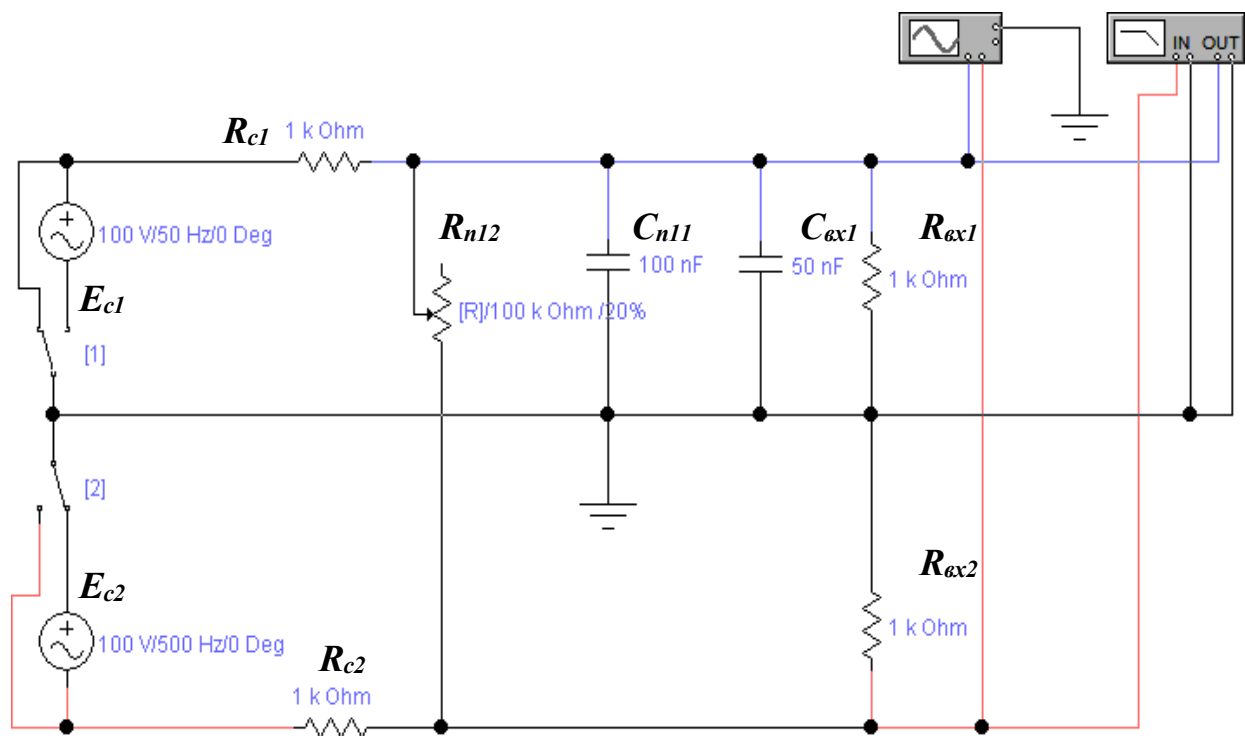


Рис. 6 – Моделируемая эквивалентная схема внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами

2. Провести расчет наводок в первом канале от влияния второго канала по приведенным выше расчетным соотношениям (5) и (6), определив амплитуду сигнала U_{c2} , амплитуду наводки (помехи) U_{n12} в 1-м канале и амплитудно-частотную характеристику A_{n12} канала резистивной параллельной паразитной связи.

Для этого в программе «Mathcad – 14» составить программу расчета, листинг которой приведен на рис. 2.7.

```

Ec1 := 100      Ec2 := 100      f1 := 50      f2 := 500

Rc1 := 1000     Rc2 := 1000     Rbx1 := 1000    Rbx2 := 1000

Cbx1 := 50·10-9    Cn11 := 100·10-9    Rn12 := 20000

w1 := 2·π·f1      w2 := 2·π·f2

Uc2 :=  $\frac{Ec2 \cdot Rbx2}{Rc2 + Rbx2}$     Ck1 := Cn11 + Cbx1    Rk1 :=  $\frac{Rbx1 \cdot Rc1}{Rbx1 + Rc1}$ 

Tk1 := Rk1·Ck1

Un12 :=  $\frac{Uc2 \cdot Rk1}{Rn12 \cdot \sqrt{1 + Tk1^2 \cdot w2^2}}$ 

Un12 :=  $\frac{Uc2 \cdot Rk1}{Rn12 \cdot \sqrt{1 + Tk1^2 \cdot w2^2}}$ 

i := 0..10000      F(i) := i·100

W(i) := 2·π·F(i)      +

A(i) :=  $\frac{Rk1}{Rn12 \cdot \sqrt{1 + Tk1^2 \cdot W(i)^2}}$ 

```

Рис. 7 – Листинг программы «Расчет наводок при внешней резистивной параллельной связи»

3. Провести исследование смоделированной схемы замещения. Для этого выполнить следующие операции:

1) При отключенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} осциллографом произвести измерение напряжения наводки U_{n12} в первом канале. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигнала U_{c2} и наводки U_{n12} .

2) Сравнить измеренные значения сигналов с расчетными значениями.

3) При отключенном с помощью переключателя [2] источнике питания E_{c2} второго канала и включенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} первого канала осциллографом произвести измерение напряжения наводки U_{n21} во втором канале от первого. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигнала U_{c1} и наводки U_{n21} .

4) При включенных источниках питания обоих каналов с помощью осциллографа визуально оценить взаимное влияние каналов друг на друга. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигналов U_{c1} и U_{c2} .

5) При отключенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} первого канала и включенном с помощью переключателя [2] источнике питания E_{c2} второго канала измерителем АЧХ (*Bode plotter*) произвести измерение амплитудно-частотной характеристики A_{n12} канала резистивной параллельной паразитной связи. Сравнить измеренную АЧХ канала паразитной связи с рассчитаной. Определить для данной эквивалентной схемы наиболее опасные частоты, при которых наводка во втором канале имеет максимальную

амплитуду. Измеренную и рассчитанную АЧХ отобразить в отчете о лабораторной работе.

6) Исследовать зависимость величины сигнала наводки U_{n12} от величины паразитного сопротивления R_{n12} . Для этого с помощью нажатия клавиш «Shift» и «C» изменять значения емкости R_{n12} от 0 до 100 КОм, измеряя осциллографом величину сигнала наводки U_{n12} . Построить график зависимости U_{n12} от R_{n12} .

4. Сделать выводы о взаимном влиянии каналов связи друг на друга при наличии резистивной параллельной паразитной связи.

4.3. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индуктивность между двумя каналами.

4.3.1. Запустить моделирующую программу «Electronics Workbench – 5.12». Собрать схему по рис. 8 с указанными на схеме параметрами.

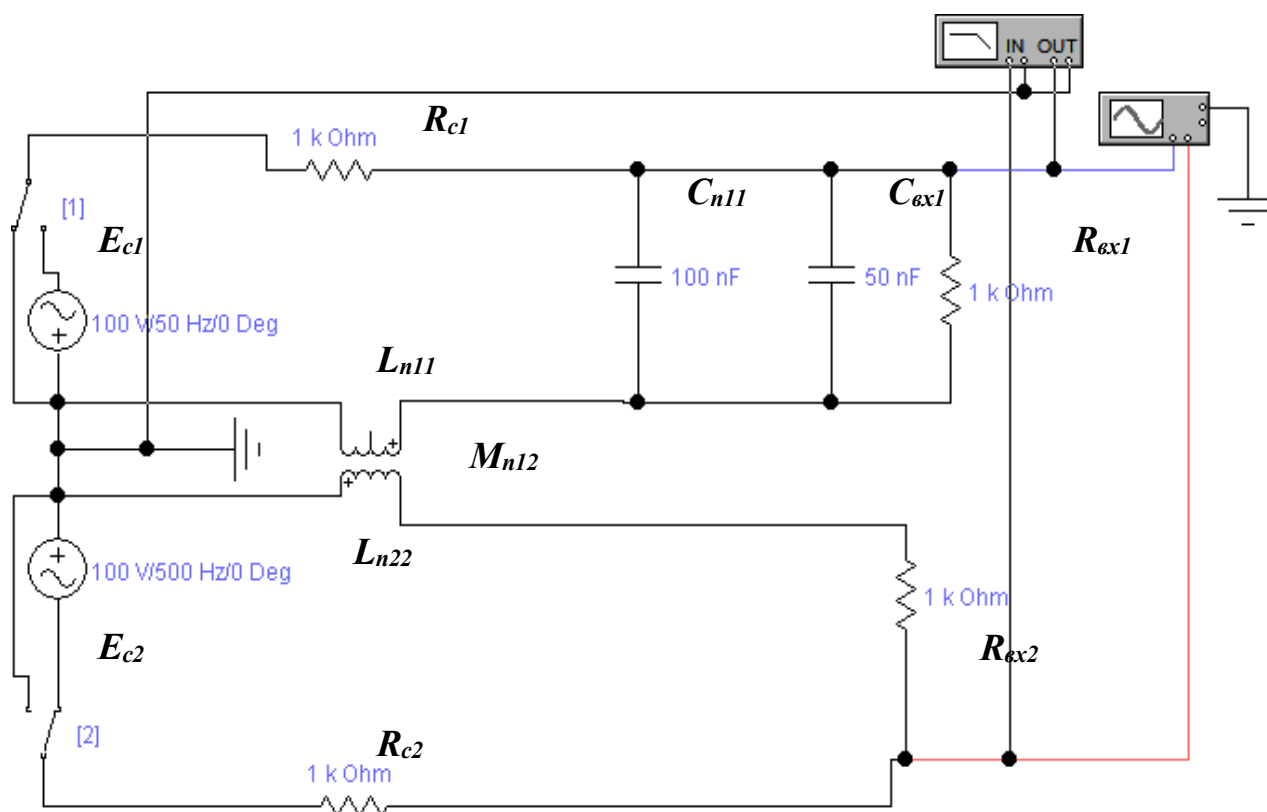


Рис. 8 – Моделируемая эквивалентная схема последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индукцию

Установить необходимые параметры трансформатора. Для этого двойным щелчком «мыши» по трансформатору раскрыть меню «Transformer Properties», в библиотеке «Library misc» выбрать «Model ideal», щелкнуть по кнопке «Edit» и в раскрывшемся меню установить параметры трансформатора:

- коэффициента трансформации (Primary-to-secondary turns ratio $N = 1$);
- индуктивности рассеяния (Leakage inductance $LE = 0.001$, Гн);
- индуктивности первичной обмотки (Magnetizing inductance $LM = 0.001$, Гн);

- сопротивления первичной обмотки (Primary winding resistance RP , Ом - по умолчанию);
- сопротивления вторичной обмотки (Secondary winding resistance RS , Ом - по умолчанию).

2. Провести расчет наводок в первом канале от влияния второго канала по приведенному выше расчетному соотношению (7), определив амплитуду сигнала U_{c2} , амплитуду наводки (помехи) U_{n12} в 1-м канале, при расчете принять $M_{п12} = 0,001$ Гн. Для этого в программе «Mathcad – 14» составить программу расчета, листинг которой приведен на рис. 2.9.

```

Ec1 := 100      Ec2 := 100      f1 := 50      f2 := 500

Rc1 := 1000     Rc2 := 1000     Rbx1 := 1000   Rbx2 := 1000

Cbx1 := 50·10-9      Cп11 := 100·10-9      Mп12 := 0.001

w1 := 2·π·f1          w2 := 2·π·f2

Uc2 :=  $\frac{Ec2 \cdot Rbx2}{Rc2 + Rbx2}$       Ck1 := Cп11 + Cbx1

Rk1 :=  $\frac{Rbx1 \cdot Rc1}{Rbx1 + Rc1}$       Tk1 := Rk1·Ck1

Un12 :=  $\frac{Uc2 \cdot Mп12 \cdot w2}{Rbx2 + Rc2}$ 

```

Рис. 9 – Листинг программы «Расчет наводок при внешней последовательной индуктивной связи».

3. Провести исследование смоделированной схемы замещения. Для этого выполнить следующие операции:

1) При отключенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} осциллографом произвести измерение напряжения наводки U_{n12} в первом канале. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигнала U_{c2} и наводки U_{n12} .

2) Сравнить измеренные значения сигналов с расчетными значениями.

3) При отключенном с помощью переключателя [2] источнике питания E_{c2} второго канала и включенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} первого канала осциллографом произвести измерение напряжения наводки U_{n21} во втором канале от первого. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигнала U_{c1} и наводки U_{n21} .

4) При включенных источниках питания обоих каналов с помощью осциллографа визуально оценить взаимное влияние каналов друг на друга. Отобразить в отчете эпюры напряжений сигналов U_{c1} и U_{c2} .

5) При отключенном с помощью переключателя [1] источнике питания E_{c1} первого канала и включенном с помощью переключателя [2] источнике питания E_{c2} второго канала измерителем АЧХ (*Bode plotter*) произвести измерение амплитудно-частотной характеристик A_{n12} канала последовательной связи через паразитную взаимную индукцию. Определить для данной эквивалентной схемы наиболее опасные частоты, при которых наводка во втором канале имеет

максимальную амплитуду. Измеренную АЧХ отобразить в отчете о лабораторной работе.

б) Исследовать зависимость величины сигнала наводки U_{n12} от величины паразитной взаимной индукции M_{n12} . Для этого последовательно устанавливая в меню значения параметра индуктивности первичной обмотки (Magnetizing inductance LM), равное 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 Гн, измерить осциллографом величину сигнала наводки U_{n12} . Построить график зависимости U_{n12} от M_{n12} .

4. Сделать выводы о взаимном влиянии каналов связи друг на друга при наличии резистивной параллельной паразитной связи.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ТЕМА 13

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Занятие 12 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКА.

ВРЕМЯ – 4 часа.

Учебные вопросы:

1. Исследование переходных процессов в цепях первого порядка.
2. Исследование переходных процессов в цепях второго порядка.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Исследование переходных процессов в цепях первого порядка.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
1. Исследование переходных процессов в цепях второго порядка.		50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Содержание практической работы, выполняемой студентами По первому вопросу

1.1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Варианты заданий для исследований по пунктам 1 и 4.

Вариант №	L1, мГн	R2, Ом	R3, Ом	Вариант №	L1, мГн	R2, Ом	R3, Ом
1	900	5	10	16	815	5	8
2	840	4	9	17	835	14	9
3	870	3	11	18	865	4	10
4	930	2	8	19	925	16	9
5	850	3	12	20	975	17	8
6	880	4	7	21	935	18	7
7	950	5	13	22	915	15	8
8	800	6	6	23	945	10	9
9	825	7	5	24	895	9	10
10	920	8	14	25	885	11	9
11	875	9	4	26	875	8	8
12	890	10	16	27	855	12	7

Вариант №	L1, мГн	R2, Ом	R3, Ом	Вариант №	L1, мГн	R2, Ом	R3, Ом
13	970	9	17	28	845	7	5
14	810	8	18	29	905	13	6
15	910	7	15	30	805	6	11

Таблица 2 – Варианты заданий для исследований по пунктам 2 и 3.

Вариант №	C1, мФ	R2, Ом	R3, Ом	Вариант №	C1, мФ	R2, Ом	R3, Ом
1	2	1000	500	16	0,5	775	925
2	1,9	950	550	17	0,75	725	600
3	1,8	900	600	18	0,85	675	625
4	1,7	850	650	19	0,95	625	650
5	1,6	800	700	20	1,15	575	625
6	1,5	750	750	21	1,25	525	675
7	1,4	975	800	22	1,35	475	500
8	1,3	925	850	23	1,45	450	550
9	1,2	600	900	24	1,55	550	1000
10	1,1	625	950	25	1,05	650	950
11	1,0	650	1000	26	1,65	600	900
12	0,9	625	975	27	1,75	625	850
13	0,8	675	925	28	1,85	700	800
14	0,7	500	875	29	0,45	725	750
15	0,6	550	825	30	1,95	750	975

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

1.1. Исследование RL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

1.2. Исследование RC-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

1.3. Исследование RC-цепи при включении на источник переменного напряжения.

1.4. Исследование RL-цепи при включении на источник переменного напряжения.

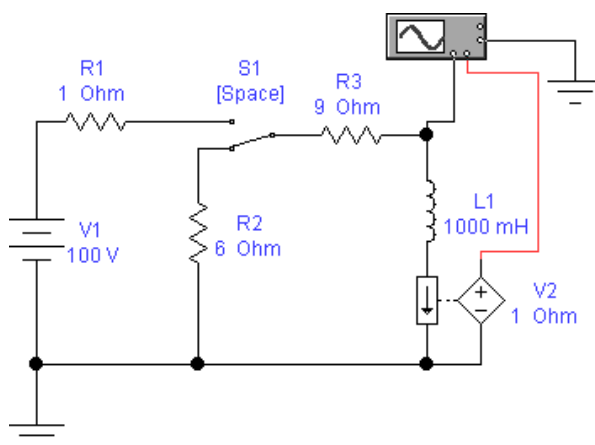
1.4. Порядок выполнения работы

Описание схемы исследований

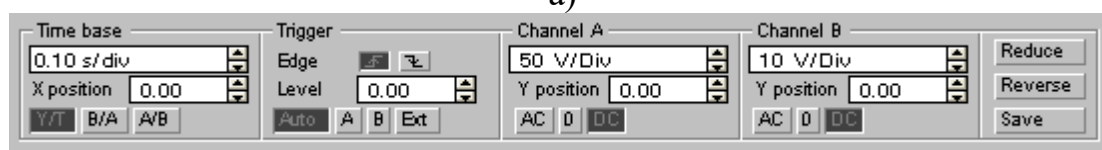
Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, источник напряжения управляемый током, резистор, индуктивную катушку, конденсатор, осциллограф, амперметр и вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов между током и напряжением.

Задание 1.1. Исследование RL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

1.1. Собрать схему, приведенную на рис. 1, установив параметры элементов, как показано на рис. 1, а).



а)



б)

Рис. 1 – Схема моделирования переходных процессов в RL-цепи при включении на источник постоянного напряжения (а) и вид панели управления осциллографа (б)

1.2. Настроить осциллограф, как показано на рис. 1, б).

1.3. Запустить симулятор EWB при отключенном источнике напряжения. Убедиться в работоспособности схемы, получив на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, для этого с помощью переключателя подключить источник напряжения, а затем через 5 секунд отключить, закоротив RL-цепь.

1.4. Установить параметры RL-цепи согласно заданному варианту (см. таблицу 1).

1.5. Запустить симулятор EWB при отключенном источнике напряжения. Получить на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, для этого с помощью переключателя подключить источник напряжения, а затем через 5 секунд отключить, закоротив RL-цепь.

1.6. Занести в отчет по лабораторной работе временную диаграмму переходного процесса при включении и отключении источника постоянного напряжения.

1.7. Измерить следующие параметры RL-цепи: установившийся ток и напряжения до коммутации, установившийся ток и напряжения после коммутации для переходного процесса включения источника напряжения и для переходного процесса короткого замыкания.

Измерения произвести для следующих вариантов первичных параметров цепи:

- $L1, 0,5L1$ и $2L1$ при постоянных $R2, R3$;
- $R2, R3, 0,5R2, 0,5R3$ и $2R2, 2R3$ при постоянном $L1$.

Результаты измерения занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты измерения и расчета

Изменяемые первичные па- раметр цепи	Измеренные результаты				Результаты расчета				
	$I_y(0-),$ А	$I_y(0+),$ А	$U_y(0-),$ В	$U_y(0+),$ В	$I_y(0-),$ А	$I_y(0+),$ А	$U_y(0-),$ В	$U_y(0+),$ В	$\tau,$ с
L1, R2, R3									
0,5L1, R2, R3									
2L1, R2, R3									
L1, 0,5R2, 0,5R3									
L1, 2R2, 2R3									

1.8. Рассчитать следующие параметры RL-цепи: установившийся ток и напряжения до коммутации, установившийся ток и напряжения после коммутации для переходного процесса включения источника напряжения и для переходного процесса короткого замыкания, а также постоянную времени цепи для обоих переходных процессов.

Расчет произвести для следующих вариантов первичных параметров цепи:

- L1, 0,5L1 и 2L1 при постоянных R2, R3;
- R2, R3, 0,5R2, 0,5R3 и 2R2, 2R3 при постоянном L1.

Формулы расчета привести в отчете, результаты расчета занести в таблицу 2.

1.9. Записать математические выражения для исследованных переходных токов и напряжений.

1.10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.2. Исследование RC-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

2.1. Собрать схему, приведенную на рис. 2, установив параметры элементов, как показано на рис. 2, а).

2.2. Настроить осциллограф, как показано на рис. 2, б).

2.3. Запустить симулятор EWB при отключенном источнике напряжения. Убедиться в работоспособности схемы, получив на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, для этого с помощью переключателя подключить источник напряжения, а затем через 5 секунд отключить, закоротив RC-цепь.

2.4. Установить параметры RC-цепи согласно заданному варианту (см. таблицу 2).



Таблица 4 – Результаты измерения и расчета

Изменяемые первичные па- раметр цепи	Измеренные результаты				Результаты расчета				
	$I_y(0-),$ А	$I_y(0+),$ А	$U_y(0-),$ В	$U_y(0+),$, В	$I_y(0-),$ А	$I_y(0+),$ А	$U_y(0-),$ В	$U_y(0+),$, В	$\tau,$ с
C1, R2, R3									
0,5C1, R2, R3									

2C1, R2, R3									
C1, 0,5R2, 0,5R3									
C1, 2R2, 2R3									

2.8. Рассчитать следующие параметры RC-цепи: установившийся ток и напряжения до коммутации, установившийся ток и напряжения после коммутации для переходного процесса включения источника напряжения и для переходного процесса короткого замыкания, а также постоянную времени цепи для обоих переходных процессов.

Расчет произвести для следующих вариантов первичных параметров цепи:

- C1, 0,5C1 и 2C1 при постоянных R2, R3;
- R2, R3, 0,5R2, 0,5R3 и 2R2, 2R3 при постоянном C1.

Формулы с расчетами занести в отчет, результаты расчета занести в таблицу 4.

2.9. Записать математические выражения для исследованных переходных токов и напряжений.

2.10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.3. Исследование RC-цепи при включении на источник переменного напряжения.

3.1. Собрать схему, приведенную на рис. 3, установив параметры элементов, как показано на рис. 3, а).

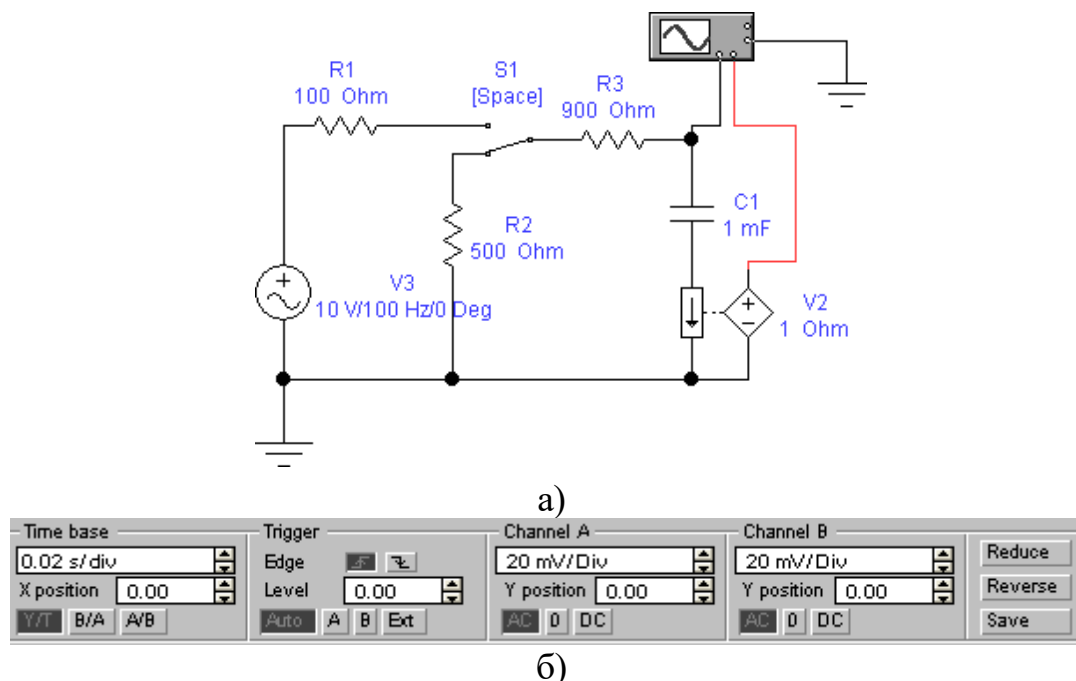


Рис. 3 – Схема моделирования переходных процессов в RC-цепи при включении на источник переменного напряжения (а) и вид панели управления осциллографа (б)

3.2. Настроить осциллограф, как показано на рис. 3, б).

3.3. Запустить симулятор EWB при отключенном источнике напряжения. Убедиться в работоспособности схемы, получив на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, для этого с помощью переключателя подключить источник напряжения, а затем через 1 секунду отключить, закоротив RC-цепь, и остановить симулятор EWB.

3.4. Установить параметры RC-цепи согласно заданному варианту (см. таблицу 2).

3.5. Запустить симулятор EWB при отключенном источнике напряжения. Получить на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, для этого с помощью переключателя подключить источник напряжения, а затем через 1 секунду отключить, закоротив RC-цепь, и остановить симулятор EWB.

3.6. Занести в отчет по лабораторной работе временную диаграмму переходного процесса при включении и отключении источника переменного напряжения.

3.7. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.4. Исследование RL-цепи при включении на источник переменного напряжения.

4.1. Собрать схему, приведенную на рис. 4, установив параметры элементов, как показано на рис. 4, а).

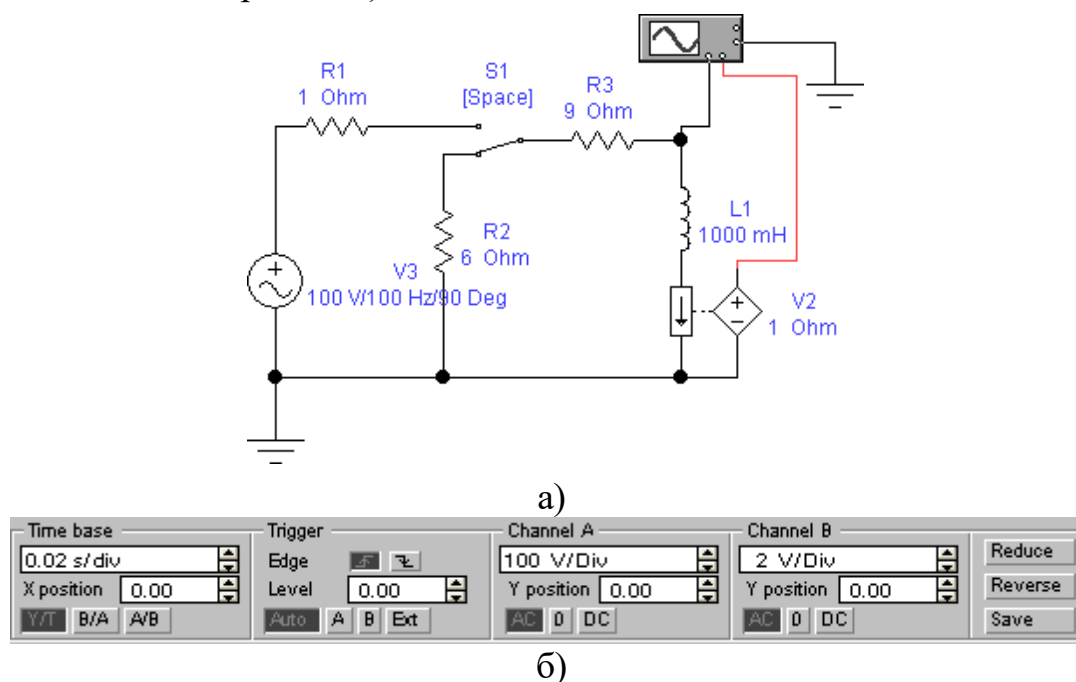


Рис. 4 – Схема моделирования переходных процессов в RL-цепи при включении на источник переменного напряжения (а) и вид панели управления осциллографа (б)

4.2. Настроить осциллограф, как показано на рис. 4, б).

4.3. Запустить симулятор EWB при включенном источнике напряжения. Убедиться в работоспособности схемы, получив на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, а затем через 1 секунд отключить, закоротив RL-цепь, и отключить симулятор EWB.

4.4. Установить параметры RL-цепи согласно заданному варианту (см. таблицу 1).

4.5. Запустить симулятор EWB при включенном источнике напряжения. Получить на экране осциллографа временную диаграмму переходного процесса, а затем через 1 секунду отключить, закоротив RL-цепь, и отключить симулятор EWB.

4.6. Занести в отчет по лабораторной работе временную диаграмму переходного процесса при включении и отключении источника переменного напряжения.

4.7. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Содержание практической работы, выполняемой студентами По первому вопросу

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 5 – Варианты заданий

Вариант №	L1, мГн	R2, Ом	C1, мФ	Вариант №	L1, мГн	R2, Ом	C1, мФ
1	10	2	10	16	36	12	1
2	40	4	10	17	49	14	1
3	90	6	10	18	25	10	1
4	160	8	10	19	16	8	1
5	250	10	10	20	9	6	1
6	1	2	1	21	4	4	1
7	4	4	1	22	10	2	10
8	9	6	1	23	40	4	10
9	16	8	1	24	90	6	10
10	25	10	1	25	160	8	10
11	100	2	100	26	250	10	10
12	100	20	1	27	25	10	1
13	100	10	4	28	100	2	100
14	81	18	1	29	100	20	1
15	64	16	1	30	100	10	4

1.3. Задание для работы:

2.1. Исследование апериодического процесса в RCL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

2.2. Исследование колебательного процесса в RCL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 2.1. Исследование апериодического процесса в RCL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

1.1. Собрать схему, приведенную на рис. 5, установив параметры элементов, как показано на рис. 5, а).

1.2. Настроить осциллограф, как показано на рис. 5, б).

1.3. Запустить симулятор EWB при включенном источнике напряжения. Убедиться в работоспособности схемы, получив на экране осциллографа временную диаграмму апериодического разряда, для этого с помощью переключателя отключить от источника напряжения конденсатор, автоматически подключив его к RL-цепи, а затем через 1 – 2 секунды отключить симулятор EWB.

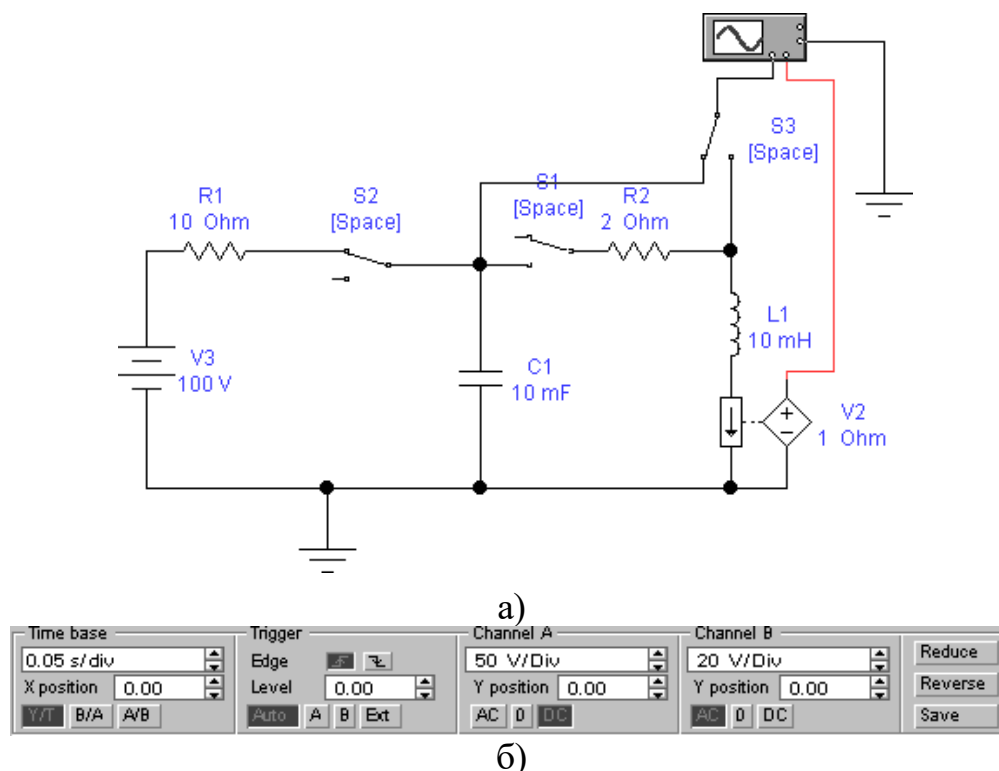


Рис. 5 – Схема моделирования переходных процессов в RL-цепи при включении на источник постоянного напряжения (а) и вид панели управления осциллографа (б)

1.4. Установить параметры RLC-цепи согласно заданному варианту (см. таблицу 5).

Между заданными значениями параметров цепи наблюдается соотношение:

$$R = R_{кр} = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Это означает, что переходный процесс получается апериодическим, но граничным с колебательным процессом.

1.5. Запустить симулятор EWB при включенном источнике напряжения. Получить на экране осциллографа временную диаграмму апериодического процесса, для этого с помощью переключателя отключить от источника напряжения

конденсатор, автоматически подключив его к RL-цепи, а затем через 1 – 2 секунды отключить симулятор EWB.

1.6. Занести в отчет по лабораторной работе временную диаграмму апериодического переходного процесса при разряде заряженного конденсатора на RL-цепь.

1.7. Измерить длительность предельного апериодического разряда.

1.8. Изменить величину активного сопротивления, установив значение резистора R2 в 2 или 3 раза больше.

1.9. Повторить подпункты 1.5 – 1.6. Затем измерить длительность апериодического разряда.

1.10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 2.2. Исследование колебательного процесса в RCL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

2.1. В схеме RLC-цепи, приведенной на рис. 5, изменить величину активного сопротивления R2, установив его в 2 раза меньше заданного.

2.2. Запустить симулятор EWB при включенном источнике напряжения. Убедиться в работоспособности схемы, получив на экране осциллографа временную диаграмму затухающего колебательного процесса, для этого с помощью переключателя отключить от источника напряжения конденсатор, автоматически подключив его к RL-цепи, а затем через 1 – 2 секунды отключить симулятор EWB.

2.3. Занести в отчет по лабораторной работе временную диаграмму затухающего колебательного процесса при разряде заряженного конденсатора на RL-цепь.

2.4. Измерить T_0 – период собственных колебаний и определить линейную частоту f колебаний.

2.5. Вычислить линейную частоту частота собственных колебаний контура по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Сравнить вычисленную частоту с измеренной частотой.

2.6. Определить коэффициент затухания свободной составляющей переходного процесса по формуле: $\alpha = R/(2L)$.

2.7. Устанавливая значения резистора R2 в 5 и 20 раз меньше заданных, выполнить пункты 2.2 – 2.6.

2.8. Определить значение резистора R2, при котором колебательный процесс не будет затухать.

2.9. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

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

В отчете привести:

– исходные данные,

- выполняемые задания,
- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схмотехнические модели устройств;
- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ТЕМА 14 **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЦЕПЯХ**

Занятие 13 **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.**

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1

Вводная часть	90 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе	10 мин
Вступительная часть	8 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:	2 мин
1. Моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.	75 мин
Заключительная часть	75 мин
Подведение итогов	5 мин
Задание студентам для самостоятельной работы	3 мин
	2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Цепи с распределенными параметрами отличаются от рассмотренных в предыдущих разделах цепей с сосредоточенными параметрами тем, что в них индуктивность, емкость, сопротивление и проводимость распределены в пространстве — чаще вдоль двух проводников, образующих линию связи для обмена информацией между различными объектами. Если названные параметры распределены вдоль линии (на единицу длины) равномерно (например, для двухпроводной линии в виде параллельных проводников), то такая линия называется однородной, в противном случае линия является неоднородной. Примером длинных линий могут служить известные всем телефонные (телеграфные) линии связи.

Длинные линии (цепи с распределенными параметрами) в EWB моделируются в виде схемы замещения, представленной на рис. 16.

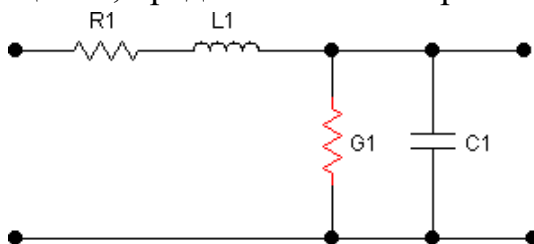


Рис. 16 – Схема замещения сегмента длинной линии

На рисунке приведена электрическая схема замещения сегмента линии с потерями, соответствующего линии, имеющей длину в 1 метр. Схема содержит:

- **$R1$** активное (омическое) сопротивление проводников длинной линии, отнесенное к единице длины (погонное сопротивление), Ом/м;
- **$L1$** погонная индуктивность проводников линии, Гн/м;

– GI погонная проводимость между проводниками линии, См/м; для реальных линий к этой проводимости добавляются проводимости, вызванные диэлектрическими потерями изоляционных материалов;

– CI погонная емкость между проводниками, Ф/м.

Процессы, происходящие в длинных линиях, описываются так называемыми телеграфными уравнениями:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (1)$$

Решение уравнений (30) дает следующий набор характеристик (вторичных параметров) однородной длинной линии:

1) Волновое (характеристическое) сопротивление

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (2)$$

2) Коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} = \alpha + j\beta. \quad (3)$$

3) Коэффициент затухания

$$\alpha = \sqrt{0.5 \cdot \left(\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC) \right)}. \quad (4)$$

4) Коэффициент фазы

$$\beta = \sqrt{0.5 \cdot \left(\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (RG - \omega^2 LC) \right)}. \quad (5)$$

Если в длинной линии выполняется условие, при котором не происходит искажения сигналов, т.е. $R/L = G/C$, то получим

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6)$$

Это выражение означает, что волновое сопротивление, как и в случае идеальной линии без потерь, не будет зависеть от частоты. При выполнении этих условий, а также подставляя выражение (35) в (33) и (34) получаем

$$\alpha = \sqrt{RG}, \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}. \quad (8)$$

При тех же условиях скорость распространения электромагнитного поля длиной λ и периодом T вдоль линии равна

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{2\pi \cdot f \cdot \lambda}{2\pi} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (9)$$

а время задержки сигнала при прохождении длинной линии длиной l

$$\Delta\tau = l/v. \quad (10)$$

Для воздушных линий связи скорость распространения принимается равной скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; при наличии диэлектрика скорость распространения может уменьшиться на 10...15% и более (определяется коэффициентом укорочения волны, приблизительно равном корню квадратному из диэлектрической проницаемости диэлектрика). Если принять, что длина длинной линии измеряется в метрах и скорость распространения равна $3 \cdot 10^8$ м/с, то на основании выражения (38) получаем условие:

$$LC = \frac{1}{c^2} \approx 11,11 \cdot 10^{-18}. \quad (11)$$

Заметим, что только при соблюдении условия (40) будет однозначная связь между длиной линии в метрах, погонной емкостью в Ф/м, погонной индуктивностью в Гн/м и как следствие – возможность сопоставления результатов моделирования с результатами расчетов.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по второму учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:
 - ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «MathCAD – 14».
2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Варианты заданий для исследований

Вариант №	$l, м$	$R, Ом$	$C, мкФ$	$L, мкГ$
0	50	0,1	0,1	50
1	45	0,1	0,2	55
2	40	0,15	0,3	60
3	35	0,2	0,4	65
4	30	0,25	0,5	70
5	25	0,3	1	75
6	27	0,35	0,9	80
7	32	0,4	0,8	85
8	37	0,35	0,7	90
9	42	0,3	0,6	50
10	47	0,25	1	45
11	46	0,2	0,9	40
12	41	0,15	0,8	35
13	36	0,1	0,7	30
14	31	0,1	0,6	25
15	26	0,15	0,5	20
16	28	0,2	0,4	15
17	33	0,25	0,3	10
18	38	0,3	0,2	50

<i>Вариант №</i>	<i>l, м</i>	<i>R, Ом</i>	<i>C, мкФ</i>	<i>L, мкГ</i>
19	43	0,35	0,1	40
20	48	0,4	0,2	30
21	49	0,35	0,3	25
22	44	0,3	0,4	20
23	39	0,25	0,5	25
24	34	0,2	1	30
25	29	0,15	0,5	40

3. Задание для работы

Базового уровня:

- 1) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.
- 2) Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.

Повышенного уровня:

- 3) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.

1. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую сегмент витой пары 5-й категории длиной 10 м, на элементах с сосредоточенными параметрами. Исходные данные для моделирования:

- погонное резистивное сопротивление проводников – 0,188 Ом/м;
- погонная индуктивность проводников – 525 нГн/м;
- погонная проводимость между проводниками – 0,2 мкСм/м;
- погонная емкость между проводниками – 52 пФ/м.

2. К входу витой пары через переключатель подключить синусоидальный генератор и генератор прямоугольных импульсов, выход витой пары нагрузить на активное сопротивление, величиной 100 Ом.

3. С помощью графопостроителя получить АЧХ распределенной цепи. Отобразить полученную АЧХ в отчете. Измерить резонансную частоту сегмента витой пары.

4. Подать на вход витой пары гармоническое воздействие с частотой 1 МГц. С помощью осциллографа отобразить временные диаграммы входного и выходного сигналов. Полученные осциллограммы занести в отчет.

5. Повторить предыдущий пункт, подавая на вход гармоническое воздействие на резонансной частоте и на частоте, равной 100 МГц.

6. Подать на вход витой пары импульсное воздействие с частотой 100 КГц. С помощью осциллографа отобразить временные диаграммы входного и выходного сигналов. Полученные осциллограммы занести в отчет.

7. С помощью Фурье-анализатора получить спектры входной и выходной импульсной последовательности, которые занести отчет. Сравнить полученные спектры, сделать выводы о том, какие процессы приводят к искажению формы импульсов.

8. Повторить предыдущий пункт, последовательно подавая на вход витой пары импульсное воздействие на частотах 1 и 10 МГц.

9. Сделать выводы по результатам проделанной работы, в том числе о пропускной способности витой пары.

Задание 1.2. Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.

1. В системе компьютерной математики «MathCAD» записать формулы, описывающие расчет параметров однородной длинной линии. Для этого воспользоваться выражениями (2) – (10).

2. С помощью созданной математической модели рассчитать следующие параметры витой пары:

- волновое (характеристическое) сопротивление;
- коэффициент распространения;
- коэффициент затухания;
- коэффициент фазы;
- временную задержку.

3. Построить графики зависимостей коэффициента затухания и коэффициента фазы от длины линии (1 – 100000 м).

4. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Задание 1.3. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.

1. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую однородную длинную линию, собранную на линии связи с потерями (элемент W10) и приведенную на рис. 17. Установить значения первичных параметров линии связи в соответствии с заданным вариантом.

2. Создать в линии связи режим бегущей волны. Для этого рассчитать характеристическое (волновое) сопротивление линии связи и установить нагрузочное сопротивление R_1 , равное волновому сопротивлению.

3. Для исследования линии связи в режиме бегущей волны переключатель S2 перевести в нижнее положение, а S4 – в левое положение. Подать на вход линии связи гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение.

4. Включить симулятор, как только на экране осциллографа появится выходное напряжение отключить его. Отобразить в отчете временные диаграммы входного и выходного напряжения.

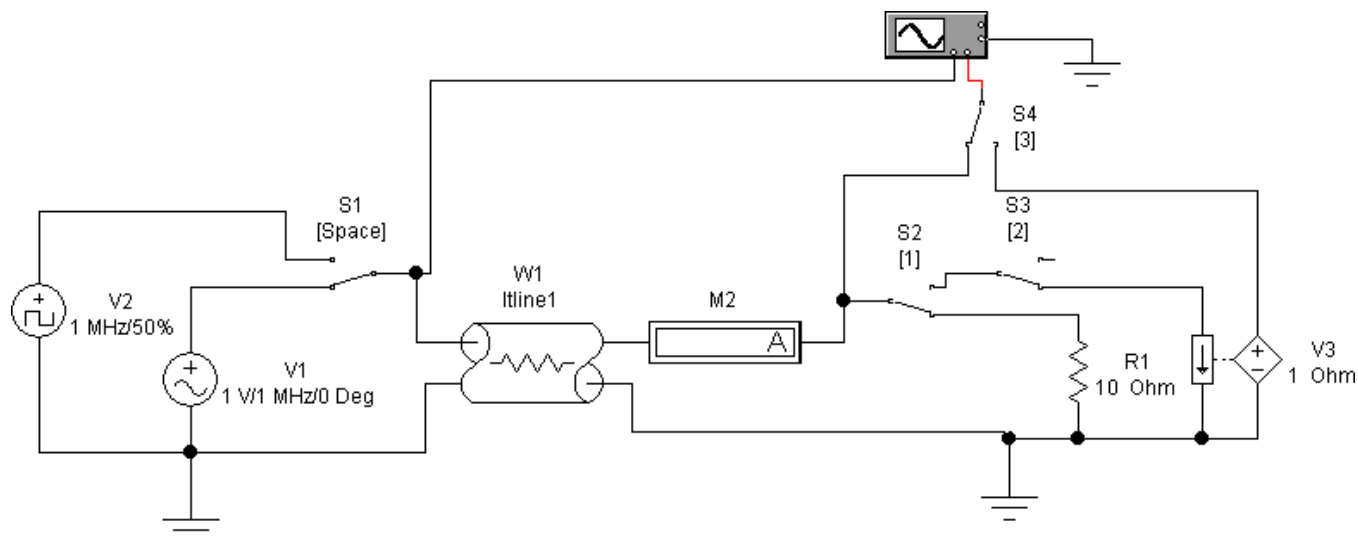


Рис. 17 – Схема исследования линии связи с потерями

5. Измерить с помощью осциллографа и занести в отчет амплитуды входного и выходного напряжений, по величинам которых рассчитать:

- величину выходного тока $I_{вых}$;
- коэффициент затухания $\alpha = U_{вых} / U_{вх}$;

6. Измерить с помощью осциллографа временную задержку между одинаковыми фазами входного и выходного напряжений. Рассчитать коэффициент фазы в линии связи в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\beta = 2\pi \cdot (T2 - T1) \cdot f \text{ и } \beta = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f.$$

7. Для исследования линии связи в режиме стоячей волны при холостом ходе на конце линии переключатели S2 и S3 перевести в верхнее положение. Включить симулятор, как только на экране осциллографа появится выходное напряжение отключить его. Отобразить в отчете временные диаграммы входного и выходного напряжения. Измерить с помощью осциллографа амплитуду выходного напряжения. Сравнить ее с амплитудой выходного напряжения в режиме бегущей волны. Определить коэффициенты отражения, бегущей и стоячей волны.

8. Для исследования линии связи в режиме стоячей волны при коротком замыкании на конце линии переключатель S2 перевести в верхнее положение, переключатель S3 – в нижнее положение, а S4 – в правое положение. Включить симулятор, как только на экране осциллографа появится выходной ток отключить его. Отобразить в отчете временные диаграммы входного напряжения и выходного тока. Измерить с помощью осциллографа амплитуду выходного тока. Сравнить ее с амплитудой выходного тока в режиме бегущей волны. Определить коэффициенты отражения, бегущей и стоячей волны.

9. Повторить выполнение пунктов 3 – 8 для импульсного входного воздействия, для этого переключатель S1 перевести в верхнее положение.

Сравнить форму импульсов на выходе линии связи в данной модели с формой импульсов на выходе линии, смоделированной на элементах с сосредоточенными параметрами, сделать выводы.

10. Сделать выводы по результатам проделанной работы, охарактеризовав протекающие в линии связи физические процессы.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- исследуемые принципиальные электрические схемы,
- математические модели (формулы) и результаты расчетов,
- результаты исследований – измеренные параметры, занесенные в таблицы, осциллограммы, АЧХ и спектры;
- выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

ТЕМА 15 ОСНОВЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Занятие 14 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

1. Исследование принципов и процесса генерации высокочастотных сигналов.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

– применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.

– проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике

– моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

– навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности

– способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.

– навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

–ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 15»;

–электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1

Вводная часть	90 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе	10 мин
Вступительная часть	8 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:	2 мин
1. Исследование принципов и процесса генерации высоко-частотных сигналов.	75 мин
Заключительная часть	75 мин
Подведение итогов	5 мин
Задание студентам для самостоятельной работы	3 мин
	2 мин

ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ И ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Математическую модель усилителя независимо от числа каскадов усиления можно представить в виде комплексной передаточной функции $K_{yc}(\omega)e^{j\varphi_{yc}(\omega)}$, где $K_{yc}(\omega)$ и $\varphi_{yc}(\omega)$ - зависящие от частоты $\omega = 2\pi f$ коэффициент усиления и фаза выходного сигнала по отношению к входному.

В усилителе фаза выходного сигнала для нечетного числа каскадов усиления изменяется на 180° , а при четном числе каскадов совпадает с фазой входного сигнала.

Поскольку между элементами усилителя всегда существуют емкостные, индуктивные и гальванические паразитные связи, то на входе усилителя наряду с усиливаемым внешним сигналом присутствуют сигналы, проникшие во входные цепи через паразитную обратную связь, в том числе с выхода усилителя. Паразитную обратную связь можно также представить математической моделью $K_{oc}(\omega)e^{j\varphi_{oc}(\omega)}$.

Обобщенная математическая модель усилителя с обратной связью представлена на рис. 4.

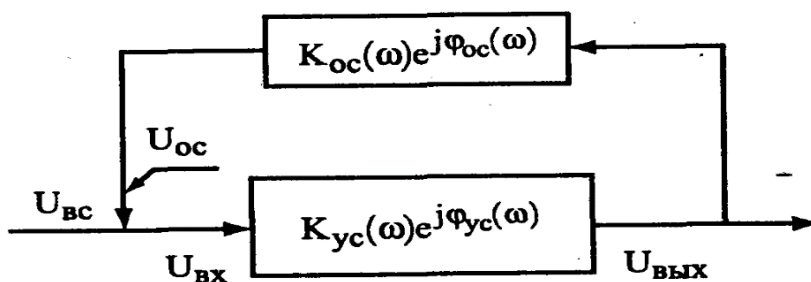


Рис. 1 – Модель усилителя с обратной связью

Связь между выходом и входом усилителя описывается уравнением:

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вс}} + U_{\text{ос}}) K_{\text{ус}}(\omega) e^{j\varphi_{\text{ус}}(\omega)} = [U_{\text{вс}} + U_{\text{вых}} K_{\text{ос}}(\omega) e^{j\varphi_{\text{ос}}(\omega)}] K_{\text{ус}}(\omega) e^{j\varphi_{\text{ус}}(\omega)}. \quad (1)$$

Режим усиления переходит в режим генерации, когда выходной сигнал достигает максимального значения и поддерживается на этом уровне независимо от $U_{\text{вх}}$. Это условие выполняется при нулевом значении знаменателя указанного выше выражения. Следовательно, **для возникновения режима генерации необходимо выполнить два условия**:

- 1) $K_{\text{ос}}(\omega) = 1/K_{\text{ус}}(\omega)$;
- 2) $\varphi_{\text{ос}}(\omega) = -\varphi_{\text{ус}}(\omega)$.

Первое условие определяет минимально необходимую для возникновения паразитной генерации величину коэффициента паразитной обратной связи. Чем выше коэффициент усиления усилителя, тем меньший коэффициент паразитной обратной связи создает предпосылки для возникновения генерации. Например, если $K_{\text{ос}} = 10$, то для возникновения генерации необходимо проникновение 0,1 части выходного сигнала на вход усилителя. Для усилителя с $K_{\text{ус}} = 100$ достаточно поступления на его вход 0,01 части выходного сигнала. Эта зависимость объясняет возможность паразитной генерации в логических элементах дискретной техники. Высокий коэффициент усиления логического элемента и высокая частота спектральных составляющих фронта дискретного сигнала создают благоприятные условия для возникновения паразитной генерации в логических элементах.

Второе условие предусматривает, что изменение фазы сигнала обратной связи должно быть противоположно величине фазового сдвига усилителя. Это означает, что фазы внешнего сигнала и сигнала обратной связи должны быть приблизительно равными. **Обратная связь**, при которой фаза сигнала на входе усилителя совпадает с фазой сигнала обратной связи, **называется** положительной, а когда фазы этих сигналов противоположные – отрицательной. Если положительная обратная связь способствует паразитной генерации, то отрицательная, наоборот, повышает стабильность работы усилителя, но за счет некоторого снижения напряжения на выходе усилителя. Поэтому в усилителях с высоким коэффициентом усиления для исключения паразитной генерации создают между каскадами отрицательную обратную связь, а также применяют комплекс мер по уменьшению паразитных связей. С этой целью при монтаже пользуются короткими экранированными провода, элементы входных и выходных цепей разносят на максимально возможное расстояние, экранируют трансформаторы усилителей, в цепи питания предварительных каскадов устанавливают RC-фильтры низких частот, усилительные каскады размещают в одну линию и др.

Содержание практической работы, выполняемой студентами по учебному вопросу

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

2. Исходные данные для моделирования и исследования

3. Задание для работы

Базового уровня:

1) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.

2) Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.

Повышенного уровня:

3) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Исследовать эффект генерации на транзисторном усилителе.

1) ***Запустить программу EWB и собрать схему***, приведенную на рис. 2.

2) ***Установить параметры элементов схемы*** в соответствии с величинами, указанными на рис. 2. Схема исследования, содержит:

- источник гармонического напряжения (сигнала) на элементе V3;
- источник электропитания в виде аккумуляторной батареи V4;
- транзисторный усилитель, собранный на биполярном транзисторе Q1, резисторах R1 – R4 и конденсаторах C5, C9;
- колебательного контура, состоящего из катушки индуктивности L1, и конденсаторов C6, C7;
- цепь обратной положительной связи, образуемая за счет паразитной емкости C8.

Усилитель и колебательный контур имеет гальваническую связь через общий (заземляющий) провод. Колебательный контур и паразитный конденсатор подключаются к усилителю с помощью переключателей S1 и S2, управляемых клавишей «Пробел».

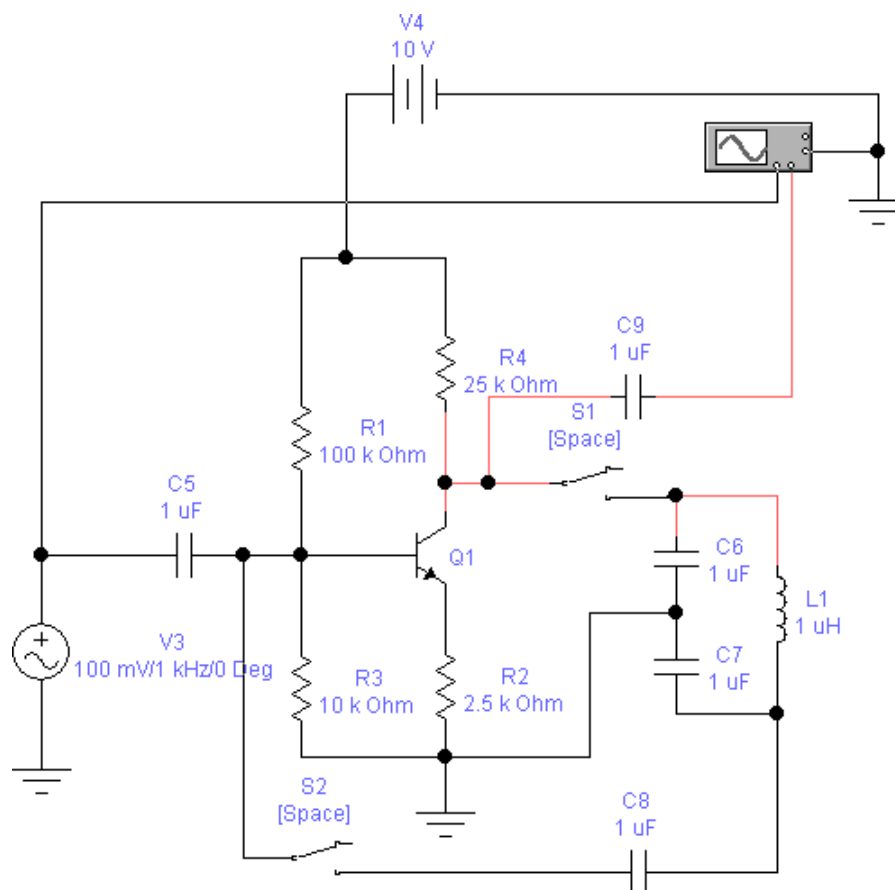


Рис. 25 – Схема исследования эффекта паразитной генерации на транзисторном усилителе

3) **Включить эмулятор EWB**, убедиться в работоспособности схемы. Для этого двойным щелчком **открыть осциллограф**, и его **настроить** на регистрацию отображения аналогового входного и выходного усиленного сигналов.

4) **Измерить** с помощью осциллографа **частоту** входного и усиленного выходного сигналов.

5) **Определить коэффициент усиления** транзисторного усилителя, предварительно измерив амплитуды напряжения входного и выходного сигналов.

6) **Отобразить в отчете осциллограммы** входного и усиленного выходного сигналов.

7) **Сделать выводы** о работе усилителя.

8) Нажав клавишу «Пробел» с помощью переключателей S1 и S2, **сымитировать** образование паразитных емкостей, которые подключают колебательный контур к коллекторной цепи и к цепи базы усилителя, образуя **паразитную цепь положительной обратной связи**.

9) **Произвести** с помощью осциллографа **наблюдение эффекта паразитной генерации**.

10) **Отобразить в отчете осциллограммы** входного и выходного сигналов усилителя.

11) **Измерить** с помощью осциллографа **частоту выходного сигнала**.

12) **Сделать выводы** по результатам проделанной работы.

Задание 2.2. Исследовать эффект генерации на операционном усилителе.

1) Запустить программу *EWB* и собрать схему, приведенную на рис. 3.

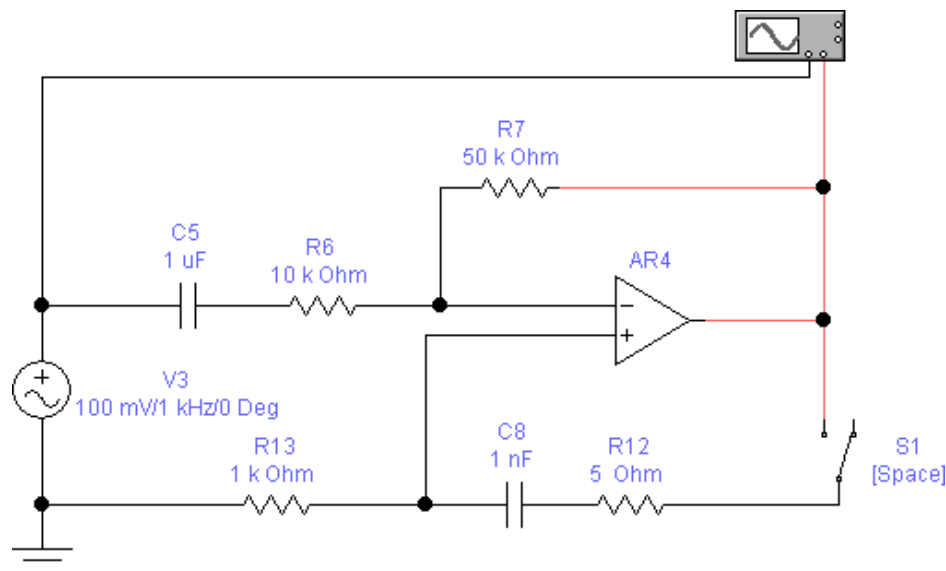


Рис. 3 – Схема исследования эффекта паразитной генерации на операционном усилителе

2) **Установить параметры элементов схемы** в соответствии с величинами, указанными на рис. 3. Схема исследования, содержит:

- источник гармонического напряжения (сигнала) на элементе V3;
- усилитель, собранный на операционном усилителе AR4, резисторах R6, R7, R13 и конденсаторе C5;
- цепь обратной положительной связи, образуемой за счет сопротивления R12 и емкости C8.

Цепь обратной положительной связи подключается к усилителю с помощью переключателя S1, управляемого клавишей «Пробел».

3) **Включить эмулятор EWB**, убедиться в работоспособности схемы. Для этого двойным щелчком **открыть осциллограф**, и его **настроить** на регистрацию отображения аналогового входного и выходного усиленного сигналов.

4) **Измерить** с помощью осциллографа **частоту** входного и усиленного выходного сигналов.

5) **Определить коэффициент усиления** операционного усилителя, предварительно измерив амплитуды напряжения входного и выходного сигналов.

6) **Отобразить в отчете осциллограммы** входного и усиленного выходного сигналов.

7) **Сделать выводы** о работе усилителя.

8) Нажав клавишу «Пробел» с помощью переключателя S1, **сымитировать** образование паразитной емкости, которая образует **паразитную цепь положительной обратной связи**.

9) **Произвести** с помощью осциллографа **наблюдение эффекта паразитной генерации**.

10) **Отобразить в отчете осциллограммы** входного и выходного сигналов усилителя.

11) **Измерить** с помощью осциллографа **частоту выходного сигнала**.

12) **Изменить параметры элементов** цепи R12, R13 и C8 в соответствии с указанным преподавателем вариантом и **повторить выполнение пунктов 8 – 11 задания**.

Таблица 2 – Исходные данные для задания 2.2.

№ варианта	R1,2, Ом	C8, нФ	R13, Ом
1.	5	5	900
2.	5	120	10
3.	5	4	900
4.	5	115	10
5.	3	3	900
6.	3	110	10
7.	3	2	900
8.	3	95	10
9.	2	0,5	900
10.	2	90	10
11.	2	0,2	900
12.	2	80	10

13) **Сделать выводы** по результатам проделанной работы.

Задание 1.3. Исследовать эффект генерации на логических элементах.

1) **Запустить программу EWB и собрать схему**, приведенную на рис. 4.

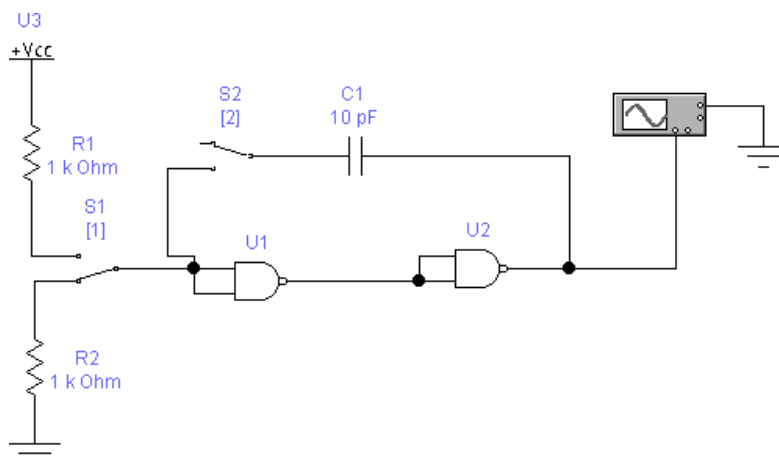


Рис. 4 – Схема исследования эффекта паразитной генерации на логических элементах

2) **Установить параметры элементов схемы** в соответствии с величинами, указанными на рис. 4. Схема исследования, содержит:

- источник постоянного напряжения U3 величиной – 5 В;
- логические элементы 2 И-НЕ U1 и U2, соединенные последовательно в виде инверторов;
- сопротивления R1 и R2 для подачи на вход логического элемента U1

потенциала логической единицы и потенциала логического нуля соответственно, которые подключаются с помощью переключателя S1, управляемого клавишей «1»;

– паразитную емкость C1, подключаемую в цепь обратной положительной связи с помощью переключателя S2, управляемого клавишей «2».

3) **Включить эмулятор EWB**, убедиться в работоспособности схемы. Для этого двойным щелчком **открыть осциллограф**, и его **настроить** на регистрацию отображения дискретных сигналов.

4) **Произвести** с помощью осциллографа **наблюдение цифровых сигналов**, переключая переключатель S1 с помощью клавиши «1».

5) **Отобразить в отчете осциллограммы** цифровых сигналов.

6) **Сделать выводы** о работе логических элементов.

7) Нажав клавишу «2» с помощью переключателя S2, **сымитировать** образование паразитной емкости, которая образует **паразитную цепь положительной обратной связи**.

8) **Произвести** с помощью осциллографа **наблюдение эффекта паразитной генерации**.

9) **Отобразить в отчете осциллограмму** выходного цифрового сигнала.

10) **Измерить** с помощью осциллографа **частоту выходного сигнала**.

11) **Изменяя параметры паразитной емкости** C1, устанавливая ее последовательно 1 пФ, 10 пФ, 100 пФ и 1000 пФ, измерить частоту паразитной генерации. Определить, как зависит частота паразитной генерации от величины паразитной емкости.

12) **Сделать выводы** по результатам проделанной работы.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- исследуемые принципиальные электрические схемы,
- математические модели (формулы) и результаты расчетов,
- результаты исследований – измеренные параметры, занесенные в таблицы, осциллограммы, АЧХ и спектры;
- выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.
- 2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.
- 3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.
- 4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

ТЕМА 16 ПРОЦЕССЫ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ. ЧАСТОТНАЯ СЕЛЕКЦИЯ

Занятие 15 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ

ВРЕМЯ – 2 часа.

Учебные вопросы:

- 1) Моделирование и исследование модуляции сигналов.
- 2) Моделирование и исследование демодуляции сигналов.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1

Вводная часть	90 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе	10 мин
Вступительная часть	8 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:	2 мин
1. Моделирование и исследование модуляции сигналов	75 мин
2. Моделирование и исследование демодуляции сигналов	75 мин
Заключительная часть	5 мин
Подведение итогов	3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы	2 мин

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Под **сигналом** понимается распространяющийся в пространстве носитель с информацией, содержащейся в значениях его физических параметров. К ним относятся: электромагнитные поля и электрический ток от созданных человеком источников сигналов, таких как радиоэлектронные средства, устройства и приборы.

Классификация сигналов представлена на рис. 1.



Рис. 1 – Классификация сигналов

К аналоговым сигналам относятся сигналы, уровень (амплитуда) которых может принимать произвольные значения в определенном для сигнала интервале. Амплитуда простого и достаточно распространенного в природе гармонического сигнала изменяется по синусоидальному закону:

$$s(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где A – амплитуда, $\omega = 2\pi f$ круговая частота колебания, φ – фаза колебания. Частота f измеряется в Гц и называется линейной.

Большинство аналоговых сигналов имеют более сложную форму. Периодические (повторяющиеся через время T_n – период) сигналы произвольной формы могут быть представлены в соответствии с формулой Фурье в виде суммы гармонических колебаний:

$$s(t) = C_0 + \sum_{k=1}^n C_k \cos(k\omega t - \varphi_k), \quad (2)$$

где C_0 – постоянная составляющая сигнала; C_k – амплитуда k -й гармоники сигнала ($k=1, 2, \dots, n$); $k\omega$ и φ_k – частота и фаза k -й гармоники сигнала.

Ряд Фурье представляет собой математическую модель периодического сигнала, также как любой цвет может быть разложен на составляющие красного, зеленого и синего цветов.

Совокупность гармонических составляющих сигнала образуют его спектр. Амплитуда каждой спектральной составляющей характеризует энергию соответствующей гармоники основной частоты сигнала. Чем выше скорость изменения амплитуды сигнала, тем больше в его спектре высокочастотных гармоник. Разность между максимальной и минимальной частотами спектра сигнала, между которыми сосредоточено основная часть, например, 95% энергии, называется **шириной спектра** ΔF . Графическое изображение спектра периодического сигнала представлено на рис. 2.

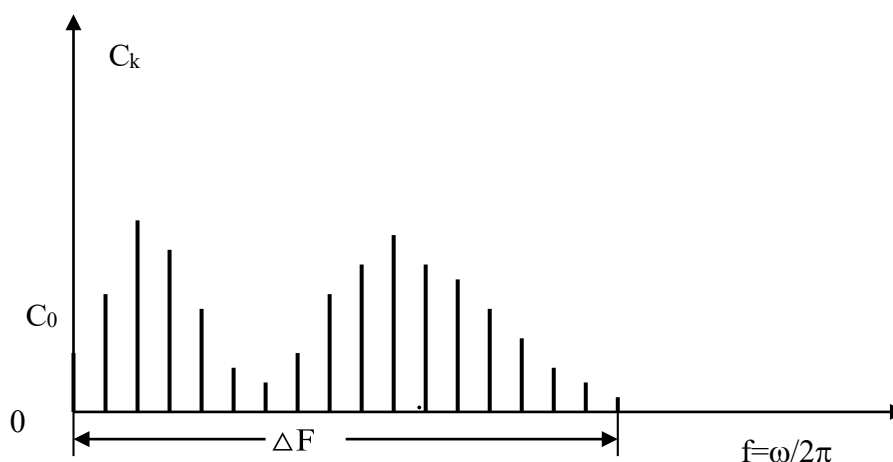


Рис. 2 – Спектр периодического многотонального аналогового сигнала

Частоты составляющих спектра непериодического аналогового сигнала непрерывно меняются. При наблюдении спектра такого сигнала на экране анализатора спектра положение и уровень различных спектральных составляющих непрерывно меняются, и спектр выглядит как сплошной.

В соответствии с изменением амплитуды аналогового сигнала меняется его энергия или мощность (так как мощность пропорциональна квадрату амплитуды). В зависимости от времени измерения энергии сигнала различают среднюю и мгновенную мощность. Десятичный логарифм отношения максимальной мощности сигнала к минимальной называется **динамическим диапазоном сигнала**.

Таким образом, *аналоговый сигнал описывается набором параметров, являющихся его признаками*. К ним относятся:

- частота или диапазон частот;
- фаза сигнала;
- длительность сигнала;
- амплитуда или мощность сигнала;
- ширина спектра сигнала;
- динамический диапазон сигнала.

У дискретных сигналов амплитуда имеет конечный, заранее определенный набор значений. Наиболее широко применяется двоичный (бинарный) дискретный сигнал: в ЭВМ, в телеграфии, при передаче данных. Информационные сигналы, циркулирующие в ЭВМ IBM PC, имеют два уровня амплитуды: низкий (L-уровень, 0 В) и высокий (H-уровень, 5 В). Осциллограмма бинарного сигнала показана на рис. 5.

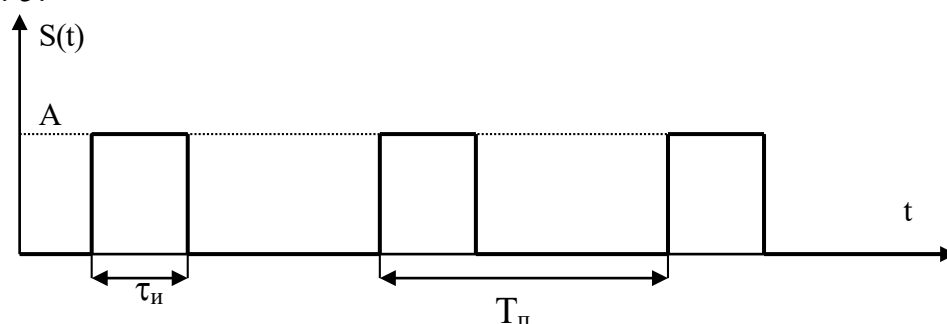


Рис. 3 – Осциллограмма бинарного сигнала

Дискретный сигнал характеризуется следующими параметрами:

- амплитудой A или мощностью P ;
- длительностью импульса $\tau_{и}$;
- периодом T_n или частотой $F_n=1/T_n$ повторения импульсов (для периодических дискретных сигналов);
- шириной спектра сигнала ΔF_C ;
- скважностью импульсов $\alpha=T_n/\tau_{и}$.

Спектр дискретного периодического сигнала содержит бесконечное количество убывающих по амплитуде гармоник. Для бинарного периодического сигнала фрагмент спектра показан на рис. 4.

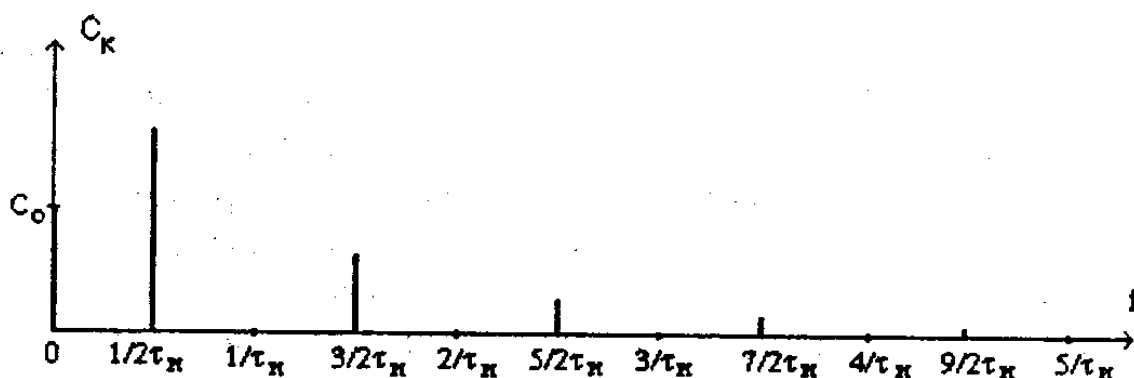


Рис. 4 – Спектр бинарного периодического сигнала со скважностью 2

Он характеризуется следующими свойствами:

- форма огибающей спектра описывается функцией $|\sin x/x|$;
- амплитуда гармоник C_k имеет нулевое значение в точках k/τ_u , $k=1,2,\dots$;
- в области частот спектра $(0-1/\tau_u)$ располагаются $\alpha-1$ гармоник;
- постоянная составляющая сигнала равна A/α .

Учитывая, что большая часть энергии сигнала сосредоточена в области частот $0-1/\tau_u$, **ширина спектра бинарного периодического сигнала** приблизительно оценивается по формуле: $\Delta F = 1/\tau_u$.

При прохождении дискретных сигналов по реальным электрическим цепям радиотехнических средств с ограниченной полосой пропускания их форма искажается и крутизна склона импульса уменьшается. Прямоугольный импульс приобретает колоколообразную форму. В результате этого размывается граница между формой аналогового и дискретного сигналов. Искажения формы и уменьшение амплитуды импульсных сигналов в проводах кабелей ограничивают дальность их передачи, например, для обеспечения межмашинного обмена данными в локальных сетях.

По физической природе сигналы могут быть акустическими, электрическими, магнитными, электромагнитными (в радиодиапазоне — радиосигналы), корпускулярными (в виде потоков элементарных частиц) и материально-вещественными, например, пахучие добавки в газ подают сигнал об его утечке.

Сигналы по виду передаваемой информации делятся на речевые, телеграфные, телекодовые, факсимильные, телевизионные, о радиоактивных излучениях и условные. Телеграфные и телекодовые сигналы используются для передачи буквенно-цифровой информации с низкой и высокой скоростью соответственно. Факсимильные и телевизионные сигналы обеспечивают передачу неподвижных и подвижных изображений. Сигналы радиоактивных излучений являются демаскирующими признаками радиоактивных веществ. Условные сигналы несут информацию, содержание которой предварительно определено между ее источником и получателем, например, горшок с цветком на подоконнике в литературных произведениях о разведчиках — о провале явки.

Сигналы от источников сообщений передаются по каналам электрической связи к приемникам и далее к получателям сообщений. Как правило, информационные сигналы являются низкочастотными и ограниченными по ширине спектра. Каналы электрической связи, напротив, являются высокочастотными, широкополосными и рассчитаны на передачу сигналов от множества источников одновременно с частотным разделением каналов. Перенос спектра сигналов из низкочастотной области в выделенную для их передачи область высоких частот выполняется операцией модуляции.

АМ соответствует переносу информации о сигнале $s(t)$ на амплитуду несущего сигнала. Амплитудная модуляция была первым видом модуляции, освоенным на практике. В настоящее время АМ применяется в основном только для радиовещания на низких частотах (не выше коротких волн) и для передачи изоб-

ражения в телевизионном вещании. Это обусловлено низким КПД использования энергии модулированных сигналов. АМ-сигнал представляет собой произведение огибающей $U(t)$ и гармонического колебания высокой частоты. Форма записи амплитудно-модулированного сигнала:

$$u(t) = U(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (3)$$

где $U(t)$ – огибающая АМ-сигнала, В;

f_0 – частота несущего сигнала, Гц;

φ_0 – начальная фаза несущего сигнала, рад;

U_0 – постоянная амплитуда несущего колебания при отсутствии модулирующего сигнала $s(t)$, В;

При частотной модуляции (ЧМ, frequency modulation – FM) в несущем гармоническом сигнале

$$s(t) = S \cos(2\pi f t + \varphi) = S_0 \cos\{2\pi f [x(t)]t + \varphi\} = S_0 \cos[\Psi(t)], \quad (4)$$

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 14»;

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

1.3. Задание для работы:

1) Исследовать характеристики амплитудно- и частотно-модулированных сигналов.

2) Исследовать характеристики манипулированных сигналов.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Исследовать характеристики амплитудно- и частотно-модулированных (АМ и ЧМ) сигналов.

1) Запустить программу EWB и собрать схему, приведенную на рис. 5.

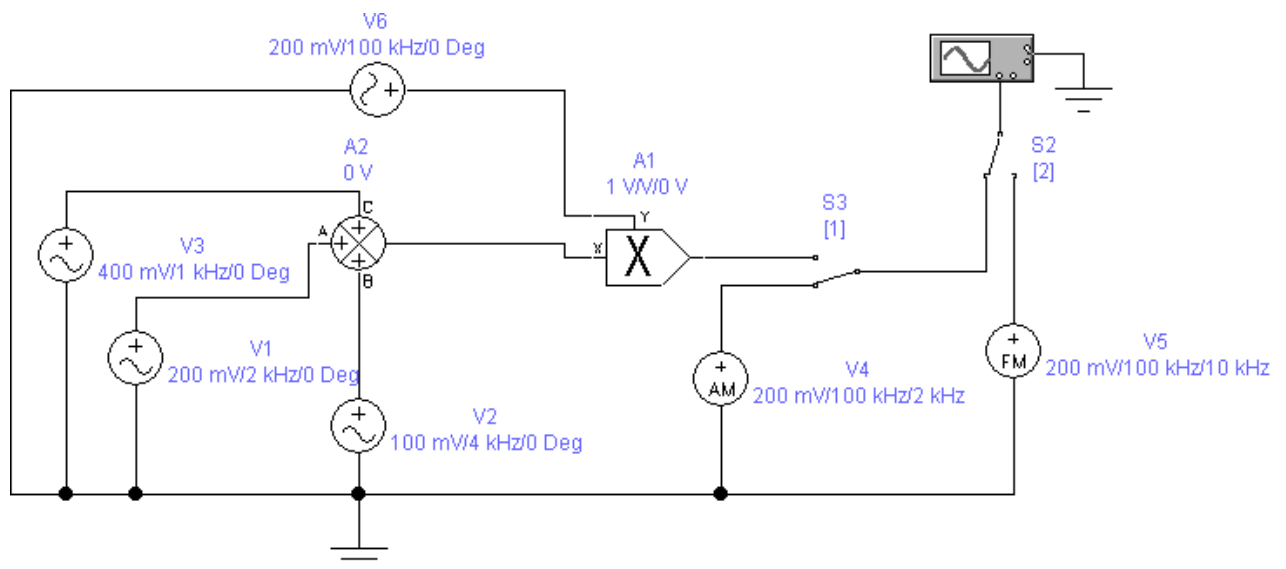


Рис. 5 – Схема исследования АМ и ЧМ сигналов

2) **Установить параметры элементов схемы** в соответствии с величинами, указанными на рис. 5. Схема исследования, приведенная на рис. 5, содержит модели:

- источника однотонового амплитудно-модулированного сигнала (V4);
- источника однотонового частотно-модулированного сигнала (V5);
- источника многотонового речеподобного сигнала, составленного из трех генераторов переменного синусоидального напряжения (V1, V2, V3) и сумматора напряжений (A2);
- генератора несущего высокочастотного колебания (V6);
- балансного модулятора (умножитель A1).

3) **Провести исследование однотонового амплитудно-модулированного сигнала.** Для этого выполнить следующие действия:

- переключатель S3 (клавиша 1) установить в нижнее положение, а переключатель S2 (клавиша 2) – в левое положение, тем самым подключив выход источника (V4) АМ сигнала к входу осциллографа;
- включить осциллограф и настроить его для регистрации АМ сигнала;
- измерить параметры и отобразить в отчете временную диаграмму или осциллограмму однотонового АМ сигнала;
- измерить и вычислить коэффициент (глубину) модуляции, воспользовавшись формулой

$$M_{AM} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}; \quad (5)$$

- сравнить вычисленный и установленные коэффициенты модуляции, определив относительную погрешность;
- получить и измерить спектр однотонового АМ сигнала с помощью симулятора Фурье анализа, установив в нем номер выходного узла схемы, подключенного к осциллографу, основную частоту (Fundamental frequency), равную 1 КГц, и число гармоник (Number of harmonics), равное 200;

- отобразить в отчете спектр (частотное представление) однотонового АМ сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра однотонового АМ сигнала изменение частоты модулирующего (информационного, низкочастотного) сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра однотонового АМ сигнала изменение коэффициента модуляции, последовательно устанавливая его равным 0,25; 0,5, 0,75 и 1;
- сделать выводы о том, какими сигнальными демаскирующими признаками обладают однотоновые АМ сигналы.

4) Провести исследование многотонового амплитудно-модулированного сигнала. Для этого выполнить следующие действия:

- переключатель S3 (клавиша 1) установить в верхнее положение, а переключатель S2 (клавиша 2) – в левое положение, тем самым подключив выход балансного модулятора (A1), как источника многотонового АМ сигнала, к входу осциллографа;
- включить осциллограф и настроить его для регистрации АМ сигнала;
- измерить и отобразить в отчете временную диаграмму или осциллограмму многотонового АМ сигнала;
- получить и измерить спектр многотонового АМ сигнала с помощью симулятора Фурье анализа, установив в нем номер выходного узла схемы, подключенного к осциллографу, основную частоту (Fundamental frequency), равную 1 КГц, и число гармоник (Number of harmonics), равное 200;
- отобразить в отчете спектр (частотное представление) многотонового АМ сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра многотонового АМ сигнала изменение амплитуды и частоты модулирующего (информационного, низкочастотного) сигнала, меняя значения амплитуды напряжения и частоты колебания генераторов (V1, V2, V3);
- сделать выводы о том, какими сигнальными демаскирующими признаками обладают однотоновые АМ сигналы.

5) Провести исследование однотонового частотно-модулированного сигнала. Для этого выполнить следующие действия:

- установить переключатель S2 (клавиша 2) – в правое положение, тем самым подключив выход источника (V5) ЧМ сигнала к входу осциллографа;
- включить осциллограф и настроить его для регистрации ЧМ сигнала;
- измерить параметры и отобразить в отчете временную диаграмму или осциллограмму однотонового ЧМ сигнала;
- измерить и вычислить девиацию частоты ΔF и индекс модуляции, воспользовавшись формулой

$$M_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta F}{F_H} = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{min}}}{2 \cdot F_H}; \quad (6)$$

- сравнить вычисленный и установленные индексы модуляции, определив относительную погрешность;
- получить и измерить спектр однотонового ЧМ сигнала с помощью симулятора Фурье анализа, установив в нем номер выходного узла схемы, подключенного к осциллографу, основную частоту (Fundamental frequency), равную 1 КГц, и число гармоник (Number of harmonics), равное 400;
- отобразить в отчете спектр (частотное представление) однотонового ЧМ сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра однотонового ЧМ сигнала изменение частоты модулирующего (информационного, низкочастотного) сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра однотонового ЧМ сигнала изменение индекса модуляции, последовательно устанавливая его равным 1; 2,4; 5; 10 и 100;
- сделать выводы о том, какими сигнальными демаскирующими признаками обладают однотоновые ЧМ сигналы.

Задание 1.2. Исследовать сигнальные признаки манипулированных сигналов.

1) **Открыть новый файл программы EWB и собрать схему,** приведенную на рис. 6.

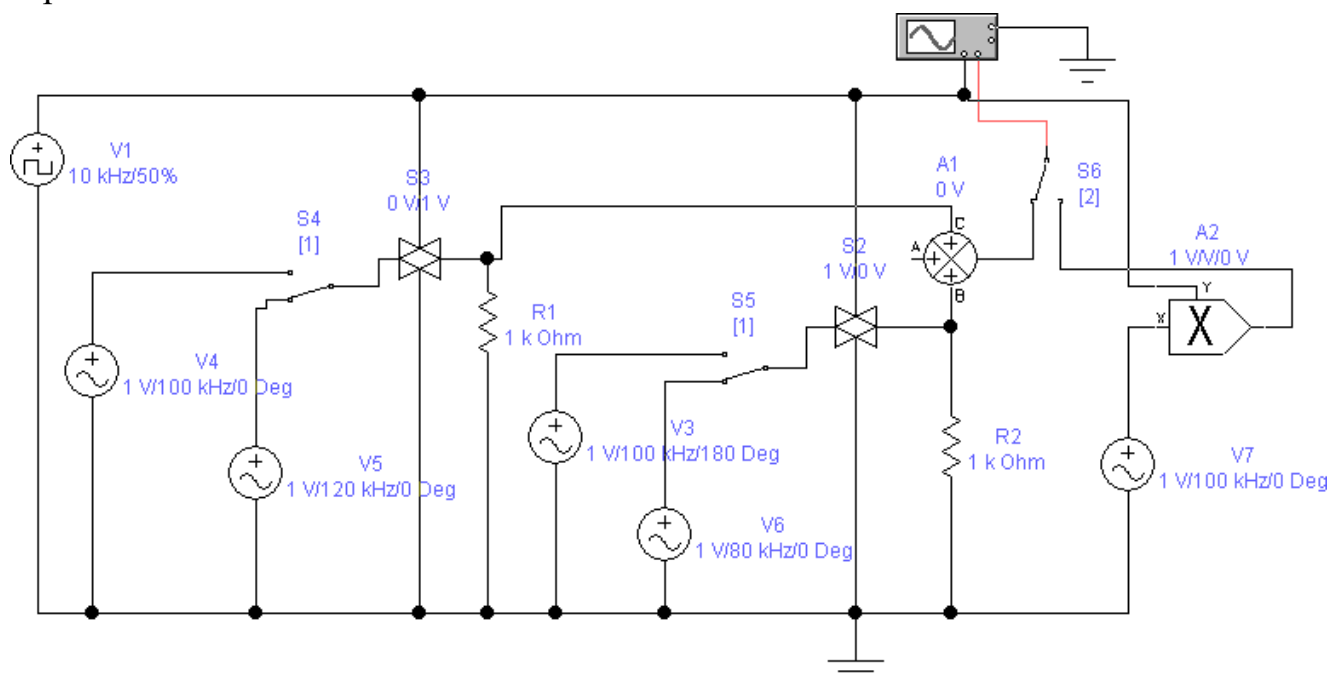


Рис. 6 – Схема исследования манипулированных сигналов

2) **Установить параметры элементов схемы** в соответствии с величинами, указанными на рис. 6. Схема исследования, приведенная на рис. 6, содержит модели:

- амплитудного модулятора (манипулятора), состоящего из балансного

модулятора (A2), генератора несущего колебания (V7) и источника битовой последовательности на базе генератора тактовых импульсов (V1);

- частотного модулятора (манипулятора), состоящего из аналоговых ключей (S3 и S2), нагруженных соответственно на сопротивления R1 и R2, сумматора напряжений (A2), генераторов несущих колебания (V5 и V6) и источника битовой последовательности на базе генератора тактовых импульсов (V1);

- фазового модулятора (манипулятора), состоящего из аналоговых ключей (S3 и S2), нагруженных соответственно на сопротивления R1 и R2, сумматора напряжений (A2), генераторов несущих колебания (V4 и V3) и источника битовой последовательности на базе генератора тактовых импульсов (V1).

3) Провести исследование амплитудно-манипулированного (АМн) сигнала. Для этого выполнить следующие действия:

- установить переключатель S6 (клавиша 2) в правое положение, тем самым подключив выход балансного АМ модулятора (A2) ко второму входу осциллографа;

- включить осциллограф и настроить его для АМн сигнала;

- измерить параметры и отобразить в отчете временную диаграмму или осциллограмму АМн сигнала;

- получить и измерить спектр АМн сигнала с помощью симулятора Фурье анализа, установив в нем номер выходного узла схемы, подключенного к второму входу осциллографа, основную частоту (Fundamental frequency), равную 1 КГц, и число гармоник (Number of harmonics), равное 200;

- отобразить в отчете спектр (частотное представление) АМн сигнала;

- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра АМн сигнала изменение частоты битовой последовательности, последовательно устанавливая ее величину, равную 25%, 50 % и 75%;

- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра АМн сигнала изменение амплитуды модулирующей битовой последовательности, устанавливая ее равной 0,5; 1 и 2 В;

- сделать выводы о том, какими сигнальными демаскирующими признаками обладают АМн сигналы.

4) Провести исследование частотно-манипулированного (ЧМн) сигнала. Для этого выполнить следующие действия:

- установить переключатель S6 (клавиша 2) в левое положение, а переключатели S4 и S5 (клавиша 2) в нижнее положение, тем самым соединив частотный манипулятор и подключив его выход (выход сумматора A1) ко второму входу осциллографа;

- включить осциллограф и настроить его для ЧМн сигнала;

- измерить параметры и отобразить в отчете временную диаграмму или осциллограмму ЧМн сигнала;

- получить и измерить спектр ЧМн сигнала с помощью симулятора Фурье анализа, установив в нем номер выходного узла схемы, подключенного к второму входу осциллографа, основную частоту (Fundamental frequency), равную 1 КГц, и число гармоник (Number of harmonics), равное 200;

- отобразить в отчете спектр (частотное представление) ЧМн сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра ЧМн сигнала изменение частоты несущих колебаний, последовательно устанавливая их величины, равные 80 и 120 КГц, 85 и 115 КГц, 90 и 110 КГц;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра ЧМн сигнала изменение частоты битовой последовательности, последовательно устанавливая ее величину, равную 25%, 50 % и 75%;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра ЧМн сигнала изменение частоты модулирующей битовой последовательности, устанавливая ее равной 10 КГц, 16 КГц, 20 КГц;
- сделать выводы о том, какими сигнальными демаскирующими признаками обладают ЧМн сигналы.

5) Провести исследование фазово-манипулированного (ФМн) сигнала.

Для этого выполнить следующие действия:

- установить переключатель S6 (клавиша 2) в левое положение, а переключатели S4 и S5 (клавиша 2) в верхнее положение, тем самым соединив фазовый манипулятор и подключив его выход (выход сумматора A1) ко второму входу осциллографа;
- включить осциллограф и настроить его для ФМн сигнала;
- измерить параметры и отобразить в отчете временную диаграмму или осциллограмму ФМн сигнала;
- получить и измерить спектр ФМн сигнала с помощью симулятора Фурье анализа, установив в нем номер выходного узла схемы, подключенного к второму входу осциллографа, основную частоту (Fundamental frequency), равную 1 КГц, и число гармоник (Number of harmonics), равное 200;
- отобразить в отчете спектр (частотное представление) ФМн сигнала;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра ФМн сигнала изменение фазы несущих колебаний, последовательно устанавливая величину фазы генераторов (V4 и V3), равные 315 и 45 градусов, 270 и 90 градусов, 180 и 180 КГц;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра ФМн сигнала изменение частоты битовой последовательности, последовательно устанавливая ее величину, равную 25%, 50 % и 75%;
- определить, как влияет на вид диаграммы и спектра ФМн сигнала изменение частоты модулирующей битовой последовательности, устанавливая ее равной 10 КГц, 16 КГц, 20 КГц;
- сделать выводы о том, какими сигнальными демаскирующими признаками обладают ФМн сигналы.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Примеры простейших демодуляторов

Рассмотрим простейший демодулятор. Принципиальная схема прибора приведена на рис. 7. Он состоит из антенны, колебательного контура L1C1, диода VD1, конденсатора C2 и измерительного прибора.

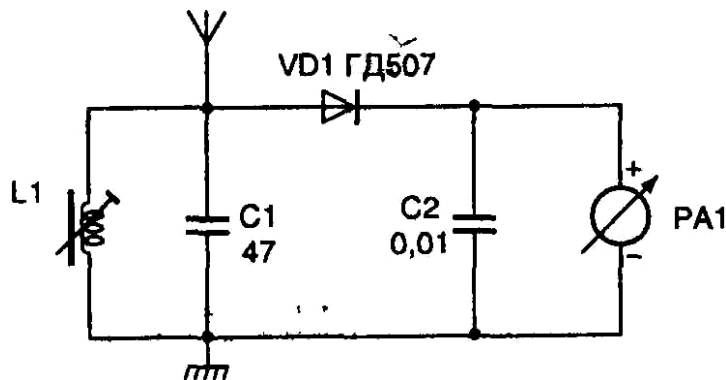


Рис. 7 – Простейший индикатор напряженности поля диапазона 27 МГц

Работает устройство следующим образом. Через антенну на колебательный контур поступают ВЧ колебания. Контур отфильтровывает колебания диапазона 27 МГц из смеси частот. Выделенные колебания ВЧ детектируются диодом VD1, благодаря чему на выход диода проходят только положительные полуволны принимаемых частот. Огибающая этих частот представляет собой НЧ колебания. Остатки ВЧ колебаний фильтруются конденсатором C2. При этом через измерительный прибор потечет ток, который содержит переменную и постоянную составляющие. Измеряемый прибором постоянный ток примерно пропорционален напряженности поля, действующей в месте приема. Этот детектор можно выполнить в виде приставки к любому тестеру.

Катушка L1 диаметром 7 мм с подстроечным сердечником имеет 10 витков провода ПЭВ-1 0,5 мм. Антенна выполнена из стальной проволоки длиной 50 см.

Чувствительность прибора можно значительно повысить, если перед детектором установить усилитель ВЧ. Эта схема, по сравнению с предыдущей, имеет более высокую чувствительность передатчика. Теперь излучение может быть зафиксировано на расстоянии несколько метров.

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1.1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

1.3. Задание для работы:

1) Моделирование и исследование простейшего демодулятора

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Моделирование и исследование простейшего демодулятора

1) Собрать схему демодулятора приведенную на рис. 8 .

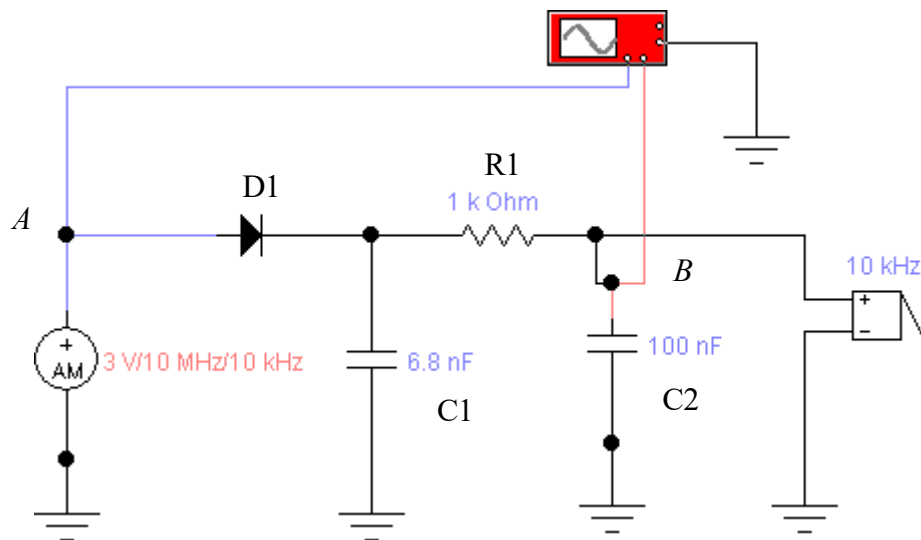


Рисунок 8 – Упрощенная принципиальная схема демодулятора

2) Отредактировать схему, установив указанные на схеме номиналы параметров радиоэлементов. При этом для генератора АМ сигналов установить амплитуду напряжения – 3 В, несущую частоту – 10 МГц, частоту модуляции – 10 КГц, и внутреннее сопротивление, равное 1 Ом. Для индикатора звуковой сигнализации установить частоту сигнала 10 КГц, напряжение – 9 В.

3) Снять временную диаграмму входного сигнала, представляющего собой высокочастотное излучение. Для этого первый канал электронного осциллографа подключить к выходу генератора (точка А).

4) Снять временную диаграмму протектированного и отфильтрованного сигнала. Для этого второй канал электронного осциллографа подключить к выходу детектора (точка В).

5) Снять спектр входного и выходного сигнала индикатора поля. Для этого выключив симулятор, войти в меню Analysis → Fourier → Simulate. При этом для измерения спектра входного ВЧ сигнала в меню Fourier установить значения основной частоты – 10 КГц, а количество гармоник – 1200, а для измерения спектра выходного НЧ сигнала установить значения основной частоты – 1 КГц, а количество гармоник – 50. Снятие спектра производить только после того, как процессор Fourier закончит вычисления и в левом нижнем углу экрана высветиться «Ready» (готов).

6) Исследовать зависимость качества работы демодулятора от параметров элементов C1, C2 и R1. Для этого установить их предназначение и, изменяя их параметры от указанных в схеме номиналов на величину в 10 раз меньше и больше, снять временную диаграмму выходного сигнала в точке В. По виду

выходного сигнала сделать выводы, сравнивая с сигналом при нормальных параметрах элементов C1, C2 и R1.

7) Занести исследованные данные в отчет по лабораторной работе и сделать выводы.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схемотехнические модели устройств;
- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма Электронный ресурс / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники Электронный ресурс / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

ТЕМА 16 ПРОЦЕССЫ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ. ЧАСТОТНАЯ СЕЛЕКЦИЯ

Занятие 16 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ.

ВРЕМЯ – 4 часа.

Учебные вопросы:

- 1) Моделирование и исследование НЧ и ВЧ фильтров.
- 2) Моделирование и исследование полосовых фильтров.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Компетенции, формируемые дисциплиной

ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности.

ОПК-2: Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных.

Результаты обучения, достигаемые в результате выполнения лабораторной работы:

Уметь:

- применять физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
- проводить экспериментальные исследования с помощью математических моделей согласно принятой методике
- моделировать и анализировать основные физические явления и процессы в телекоммуникациях с помощью средств вычислительной техники.

Владеть:

- навыками использования знаний физики при решении практических задач инженерной деятельности
- способами обработки и представления данных, полученных в результате экспериментальных исследований.
- навыками компьютерного моделирования основных физических способов получения, передачи и хранения информации.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12»
- электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

Занятие № 1		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		75 мин
1. Моделирование и исследование НЧ и ВЧ фильтров.		75 мин
Заключительная часть		5 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин
Занятие № 2		90 мин
Вводная часть		10 мин
Проверка готовности студентов к лабораторной работе		8 мин
Вступительная часть		2 мин
Вопросы (задачи), подлежащие исследованию:		50 мин
1. Моделирование и исследование полосовых фильтров.		50 мин
Заключительная часть		30 мин
Защита отчетов по лабораторной работе		25 мин
Подведение итогов		3 мин
Задание студентам для самостоятельной работы		2 мин

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Фильтрация является основным и эффективным средством подавления (ослабления) кондуктивных помех (наводок) в цепях электропитания, в сигнальных цепях интерфейса и на печатных платах, в проводах заземления. Помехоподавляющие фильтры позволяют снизить кондуктивные (наведенные) помехи, как от внешних, так и от внутренних источников помех.

В соответствии с расположением полосы пропускания фильтра относительно полосы помехоподавления в частотном спектре различают четыре класса помехоподавляющих фильтров, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) которых показаны на рис. 5.1:

- фильтры нижних частот (низкочастотные) – ФНЧ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от $\omega_1 = 0$ до ω_2 (рис. 5.1, а);
- фильтры верхних частот (высокочастотные) – ФВЧ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от ω_1 до $\omega_2 = \infty$ (рис. 5.1, б);
- полосовые (полосно-пропускающие) ПФ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от ω_1 до ω_2 (рис. 5.1, в);
- заграждающие или режекторные (полосно-задерживающие) ЗФ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от 0 до ω_1 и от ω_2 до ∞ (рис. 1, г).

В зависимости от типов элементов, из которых составлены фильтры, их делят на:

- пассивные реактивные, состоящие из элементов L и C;
- пьезоэлектрические, состоящие из кварцевых пластин;
- безындукционные пассивные, состоящие из элементов R и C.

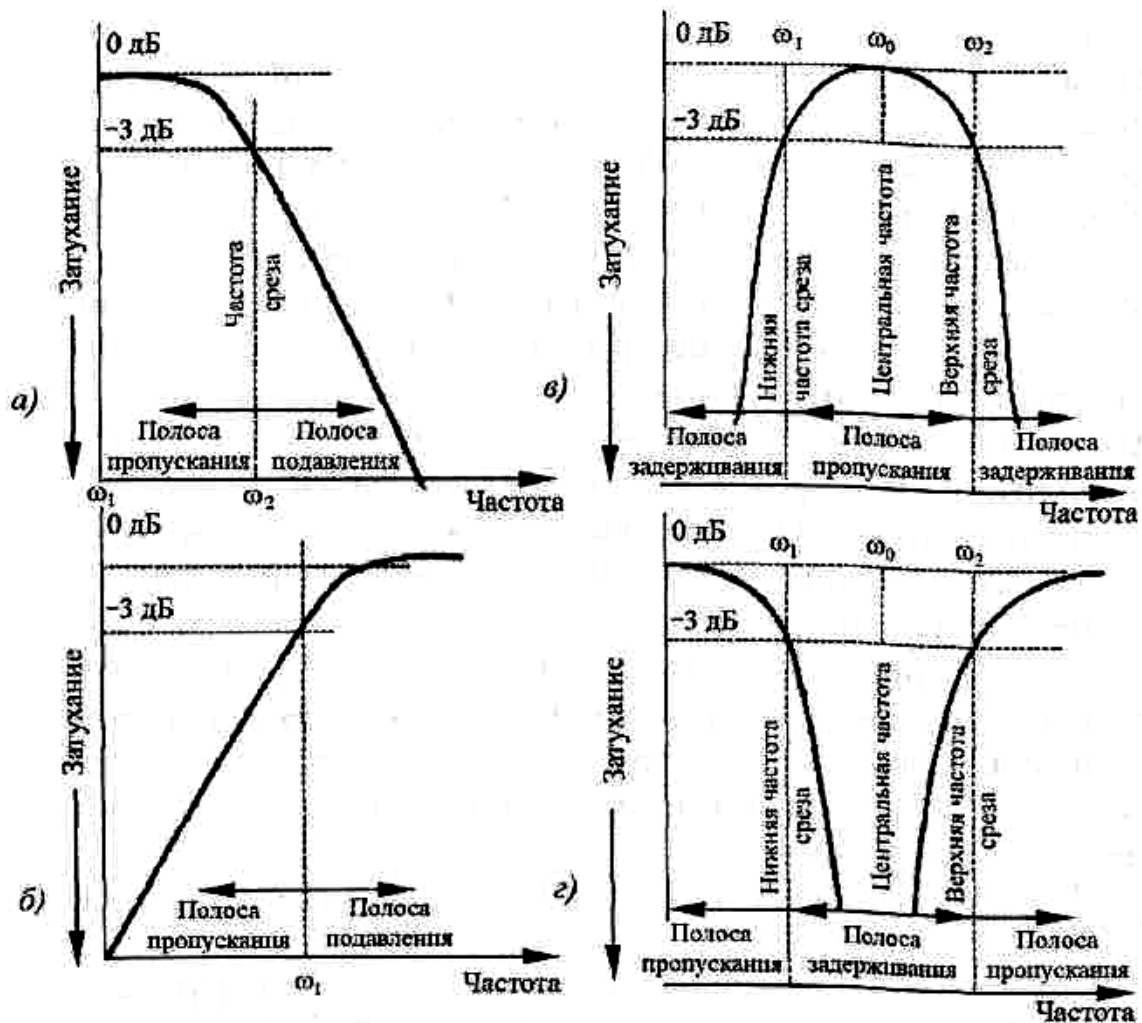


Рис. 1 – АЧХ помехоподавляющих фильтров

Возможно применение активных RC-фильтров на основе микросхем (операционных усилителей). Это может быть целесообразно в тех случаях, когда пассивные LC-фильтры становятся очень громоздкими при понижении частоты среза до звуковых частот, когда даже при выборе относительно малой емкости (например, 0,01 мкФ) дроссель становится несоизмеримо большого размера и массы. В активном фильтре операционный усилитель преобразует импеданс подключаемой к нему RC-цепи так, что устройство ведет себя как индуктивность.

Методика расчета параметров пассивных НЧ и ВЧ фильтров

Для фильтрации информационных сигналов в виде кондуктивных помех могут применяться симметричные LC-фильтры нижних или высоких частот типа К (рис. 2 и 3). В фильтрах этого типа произведение полных сопротивлений емкости и индуктивности при изменении частоты остается примерно постоянным (из-за обратно пропорционального изменения их реактивных сопротивлений при из-

менении частоты). Например, если емкостное реактивное сопротивление снижается при увеличении частоты, то индуктивное реактивное сопротивление увеличивается на соответствующую величину.

На рис. 2 и 3 приведены схемы типовых LC-фильтров нижних и верхних частот Т-образной и П-образной структур. П-образные фильтры применяют для увеличения крутизны переходной области АЧХ.

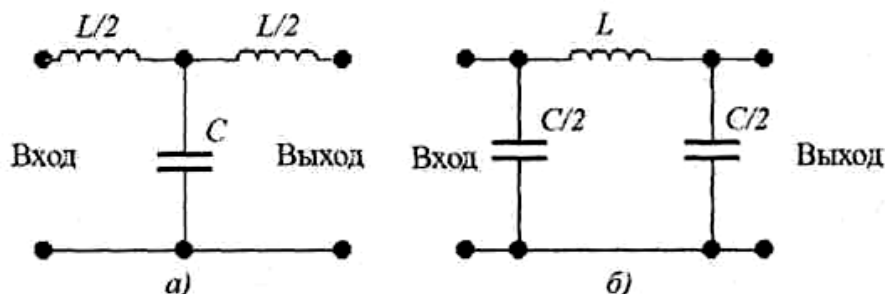


Рис. 2 – Симметричные фильтры нижних частот:
а) - Т-образный, б) - П-образный

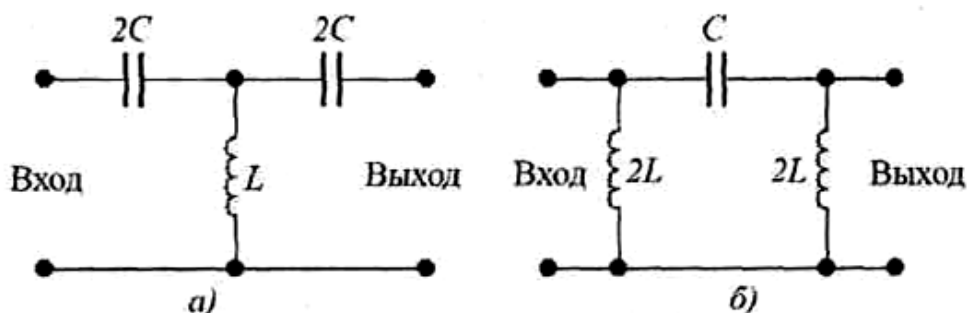


Рис. 3 – Симметричные фильтры высоких частот:
а) - Т-образный, б) - П-образный

В НЧ фильтрах значения параметров выбираются по следующим выражениям:

$$L \approx \frac{2R}{\omega_2}; \quad \omega_2 \approx \frac{2}{\sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{2}{\omega_2 R}; \quad R \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где R – активное или комплексное сопротивление нагрузки фильтра; $\omega_2 = 2\pi F_0$ – круговая частота среза фильтра; F_2 – линейная частота среза.

Формулы (1) могут быть выражены через линейную частоту среза:

$$L \approx \frac{R}{3,14 F_2}; \quad F_2 \approx \frac{1}{3,14 \sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{1}{3,14 F_2 R}, \quad (2)$$

Суммарная индуктивность Т-образного фильтра распределяется поровну между катушками (рис. 2, а) и суммарная емкость П-образного фильтра распределяется поровну между конденсаторами фильтра (рис. 2, б).

Расчетные уравнения для ВЧ фильтра:

$$L \approx \frac{R}{2\omega_1}; \quad \omega_1 = 2\pi F_1; \quad F_1 \approx \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{1}{4\omega_1 R}; \quad R \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3)$$

Формулы (3) могут быть выражены через линейную частоту среза:

$$L \approx \frac{R}{4\pi F_1}; \quad F_1 \approx \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{1}{8\pi F_1 R}; \quad R \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (4)$$

ВЧ фильтрам также присуще то преимущество, что для переменного тока конденсаторы и катушки индуктивности работают противоположным образом. Следовательно, в LC-фильтрах верхних частот последовательный элемент при увеличении частоты сигнала имеет более низкое реактивное сопротивление. Такой элемент пропускает высокочастотные сигналы, а для сигналов низких частот его реактивное сопротивление велико. Параллельный элемент оказывает шунтирующее влияние на сигналы низких частот, а для высокочастотных сигналов его реактивное сопротивление велико.

Требуемая суммарная емкость Т-образного фильтра распределяется поровну между конденсаторами фильтра так, что каждый конденсатор имеет емкость, равную удвоенному расчетному значению. В П-образном фильтре общая индуктивность распределяется поровну между двумя катушками так, что каждая из них имеет индуктивность, равную удвоенному расчетному значению.

Для повышения крутизны частотной характеристики фильтры НЧ и ВЧ выполняют по П-образной структуре.

Методика расчета параметров пассивных полосовых фильтров

На рис. 4 приведены схемы типовых полосно-заграждающих LC-фильтров Т-образной и П-образной структур.

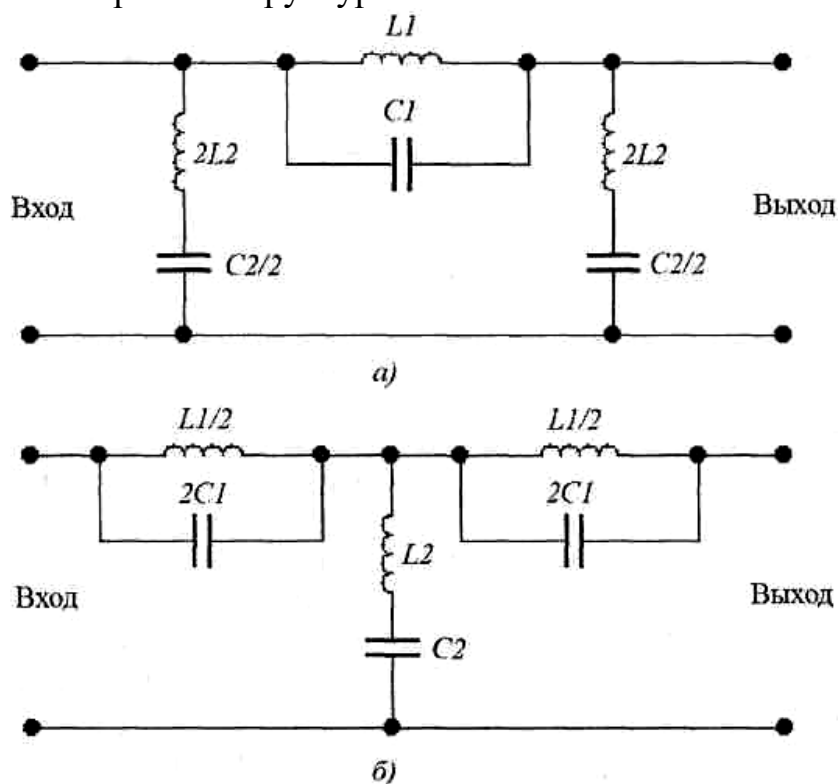


Рис. 4 – Схемы полосно-заграждающих фильтров:
а) - П-образная; б) - Т-образная

Полосно-заграждающий фильтр обладает тем преимуществом, что последовательные и параллельные резонансные цепи имеют различные

характеристики их полных сопротивлений. Параллельная LC-цепь создает на резонансной частоте максимально большое сопротивление в то время, как у последовательной цепи оно минимально. При соединении этих двух LC-цепей определенным образом, как показано на рис. 8, можно создать схему полосно-заграждающего фильтра. Последовательная ветвь обладает минимальным полным сопротивлением на центральной частоте требуемого диапазона. Ее полное сопротивление начинает увеличиваться по обе стороны от частоты резонанса. На центральной частоте эта ветвь оказывает шунтирующее воздействие. Параллельная ветвь на центральной частоте имеет максимальное сопротивление, и оно уменьшается по обе стороны резонанса. Эта ветвь препятствует прохождению сигналов в диапазоне частот по обе стороны от центральной частоты.

На рис. 5 приведены схемы типовых полосно-пропускающих LC-фильтров Т-образной и П-образной структур.

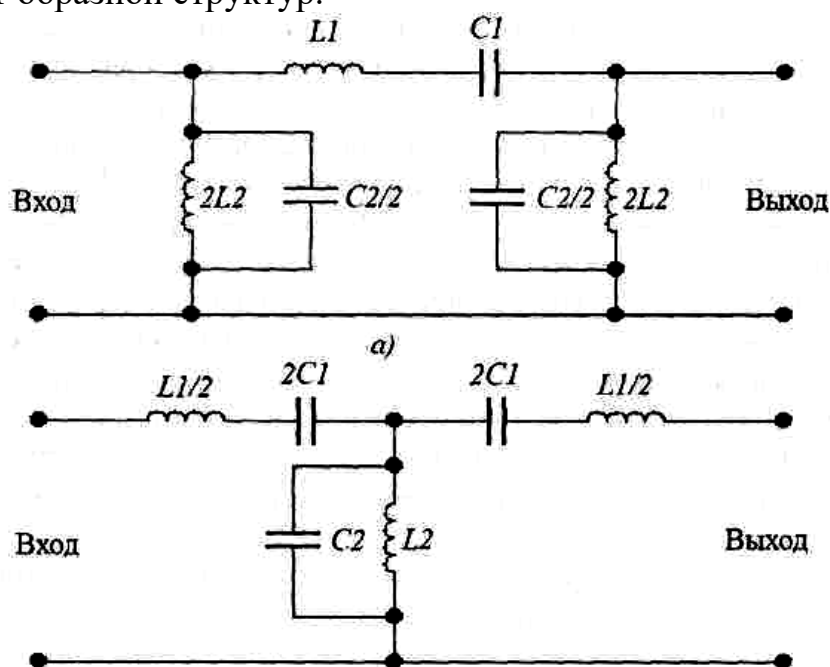


Рис. 5 – Схемы полосно-пропускающих фильтров:
а) - П-образная; б) - Т-образная

Полосно-пропускающий фильтр обладает тем преимуществом, что последовательные и параллельные резонансные цепи имеют различные характеристики их полных сопротивлений, как и полосно-заграждающий фильтр. Параллельная LC-цепь создает на резонансной частоте максимально большое сопротивление в то время, как у последовательной цепи оно минимально. На основе этих двух LC-цепей можно реализовать полосно-пропускающий фильтр. Последовательная ветвь обладает на центральной частоте требуемого диапазона минимальным полным сопротивлением, которое увеличивается по обе стороны от частоты резонанса. Эта ветвь оказывает шунтирующее воздействие на сигналы с частотами выше и ниже центра заданной полосы. Вследствие этого как последовательная, так и параллельная

ветвь обеспечивают прохождение сигналов в диапазоне частот, лежащем по обе стороны от заданной центральной частоты.

Для расчета параметров режекторных (заграждающих) фильтров обеих структур можно воспользоваться следующими формулами:

$$L_1 \approx \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} \right) \cdot \frac{4\pi R}{\omega_1 \omega_2} \approx \frac{(F_2 - F_1)R}{\pi F_1 F_2}; \quad L_2 \approx \frac{R}{2(\omega_2 - \omega_1)} \approx \frac{R}{4\pi(F_2 - F_1)}; \quad (5)$$

$$C_1 \approx \frac{1}{2(\omega_2 - \omega_1)R} \approx \frac{1}{4\pi R(F_2 - F_1)}; \quad C_2 \approx \frac{2(\omega_2 - \omega_1)}{R\omega_1 \omega_2} \approx \frac{F_2 - F_1}{\pi R F_1 F_2}; \quad (6)$$

$$F_{рез}(\text{кГц}) \approx \frac{159}{\sqrt{L_{(\text{мкГн})} \cdot C_{(\text{мкФ})}}}; \quad (7)$$

Для расчета параметров полосовых фильтров обеих структур можно воспользоваться следующими формулами:

$$L_1 \approx \frac{2R}{\omega_2 - \omega_1} \approx \frac{R}{\pi(F_2 - F_1)}; \quad L_2 \approx \frac{(\omega_2 - \omega_1)R}{2\omega_1 \omega_2} \approx \frac{(F_2 - F_1)R}{4\pi F_1 F_2}; \quad (8)$$

$$C_1 \approx \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{2\omega_1 \omega_2 R} \approx \frac{F_2 - F_1}{4\pi F_1 F_2 R}; \quad C_2 \approx \frac{2}{(\omega_2 - \omega_1)R} \approx \frac{1}{\pi R(F_2 - F_1)}; \quad (9)$$

$$F_{рез}(\text{кГц}) \approx \frac{159}{\sqrt{L_{(\text{мкГн})} \cdot C_{(\text{мкФ})}}}; \quad (10)$$

Содержание практической работы, выполняемой студентами

1.1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с симулятором электронным схем «Electronics Workbench – 5.12» и системой компьютерной математики «Mathcad – 14»;

1.2. Исходные данные для моделирования и исследования

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

№ вар.	F ₂ , кГц	F ₁ , кГц	R, Ом	№ вар.	F ₂ , кГц	F ₁ , кГц	R, Ом
1.	5,0	7,0	600	2.	5,5	7,5	500
3.	6,0	8,0	500	4.	6,5	8,5	600
5.	7,0	9,5	800	6.	7,5	9,5	700
7.	8,0	10,0	1000	8.	8,5	10,5	800
9.	9,0	11,0	600	10.	9,5	11,5	1000
11.	10,0	12,0	500	12.	10,5	12,5	500
13.	11,0	13,0	800	14.	10,0	13,0	600
15.	8,5	12,5	1000	16.	8,0	11,0	700
17.	7,5	10,5	600	18.	7,0	10,0	800
19.	6,5	9,5	500	20.	6,0	9,0	1000
21.	5,5	8,5	800	22.	5,0	8,0	500

23.	4,5	7,5	1000	24.	4,0	7,0	600
25.	3,5	6,5	700	26.	3,0	6,0	1000

1.3. Задание для работы:

Базового уровня:

- 1) Смоделировать и исследовать пассивный фильтр низких частот.
- 2) Смоделировать и исследовать пассивный фильтр высоких частот.
- 3) Смоделировать и исследовать пассивный полосно-пропускающий фильтр.
- 4) Смоделировать и исследовать пассивный полосно-заграждающий фильтр.

1.4. Порядок выполнения работы

Задание 1.1. Смоделировать и исследовать пассивный фильтр низких частот.

1.1. Для фильтра низких частот рассчитать параметры элементов L и C для Т-образной и П-образной структур по заданной частоте среза F_2 и нагрузке R . Для этого, воспользовавшись формулами (2), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушки индуктивности L , затем емкости C .

1.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного фильтра нижних частот согласно схеме, приведенной на рис. 6.

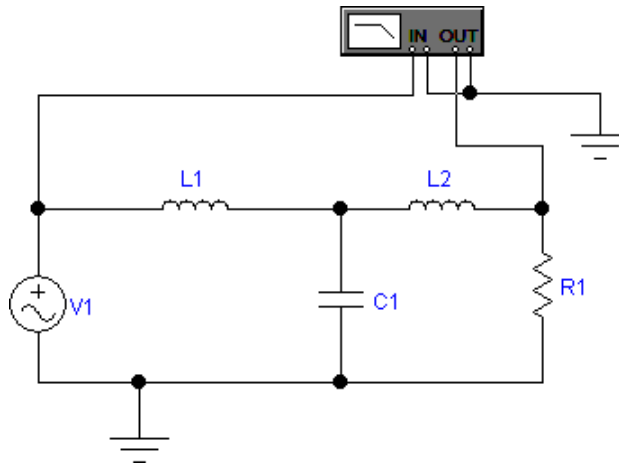


Рис. 6 – Моделируемая схема Т-образного НЧ фильтра

1.3. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C . При этом суммарная индуктивность Т-образного НЧ фильтра распределяется поровну между катушками $L1$ и $L2$. Установить в источнике $V1$ напряжение, равное 1 В, а частоту – 1 КГц.

1.4. Провести исследование схемы пассивного Т-образного НЧ фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) Т-образного НЧ фильтра.

2) Определить частоту среза фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.

3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.

4) Определить крутизну спада АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октаву, для этого произвести:

- измерение уровня АЧХ на частоте, в 2 раза превышающей измеренную частоту среза,
- от измеренной величины вычесть значение ослабления на измеренной частоте среза.

5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

1.5. Провести исследование реакции (отклика) пассивного НЧ фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов 1 КГц, а измеритель АЧХ на осциллограф.

2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.

3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.

4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра.

5) Изменить тактовую частоту входного сигнала, установив ее значение равное 5 КГц. Повторить выполнение пунктов 2 – 4.

6) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

1.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного фильтра нижних частот согласно схеме, приведенной на рис. 7.

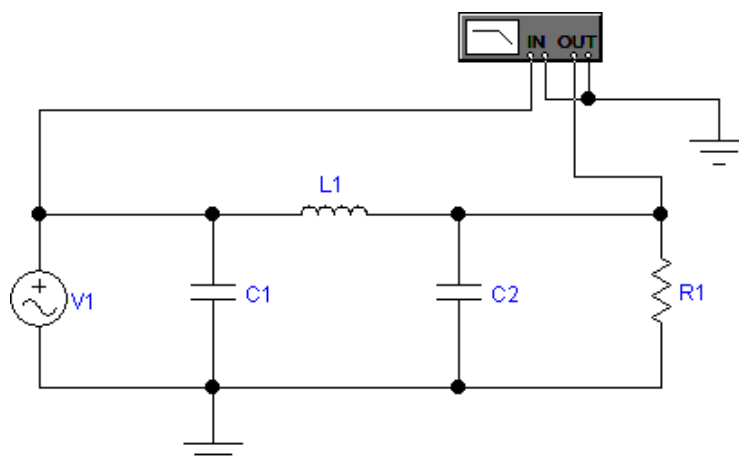


Рис. 7 – Моделируемая схема П-образного НЧ фильтра

1.7. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C , при этом суммарная емкость П-образного НЧ фильтра распределяется поровну между конденсаторами $C1$ и $C2$. Установить в источнике $V1$ напряжение, равное 1 В, а частоту – 1 КГц.

1.8. Провести исследование схемы пассивного П-образного НЧ фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ П-образного НЧ фильтра.

2) Определить частоту среза фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.

3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.

4) Определить крутизну спада АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октаву, для этого произвести:

– измерение уровня АЧХ на частоте, в 2 раза превышающей измеренную частоту среза,

– от измеренной величины вычесть значение ослабления на измеренной частоте среза.

5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

1.9. Провести исследование реакции (отклика) пассивного НЧ фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов 1 КГц, а измеритель АЧХ на осциллограф.

2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.

3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.

4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра.

5) Изменить тактовую частоту входного сигнала, установив ее значение равное 5 КГц. Повторить выполнение пунктов 2 – 4.

6) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

1.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных НЧ фильтров.

Задание 1.2. Смоделировать и исследовать пассивный фильтр высоких частот.

2.1. Для фильтра высоких частот рассчитать параметры элементов L и C для Т-образной и П-образной структур по заданной частоте среза F_1 и нагрузке R. Для этого, воспользовавшись формулами (4), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушки индуктивности L, затем емкости C.

2.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного фильтра высоких частот согласно схеме, приведенной на рис. 8.

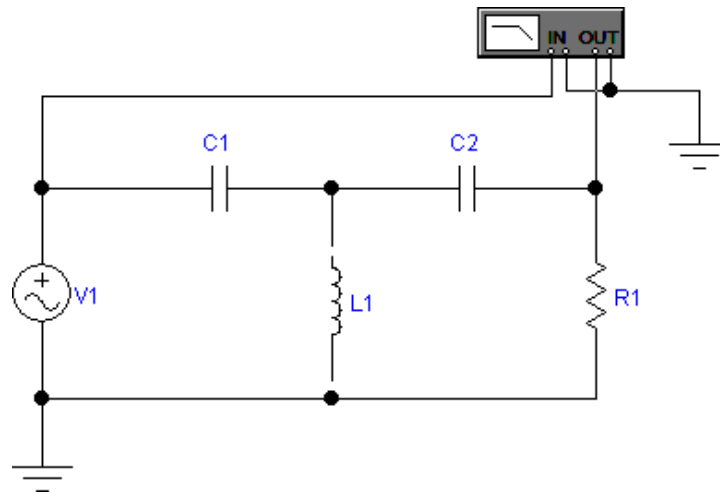


Рис. 8 – Моделируемая схема Т-образного ВЧ фильтра

2.3. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C , при этом суммарная емкость Т-образного ВЧ фильтра распределяется поровну между конденсаторами $C1$ и $C2$, так что каждый конденсатор имеет емкость, равную удвоенному расчетному значению. Установить в источнике $V1$ напряжение, равное 1 В, а частоту – 1 КГц.

2.4. Провести исследование схемы пассивного Т-образного ВЧ фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

- 1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ Т-образного ВЧ фильтра.
- 2) Определить частоту среза фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.
- 3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.
- 4) Определить крутизну спада АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октаву, для этого произвести:
 - измерение уровня АЧХ на частоте, в 2 раза превышающей измеренную частоту среза,
 - от измеренной величины вычесть значение ослабления на измеренной частоте среза.
- 5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

2.5. Провести исследование реакции (отклика) пассивного ВЧ фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

- 1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов 1 КГц, а измеритель АЧХ на осциллограф.
- 2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.
- 3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.
- 4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра.

5) Изменить тактовую частоту входного сигнала, установив ее значение равное 5 КГц. Повторить выполнение пунктов 2 – 4.

6) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

2.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного фильтра высоких частот согласно схеме, приведенной на рис. 9.

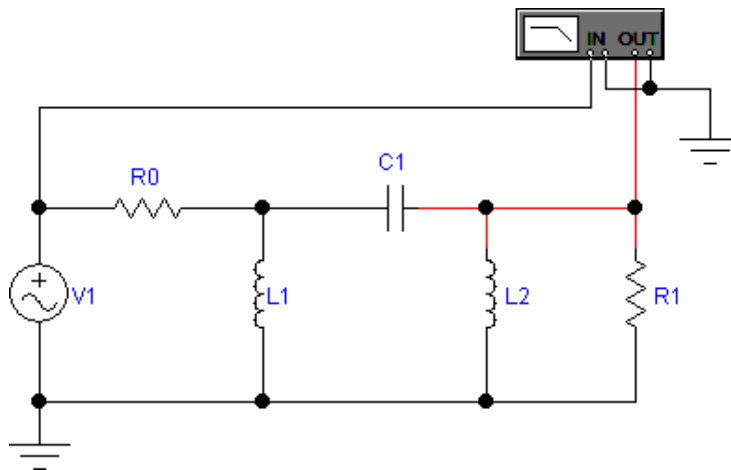


Рис. 9 – Моделируемая схема П-образного ВЧ фильтра

2.7. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C , при этом суммарная индуктивность П-образного фильтра распределяется поровну между катушками $L1$ и $L2$, так что каждая катушка имеет индуктивность, равную удвоенному расчетному значению. Установить в источнике $V1$ напряжение, равное 1 В, с частотой – 1 КГц, а также величину внутреннего сопротивления источника – $R0=1$ Ом.

2.8. Провести исследование схемы пассивного П-образного ВЧ фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ П-образного ВЧ фильтра.

2) Определить частоту среза фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.

3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.

4) Определить крутизну спада АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октаву, для этого произвести:

- измерение уровня АЧХ на частоте, в 2 раза превышающей измеренную частоту среза,

- от измеренной величины вычесть значение ослабления на измеренной частоте среза.

5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

2.9. Провести исследование реакции (отклика) пассивного ВЧ фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов 1 КГц, а измеритель АЧХ на осциллограф.

2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.

3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.

4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра.

5) Изменить тактовую частоту входного сигнала, установив ее значение равное 5 КГц. Повторить выполнение пунктов 2 – 4.

6) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

2.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных ВЧ фильтров.

Задание 1.3. Смоделировать и исследовать пассивный полосно-пропускающий фильтр.

3.1. Для полосового пропускающего фильтра рассчитать параметры элементов L и C для Т-образной и П-образной структур по заданной полосе пропускания $F_1 - F_2$ и нагрузке R . Для этого, воспользовавшись формулами (8) и (9), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушек индуктивности L , затем емкостей C .

3.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного полосно-пропускающего фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 5.10.

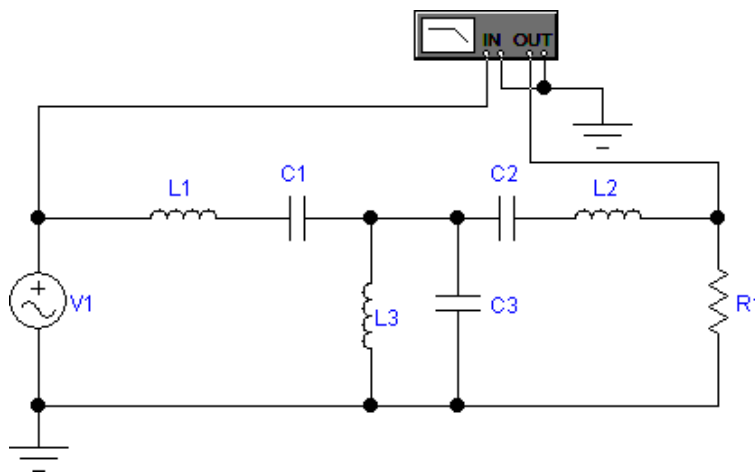


Рис. 5.10 – Моделируемая схема Т-образного полосового фильтра

3.3. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C , при этом суммарная емкость последовательной цепи Т-образного полосового фильтра распределяется поровну между конденсаторами $C1$ и $C2$, так что каждый конденсатор имеет емкость, равную

удвоенному расчетному значению, а суммарная индуктивность последовательной цепи фильтра распределяется поровну между катушками L 1 и L2. Установить в источнике V1 напряжение, равное 1 В, а частоту – 1 КГц.

3.4. Провести исследование схемы пассивного Т-образного полосового фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ Т-образного полосового фильтра.

2) Определить полосу пропускания фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.

3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.

4) Определить крутизну спадов АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октаву, для этого произвести:

– измерение уровня АЧХ на частотах, в 2 раза превышающих измеренных частот среза,

– от измеренных величин вычесть значения ослабления на измеренных частотах среза.

5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

3.5. Провести исследование реакции (отклика) пассивного полосового фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов, равной центральной частоте полосы пропускания, а измеритель АЧХ на осциллограф.

2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.

3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.

4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра и сделать выводы по результатам проделанных исследований.

4.3.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного полосового фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 11.

3.7. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C, при этом суммарная емкость параллельной цепи П-образного полосового фильтра распределяется поровну между конденсаторами C1 и C2, а суммарная индуктивность параллельной цепи фильтра распределяется поровну между катушками L 1 и L2, так что каждая катушка имеет индуктивность, равную удвоенному расчетному значению. Установить в источнике V1 напряжение, равное 1 В с частотой – 1 КГц, а также величину внутреннего сопротивления источника – $R_0=1\text{ Ом}$.

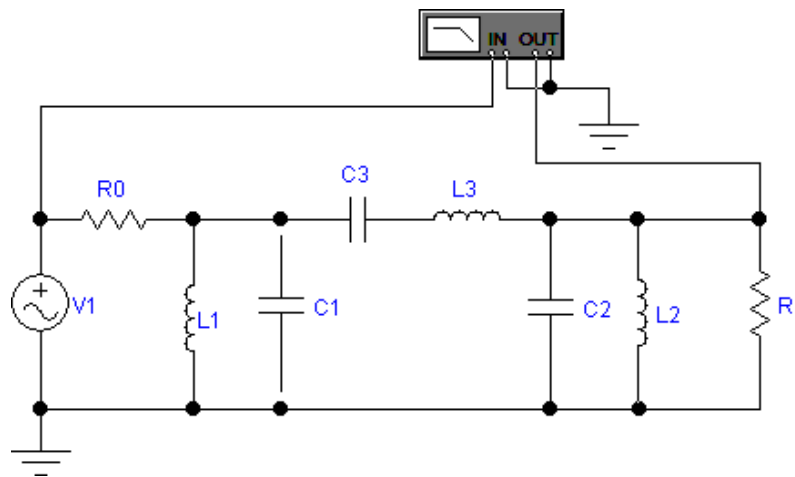


Рис. 11 – Моделируемая схема П-образного полосового фильтра

3.8. Провести исследование схемы пассивного П-образного полосового фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

- 1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ П-образного полосового фильтра.
- 2) Определить полосу пропускания фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.
- 3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.
- 4) Определить крутизну спадов АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октава, для этого произвести:
 - измерение уровня АЧХ на частотах, в 2 раза превышающих измеренные частоты среза,
 - от измеренных величин вычесть значения ослабления на измеренных частотах среза.
- 5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

3.9. Провести исследование реакции (отклика) пассивного полосового фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

- 1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов, равной центральной частоте полосы пропускания, а измеритель АЧХ на осциллограф.
- 2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.
- 3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе полосового фильтра.
- 4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра и сделать выводы по результатам проделанных исследований.

3.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных полосовых фильтров.

Задание 1.4. Смоделировать и исследовать пассивный полосно-заграждающий фильтр.

4.1. Для полосового заграждающего фильтра рассчитать параметры элементов L и C для Т-образной и П-образной структур по заданной полосе пропускания $F_1 - F_2$ и нагрузке R . Для этого, воспользовавшись формулами (5) и (5.6), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушек индуктивности L , затем емкостей C .

4.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного заграждающего фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 12.

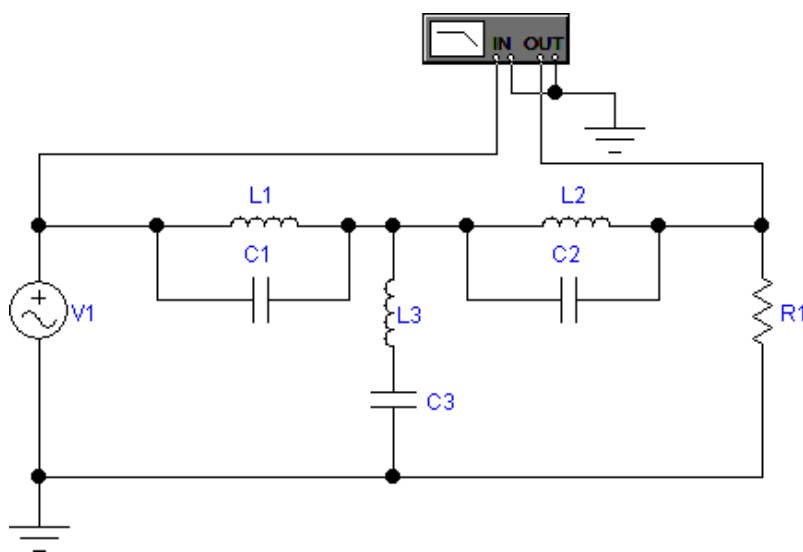


Рис. 12 – Моделируемая схема Т-образного заграждающего фильтра

4.3. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C , при этом суммарная емкость параллельной цепи Т-образного заграждающего фильтра распределяется поровну между конденсаторами $C1$ и $C2$, так что каждый конденсатор имеет емкость, равную удвоенному расчетному значению, а суммарная индуктивность параллельной цепи фильтра распределяется поровну между катушками $L1$ и $L2$. Установить в источнике $V1$ напряжение, равное 1 В, а частоту – 1 КГц.

4.4. Провести исследование схемы пассивного Т-образного заграждающего фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ Т-образного заграждающего фильтра.

2) Определить полосу заграждения фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.

3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.

4) Определить крутизну спадов АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октаву, для этого произвести:

- измерение уровня АЧХ на частотах, в 2 раза превышающих измеренных частот среза,
- от измеренных величин вычесть значения ослабления на измеренных частотах среза.

5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

4.5. Провести исследование реакции (отклика) пассивного заграждающего фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов, равной центральной частоте полосы пропускания, а измеритель АЧХ на осциллограф.

2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.

3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.

4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра и сделать выводы по результатам проделанных исследований.

4.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного заграждающего фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 13.

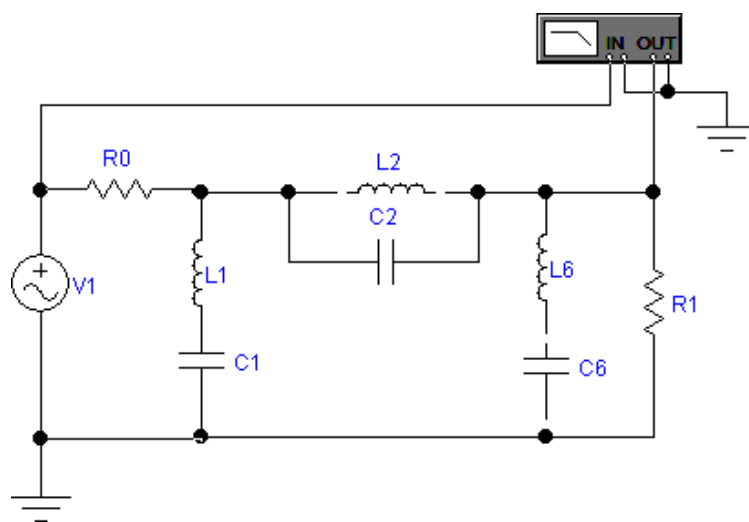


Рис. 13 – Моделируемая схема П-образного заграждающего фильтра

4.7. Установить в собранной схеме значения рассчитанных величин катушки индуктивности L и емкости C , при этом суммарная индуктивность параллельной цепи П-образного заграждающего фильтра распределяется поровну между катушками $L1$ и $L2$, а суммарная емкость параллельной цепи фильтра распределяется поровну между конденсаторами $C1$ и $C2$, так что каждый конденса-

тор имеет емкость, равную удвоенному расчетному значению. Установить в источнике V1 напряжение, равное 1 В с частотой – 1 КГц, а также величину внутреннего сопротивления источника – $R_0=1$ Ом.

4.8. Провести исследование схемы пассивного П-образного заграждающего фильтра. Для этого выполнить следующие операции:

1) С помощью измерителя частотных характеристик (*Bode plotter*) построить в логарифмическом масштабе АЧХ П-образного заграждающего фильтра.

2) Определить полосу заграждения фильтра, сравнить ее с заданным значением и рассчитать относительную погрешность.

3) Определить максимальное отклонение входного сигнала и его знак в полосе пропускания фильтра.

4) Определить крутизну спадов АЧХ фильтра, как степень ослабления уровня сигнала на одну октаву, т.е. дБ/октава, для этого произвести:

- измерение уровня АЧХ на частотах, в 2 раза превышающих измеренные частоты среза,

- от измеренных величин вычесть значения ослабления на измеренных частотах среза.

5) Сделать выводы по результатам проделанных исследований.

4.9. Провести исследование реакции (отклика) пассивного заграждающего фильтра на импульсное входное воздействие. Для этого выполнить следующие действия:

1) Модифицировать схему исследования фильтра, заменив генератор гармонического напряжения генератором прямоугольных импульсов с частотой следования импульсов, равной центральной частоте полосы пропускания, а измеритель АЧХ на осциллограф.

2) С помощью осциллографа снять эпюры напряжения входной импульсной последовательности и сигнала на выходе фильтра. Осциллограммы занести в отчет.

3) С помощью Фурье анализатора получить и измерить спектр входной импульсной последовательности и спектр сигнала на выходе фильтра.

4) Объяснить причины искажения сигнала на выходе фильтра и сделать выводы по результатам проделанных исследований.

4.4.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных заграждающих фильтров.

1.5. Составить отчет о проделанной работе в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,
- составленные листинги программ математических моделей,
- разработанные или составленные схемотехнические модели устройств;

- результаты исследований в виде используемых формул и результатов расчетов, полученных графиков, осциллограмм, временных диаграмм, сделанных заключений и выводах по каждому заданию;
- общие выводы о проделанной работе.

6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной представить полностью оформленный отчет, не содержащий существенных ошибок. Практически выполнить одно из заданий, назначенных преподавателем, пояснив при этом все физические явления и процессы, происходящие в выполняемом задании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Сагдеев К.М. Физические основы защиты информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / К.М. Сагдеев, В.И. Петренко, А.Ф. Чипига. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 394 с.

2) Евстифеев В.В. Физические основы электричества и магнетизма [Электронный ресурс] / Евстифеев В.В.: учебное пособие. - Пенза: ПГУ, 2019. - 416 с.

3) Булатов В.Н. Физические основы электроники [Электронный ресурс] / Булатов В.Н.: конспект лекций для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.02 инфокоммуникационные технологии и системы связи. - Оренбург: ОГУ, 2018. - 178 с.

4) Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебник / А.Е. Гольдштейн. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2010. — 292 с.

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Физические основы телекоммуникаций»
для студентов направления подготовки

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Направленность (профиль)

«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	9
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	12
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	13
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ЛИТЕРАТУРЫ.....	14
5. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕСТЫ ДЛЯ САМОТЕСТИРОВАНИЯ, ПОДГОТОВКИ К ТЕСТИРОВАНИЮ.....	18
6. КОМПЛЕКТ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ РЕДАКТОРОВ	22
8. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ	28

ВВЕДЕНИЕ

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель освоения дисциплины: формирование у студентов общепрофессиональных компетенций в направлении научного мышления и исследовательской деятельности.

Задачи освоения дисциплины:

1) Систематизация фундаментальных знаний в области физики и математики, использования их для решения практических задач по формализации и анализу физической сущности процессов, связанных с получением, передачей, обработкой и хранением информации в информационно-телекоммуникационных системах.

2) Практическая подготовка к проведению экспериментальных исследований путем моделирования физических явлений и процессов, возникающих в информационно-телекоммуникационных системах, а также к использованию основных приемов обработки и представления полученных данных.

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физические основы телекоммуникаций» относится к дисциплинам обязательной части Блока 1 Дисциплины (модули).

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных 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, физические явления и процессы, имеющие место в телекоммуникационных системах; основные физические способы и математические методы, применяемые в телекоммуникациях для накопления, передачи и обработки информации.
	ИД-2 опк-1 применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера.	Применяет физические законы и методы для формализованного представления физических явлений и процессов, имеющих место в телекоммуникациях.
	ИД-3 опк-1 использует знания физики и математики при решении практических задач.	Использует знания физики при решении практических задач инженерной деятельности в области телекоммуникаций.
ОПК-2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ИД-3 опк-2 понимает основные методы и средства проведения экспериментальных исследований, системы стандартизации и сертификации.	Понимает основные методы и средства проведения экспериментальных исследований с помощью средств вычислительной техники.
	ИД-4 опк-2 выбирает способы и средства измерений и проводит экспериментальные исследования.	Выбирает необходимые способы и средства измерений, проводит экспериментальные исследования.
	ИД-5 опк-2 владеет способами	Владеет способами обработки и

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
	обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.	представления полученных лабораторных данных и оценки погрешности результатов измерений.

4. Объем учебной дисциплины (модуля) и формы контроля

Объем занятий: всего: 5_з.е., 180_акад.ч.	ОФО, в астр. часах
Контактная работа:	
Лекции/из них практическая подготовка	8/
Лабораторных работ/из них практическая подготовка	8/8
Практических занятий/из них практическая подготовка	-
Самостоятельная работа	110
Формы контроля	
Экзамен	+
Контрольные работы	

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием количества часов и видов занятий

(разделам) с указанием количества часов и видов занятий						
№	Раздел (тема) дисциплины и краткое содержание	Формируемые компетенции, индикаторы	очная форма			
			Контактная работа обучающихся с преподавателем /из них в форме практической подготовки, часов			Самостоятельная работа, часов
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
3 семестр						
1	Информационно-телекоммуникационная инфраструктура как сложная физическая система. Базовые понятия и определения. Общие принципы организации аппаратных средств телекоммуникационных сетей и систем. Глобальная информационная инфраструктура ГИИ. Дискретные элементы и их реализация. Изготовление и монтаж аппаратных средств телекоммуникационных систем. Лабораторная работа №1. Моделирование и исследование простых аналоговых и цифровых сигналов.	ОПК-1 ИД-1оп ИД-2оп ИД-3оп ОПК- ИД-3оп ИД-4оп ИД-5оп	2.00 / -		2.00 / 2.00	27.00

2	Аппаратные средства обработки цифровых сигналов в телекоммуникационных системах. Аппаратные средства и интерфейсы ЦАП. Характеристики АЦП и ЦАП. Кодирование и модуляция, мультиплексирование и демultipлексирование. Лабораторная работа №2. Моделирование и исследование процесса распространения простых сигналов в физической среде.	ОПК-1 ИД-1_{ОПК-1} ИД-2_{ОПК-1} ИД-3_{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3_{ОПК-2} ИД-4_{ОПК-2} ИД-5_{ОПК-2}	2.000 / -		2.00 /23.00	27.00
3	Аппаратные средства абонентских устройств. Аппаратные средства абонентского устройства телефонии. Аппаратные средства абонентского устройства для IP-телефонии. Аппаратные средства абонентского устройства мобильной связи. Лабораторная работа №3. Моделирование и исследование электрических полей.	ОПК-1 ИД-1_{ОПК-1} ИД-2_{ОПК-1} ИД-3_{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3_{ОПК-2} ИД-4_{ОПК-2} ИД-5_{ОПК-2}	2.00 / -		2.00 /2.00	27.00

4	Управление и расчет параметров конфигурации аппаратных средств телекоммуникационных систем. Управление конфигурацией аппаратных средств телекоммуникационных систем. Расчет и ограничения параметров аппаратных средств телекомму- никации. Расчет параметров аппаратных средств процессорной системы обработки пакетов Лабораторная работа №4. Моделирование и исследование простейшего демодулятора		2.00 / -		2.00 / 2.00	29.00

	ИТОГО за 3 семестр		8.00 / -		8.00 / 8.00	110.00
	Подготовка к экзамену					
	ИТОГО		8.00 / -		8.00 / 8.00	110.00

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Все виды самостоятельной работы по дисциплине "Физические основы телекоммуникаций" приведены в таблице «Технологическая карта самостоятельной работы». В основу самостоятельной работы студентов по дисциплине положено конспектирование лекций и рекомендуемых источников, подготовка к компьютерному тестированию знаний, оформление и подготовка к защите отчетов по лабораторным работам, выполнению разноуровневых индивидуальных заданий в ходе лабораторных работ. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности, которые студенты предъявляют преподавателю в ходе лабораторных занятий или в часы индивидуальных консультаций.

Таблица 1 - Технологическая карта самостоятельной работы.

Код оцениваемой компетенции, индикаторов	Этап формирования компетенции (№ темы) (в соответствии с рабочей программой дисциплины)	Средства и технологии оценки	Вид контроля, аттестация (текущий/промежуточный)	Тип контроля (устный, письменный или с использованием технических средств)	Наименование оценочного средства
3 семестр					
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Темы № 1–17	Собеседование, оценка ответов по вопросам заданных тем	текущий	устный	вопросы для собеседования
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Темы № 1–17	Тестирование с помощью компьютерных тестовых заданий	текущий	с использованием технических средств	компьютерные тестовые задания
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Темы № 1–17	Зачетное задание, выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	текущий	письменный	Комплект разноуровневых заданий
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Темы № 1–17	Оценка знаний экзаменационных вопросов	промежуточный	устный	Вопросы к экзамену

Для успешного освоения дисциплины, необходимо выполнить указанные в таблице 1 виды самостоятельной работы, используя рекомендуемые источники информации.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

При самостоятельном изучении тем лекционных занятий и заданной литературы студентам рекомендуется:

— в день проведения занятий проработать, изученный на занятии учебный материал по конспекту. При этом необходимо выделить вопросы, на которые следует обратить большее внимание при дальнейшем изучении текущей темы. После проработки учебного материала необходимо ответить на, рекомендуемые контрольные вопросы;

— с целью качественного закрепления изученного материала в последующем следует более детально проработать учебный материал с использованием рекомендованной литературы. Студентам рекомендуется выделить вопросы, требующие более детальной проработки с помощью преподавателя;

— накануне проведения лекции студенту рекомендуется закрепить ранее изученный теоретический материал, подготовить вопросы, требующие уточнения у преподавателя.

Рекомендации по организации работы с литературой

Для овладения, закрепления и систематизации знаний студентам рекомендуется самостоятельная работа с рекомендованной литературой и конспектом лекций. При самостоятельной работе с рекомендованной литературой студентам рекомендуется проводить конспектирование учебного материала, изложенного в рекомендованных источниках.

Конспектирование источников проводится при детальном изучении темы, при этом студентам рекомендуется:

— дополнять конспект лекционного занятия путем его расширения по наиболее важным вопросам, рассмотренным на занятии. Конспектирование источников заключается в дополнении конспекта следующими положениями:

— основные определения и их физический смысл;

— основные математические соотношения с раскрытием их физического смысла;

— выводы по учебным вопросам, изучаемой темы занятий.

Контроль этого вида самостоятельной работы осуществляется на учебных занятиях путем проверки преподавателем конспекта лекций и собеседования.

При конспектировании источников студенты должны исходить из рационального объема, конспектируемого материала. Конспект должен быть кратким и понятным при его использовании после изучения текущей темы.

При конспектировании источников рекомендуется отдельные рисунки, наиболее важные их фрагменты, наиболее важные формулы выделять цветом. При ведении конспекта на занятии рекомендуется заполнять две трети страницы листа тетради по вертикали, а свободную часть использовать при дополнении конспекта, по изучаемому вопросу.

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации.

Конспектирование источников оценивается удовлетворительно и неудовлетворительно. Работа по конспектированию источников оценивается удовлетворительно если:

— конспект имеет достаточный объем детализации по, изучаемой теме, обеспечивающий заданный уровень освоения теоретического материала дисциплины;

— конспект оформлен аккуратно, изучаемый материал изложен последовательно в соответствии с порядком изучения дисциплины, содержит обобщающие выводы по каждой теме.

Работа по конспектированию источников оценивается неудовлетворительно, если не выполнены требования на оценку удовлетворительно.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При выполнении практикума по дисциплине (лабораторные работы) для достижения базового уровня сформированности компетенций студент должен уметь применять базовые знания по разделам дисциплины, владеть навыками самостоятельного решения учебных задач базового уровня.

При выполнении практикума по дисциплине (лабораторные работы) для достижения повышенного уровня сформированности компетенций студент должен уметь применять повышенные знания по разделам дисциплины, владеть навыками самостоятельного решения учебных задач повышенного уровня.

Методические указания при подготовке к лабораторной работе

Подготовку к лабораторной работе рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- уяснить тему и цель, предстоящей лабораторной работы;
- изучить теоретический материал в соответствии с темой лабораторной работы (рекомендуется использовать рекомендованную литературу, конспект лекций, учебное пособие (практикум по лабораторным работам);
- ознакомиться с оборудованием и материалами, используемыми на лабораторной работе (при использовании специализированного оборудования или программного обеспечения необходимо изучить порядок и правила его использования).

Методические указания при выполнении лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы студенты должны строго соблюдать, установленные требования безопасности.

При выполнении лабораторной работы студентам рекомендуется:

- уяснить цель, выполняемых заданий и способы их решения;
- задания, указанные в лабораторной работе выполнять в той последовательности, в которой они указаны в лабораторном практикуме;
- при выполнении практического задания и изучении теоретического материала использовать помощь преподавателя;
- оформить отчет по лабораторной работе;
- ответить на контрольные вопросы.

Методические указания при подготовке к защите лабораторной работы

При подготовке к защите лабораторной работы студентам рекомендуется:

- подготовить отчет по лабораторной работе;
- подготовить обоснование, сделанных выводов;
- закрепить знания теоретического материала по теме лабораторной работы (рекомендуется использовать контрольные вопросы);
- знать порядок проведения расчетов (проводимых исследований);
- уметь показать и пояснить порядок исследований при использовании специализированного оборудования или программного обеспечения.

Защита лабораторной работы осуществляется путем собеседования студента с преподавателем. При собеседовании студент представляет на проверку отчет по лабораторной работе. Собеседование со студентом, претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам и практическим заданиям повышенного уровня обучения. Собеседование со студентом, не претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам и практическим заданиям базового уровня обучения.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ЛИТЕРАТУРЫ

Базовый уровень:

Тема 1. Информационно-телекоммуникационная инфраструктура как сложная физическая система.

1) Физический уровень инфокоммуникационных систем и основы процесса передачи информации.

2) Физические основы взаимодействия инфокоммуникационных систем и внешних физических полей.

Тема 2. Физические поля и среды передачи.

3) Характеристика физических полей как носителей информации.

Тема 3. Элементы теории поля.

4) Введение в теорию физического поля.

5) Характеристики физического поля: поток.

6) Характеристики физического поля: дивергенция.

Тема 4. Волновые процессы.

7) Общая характеристика волн. Распределение волн по частоте.

8) Гармонические волны, их параметры.

Тема 5. Электрические поля.

9) Основы электрического взаимодействия.

10) Виды электрических полей, их сравнительная характеристика.

Тема 6. Магнитные поля и магнитные носители информации.

11) Основы магнитного взаимодействия.

12) Магнитное поле, его характеристики.

13) Магнитные носители информации.

Тема 7. Явление электромагнитной индукции, электромагнитные поля и волны.

14) Электромагнитная индукция.

15) Вихревое электрическое поле, ток смещения.

Тема 8. Излучение, распространение и регистрация электромагнитных полей (волн).

16) Поля элементарных электромагнитных излучателей. Ближняя и дальняя зоны.

Тема 9. Экранирование полей электромагнитной природы.

17) Основы экранирования полей.

18) Экранирование электрических полей.

19) Экранирование магнитных полей.

Тема 10. Физические процессы в простейших электрических цепях радиоэлектронных средств.

20) Понятия электрических цепей и радиоэлектронных средств.

21) Схемы замещения физических процессов в электрических цепях.

22) Особенности электрических цепей переменного тока.

Тема 11. Физические процессы в колебательных контурах. Явление резонанса.

23) Резонанс напряжений в последовательном контуре.

Тема 12. Паразитные процессы в электрических цепях радиоэлектронных средств.

24) Причины возникновения паразитных связей.

25) Паразитная емкостная связь.

26) Паразитная индуктивная связь.

Тема 13. Переходные процессы в линейных электрических цепях.

27) Общие сведения о переходных процессах.

28) Анализ переходных процессов в RL цепях.

29) Анализ переходных процессов RC цепях.

Тема 14. Физические процессы в распределенных цепях.

30) Основные понятия теории длинных линий. Дифференциальные (телеграфные) уравнения длинной линии.

31) Физический смысл решений телеграфных уравнений.

Тема 15. Основы генерации электромагнитных колебаний.

32) Свободные колебания в идеальном колебательном контуре.

33) Сохранение энергии при гармонических колебаниях.

34) Затухание свободных колебаний в реальном колебательном контуре.

35) Вынужденные колебания в колебательном контуре.

Тема 16. Процессы модуляции и демодуляции.

36) Основы модуляции. Временное и частотное представление сигналов.

37) Амплитудно-модулированные колебания.

38) Основы демодуляции.

Тема 17. Частотная и пространственная селекции.

39) Виды селекции сигналов.

40) Частотная селекция.

Повышенный уровень:

Тема 1. Информационно-телекоммуникационная инфраструктура как сложная физическая система.

41) Представление информации на физическом уровне.

Тема 2. Физические поля и среды передачи.

42) Среда передачи.

Тема 3. Элементы теории поля.

43) Характеристики физического поля: циркуляция, ротор.

44) Характеристики физического поля: градиент.

Тема 4. Волновые процессы.

45) Уравнение плоской бегущей волны. Волновое уравнение.

46) Волновые явления.

Тема 5. Электрические поля.

47) Электростатическое поле, его характеристики и свойства.

48) Действие электрического поля на вещества. Электрическое поле в проводнике.

Тема 6. Магнитные поля и магнитные носители информации.

49) Проявление магнитного поля. Силы Ампера и Лоренца.

50) Свойства магнитного поля.

Тема 7. Явление электромагнитной индукции, электромагнитные поля и волны.

51) Уравнения Максвелла, их физический смысл.

52) Понятие электромагнитной волны, ее характеристики и свойства.

Тема 8. Излучение, распространение и регистрация электромагнитных полей (волн).

53) Перенос энергии электромагнитными волнами. Распространение радиоволн.

54) Регистрация электромагнитных полей.

Тема 9. Экранирование полей электромагнитной природы.

55) Электромагнитное экранирование.

Тема 10. Физические процессы в простейших электрических цепях радиоэлектронных средств.

56) Электромагнитные процессы в цепи идеальной индуктивности и в цепи идеальной емкости.

Тема 11. Физические процессы в колебательных контурах. Явление резонанса.

57) Резонанс токов в параллельном контуре.

Тема 12. Паразитные процессы в электрических цепях радиоэлектронных средств.

58) Паразитная гальваническая связь.

Тема 13. Переходные процессы в линейных электрических цепях.

59) Анализ переходных процессов в колебательном контуре.

Тема 14. Физические процессы в распределенных цепях.

60) Волновые процессы в линии с распределенными параметрами.

61) Длинные линии в качестве колебательных систем.

Тема 15. Основы генерации электромагнитных колебаний.

62) Устройства генерации синусоидальных колебаний.

63) Генерация электромагнитных волн.

Тема 16. Процессы модуляции и демодуляции.

64) Частотно-модулированные колебания.

Тема 17. Частотная и пространственная селекции.

65) Основы пространственной селекции.

Критерии оценивания компетенций:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показана совокупность осознанных знаний по теме дисциплины, доказательно раскрыты основные положения вопроса; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий. Ответ изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены недочеты в определении понятий, исправленные студентом самостоятельно в процессе ответа. Ситуационная задача по теме решена правильно.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показано умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи. Ответ четко структурирован, логичен, изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены 2-3 неточности или незначительные ошибки, исправленные студентом с помощью преподавателя. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более одной ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент дал недостаточно полный и недостаточно развернутый ответ. Логика и последовательность изложения имеют нарушения. Допущены ошибки в раскрытии понятий, употреблении терминов. Студент не способен самостоятельно выделить существенные и несущественные признаки и причинно-следственные связи. В ответе отсутствуют выводы. Умение раскрыть значение обобщенных знаний не показано. Речевое оформление требует поправок, коррекции. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более двух ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если ответ представляет собой разрозненные знания с существенными ошибками по вопросу. Присутствуют фрагментарность, нелогичность изложения. Студент не осознает связь обсуждаемого вопроса с другими вопросами темы. Отсутствуют выводы, конкретизация и доказательность изложения. Речь неграмотная, терминология не используется. Дополнительные и уточняющие вопросы преподавателя не приводят к коррекции ответа студента, или ответ на вопрос полностью отсутствует или студент отказался от ответа. Ситуационная задача по теме решена неправильно.

Описание шкалы оценивания

Оценка за ответы на вопросы в ходе собеседования определяется в соответствии с таблицей.

Оценка	Оценка за теоретический вопрос базового уровня	Оценка за теоретический вопрос повышенного уровня	Примечание
отлично	Отлично (хорошо)	Отлично	Оценка хорошо допускается только по вопросу базового уровня
хорошо	Хорошо (удовлетворительно)	Хорошо	Оценка удовлетворительно допускается только по вопросу базового уровня
удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	
неудовлетворительно	По одному или двум вопросам получена оценка неудовлетворительно		

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя собеседование по двум теоретическим вопросам из числа перечисленных. Один вопрос относится к базовому уровню, а второй – к повышенному. В ходе собеседования студент имеет право пользоваться собственным конспектом.

Предлагаемые студенту вопросы позволяют проверить общепрофессиональные компетенции ОПК-1, ОПК-2. Принципиальные отличия заданий базового уровня от повышенного заключаются в сложности вопросов по уровню обученности «понимание».

Для подготовки к данному оценочному мероприятию необходимо 9 часов семестре (примерно 0.5 час на каждую тему). Студент должен подготовить письменные ответы на перечисленные теоретические вопросы в виде конспекта учебного материала и на их основании подготовиться к указанным в методических материалах вопросам для обсуждения.

При проверке задания, оцениваются активное участие в работе; уверенное владение материалом; умение четко и логично излагать свои мысли; умение творчески подходить к решению основных вопросов темы; самостоятельность мышления, полное соответствие конспекта установленным требованиям; самостоятельная устная речь, полностью раскрывающая суть проблемы проблематики собеседования.

Оценочный лист

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Вид работы						Итог
		Работа с дополнительными источниками информации	Ответы на промежуточные вопросы	Логика и научность изложения	Формулирование выводов и доказательств	Выступление с результатами работы	Участие в дискуссии, умение вести диалог	
1								
2								
...								

4. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕСТЫ ДЛЯ САМОТЕСТИРОВАНИЯ, ПОДГОТОВКИ К ТЕСТИРОВАНИЮ

Тестовые задания сформированы в виде двух тестов в программе Iren по 100 заданий. Всего 200 тестовых заданий разного уровня: на выбор ответа; на ввод ответа; на соответствие; на классификацию.

Примеры тестовых заданий базового уровня:

а) тестовое задание на выбор ответа:

Градиент – это

- ☐ вектор по величине (модулю) равный скорости роста некоторой физической величины поля в направлении указанном вектором
- ☐ вектор, своим направлением указывающий направление наискорейшего возрастания некоторой физической величины поля
- ☐ скаляр, своим направлением указывающий направление наискорейшего изменения некоторой физической величины поля
- ☐ вектор, длина и направление которого в каждой точке пространства, характеризует направление вращения некоторой физической величины поля
- ☐ скаляр по величине (модулю) равный скорости изменения некоторой физической величины поля в направлении указанном скаляром

Скорость распространения гармонической волны в среде равна

- ☐ произведению длины волны и частоты колебания
- ☐ отношению длины волны к частоте колебания
- ☐ отношению периода колебания к длине волны
- ☐ произведению длины волны и периода колебания

б) тестовое задание на простое соответствие:

Установить соответствие между уравнением и его видом

Уравнение колебания частицы		$\phi = \omega \cdot \left(t - \frac{x}{V} \right)$
Уравнение фазы волны		$y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$
Общее уравнение волнового движения		$y(x, t) = y_0 \cdot \sin \left(\omega \cdot t \pm \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} \right)$
Уравнение плоской обратной бегущей волны		$y(x, t) = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + k \cdot x)$
Уравнение сферической прямой бегущей волны		$y(r, t) = \frac{y_0}{r} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot r)$

в) тестовое задание на ввод простого ответа:

Электрическое поле проявляется в том, что на любой заряд, помещенный в любую точку этого поля, будет действовать ###

Ответ:

Примеры тестовых заданий повышенного уровня:

а) тестовое задание на сложное соответствие:

Установить соответствие уравнением Максвелла и его математическим выражением

первое уравнение Максвелла	$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
второе уравнение Максвелла	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$
третье уравнение Максвелла	$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$
четвертое уравнение Максвелла	$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$
	$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$

б) тестовое задание на ввод ответа с расчетом ответа:

Электромагнитный экран обеспечивает десятикратное отражение и стократное поглощение электромагнитной волны. В этом случае полное экранирование в децибельном исчислении равно ### дБ

Ответ:

в) тестовое задание на классификацию (соответствие):

Провести классификацию формул и формулировок потоков вектора напряженности электрического поля

Поток вектора напряженности электрического поля через малую площадку	$\Phi_E = \int_S (\vec{E} \cdot d\vec{n}) dS$
	скалярное произведение векторов напряженности $\vec{E}$ поля и нормали $\vec{n}$ к поверхности dS, умноженное на площадь поверхности dS
Поток вектора напряженности электрического поля через произвольную поверхность	$\Phi_E = E_n \cdot S$
	алгебраическая сумма электрических зарядов, охватываемых этой поверхностью, деленной на электрическую постоянную
Поток вектора напряженности однородного электрического поля через плоскую поверхность	произведение проекции вектора напряженности поля на нормаль к поверхности и площади поверхности
Полный поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую объемную поверхность произвольной формы в вакууме	$d\Phi_E = E \cdot dS \cdot \cos \alpha$
	$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \sum_i q_i$
	интеграл по всей поверхности от скалярного произведения векторов напряженности $\vec{E}$ поля и нормали $\vec{n}$ к этой поверхности

Установить верную последовательность вывода волнового уравнения

1		Определить частную производную колебания частицы по расстоянию
2		Составить линейное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных
3		Определить вторую частную производную колебания частицы по расстоянию
4		Определить вторую частную производную колебания частицы по времени
5		Оценить размерности вторых производных и определить величину, на которую они различаются
6		Определить частную производную колебания частицы по времени

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя компьютерное тестирование с помощью тестовой программы «Iren». Данная программа по случайному закону выбирает из общего перечня заданий, указанное преподавателем число заданий по каждой теме дисциплины. Как правило один тест содержит 15-20 тестовых заданий. Для ответа на одно задание предоставляется 1 – 2 минуты.

К тестовым вопросам базового уровня относятся вопросы с выбором ответа, вопросы с вводом ответа и несложные вопросы на установление соответствия. К тестовым вопросам повышенного уровня относятся сложные вопросы на установление соответствия, задания с расчетом и вводом ответа, вопросы на классификацию и упорядочивание действий (операций).

Предлагаемые студенту вопросы позволяют проверить общепрофессиональные компетенции ОПК-1, ОПК-2.

Для подготовки к данному оценочному мероприятию необходимо 9 часов в семестре (4,5 часа на каждый тест).

Студент должен подготовиться к компьютерному тестированию путем освоения тестов и проведения самотестирования. Самотестирование производится с помощью ехе-файлов с тренировочными тестовыми заданиями, выдаваемыми студентам в начале семестра обучения.

Оценочный лист

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Количество тестовых заданий	Количество правильных ответов	Набрано баллов	Итого оценка
1					
2					
...					

5. КОМПЛЕКТ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ РЕДАКТОРОВ

Базовый уровень

Лабораторная работа 1. Моделирование и исследование простых аналоговых и цифровых сигналов.

- 1) Смоделировать в программе «Mathcad» гармонический сигнал и провести исследование его характеристик.
- 2) Провести в программе «Mathcad» исследование операций преобразования гармонического сигнала, имеющих характер дифференцирования и интегрирования.
- 3) Смоделировать в программе «Mathcad» последовательность прямоугольных импульсов из гармонических составляющих.
- 4) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование последовательности прямоугольных импульсов, сформированных из гармонических составляющих.
- 5) Провести в программе «Electronics Workbench» моделирование и исследование кодирующего устройства, представляющего данные в цифровой код NRZ для передачи по каналу связи.

Лабораторная работа 2. Моделирование и исследование процесса распространения простых сигналов в физической среде.

- 6) Провести исследование в программах «Mathcad» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RC-цепи.
- 7) Провести исследование в программах «Mathcad» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RL –цепи.

Лабораторная работа 3. Моделирование и исследование характеристик физических полей, процессов их преобразования.

- 8) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в скалярном виде.
- 9) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в векторном виде.
- 10) Смоделировать в системе «Mathcad» скалярное физическое поле и преобразовать его в векторное поле градиента.

Лабораторная работа 4. Моделирование и исследование свойств и характеристик волновых процессов.

- 11) Смоделировать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» гармоническую волну и измерить ее характеристики.
- 12) Смоделировать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» затухающий гармонический волновой процесс и исследовать его характеристики.
- 13) Смоделировать и исследовать в программах «Electronics Workbench» и «MathCAD» явление интерференции двух волн.
- 14) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» волновой пакет и определить его характеристики.

Лабораторная работа 5. Моделирование и исследование электрических полей.

- 15) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского конденсатора.
- 16) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.

Лабораторная работа 6. Моделирование и исследование магнитных полей и явления электромагнитной индукции.

- 17) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в магнитном поле.
- 18) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» магнитное поле от дискретного набора постоянных электрических токов.

Лабораторная работа 7. Моделирование и исследование электромагнитных волн.

19) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» параметры плоской электромагнитной волны.

20) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» пространственно-временное распределение векторов напряженностей плоской электромагнитной волны.

Лабораторная работа 8. Моделирование и исследование процесса экранирования электромагнитных полей

21) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.

22) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.

Лабораторная работа 9. Моделирование и исследование электрических цепей переменного тока.

23) Рассчитать в системе «Mathcad» электрический ток и распределение напряжений в неразветвленной RL- цепи.

24) Рассчитать в системе «Mathcad» электрический ток и распределение напряжений в неразветвленной RC-цепи.

25) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» неразветвленную RL- цепь.

26) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» неразветвленную RC-цепь.

Лабораторная работа 10. Моделирование и исследование явления резонанса в электрических цепях

27) Рассчитать в системе «Mathcad» электрический ток и распределение напряжений в последовательном колебательном контуре (неразветвленной RLC цепи).

28) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» последовательный колебательный контур (неразветвленную RLC цепь).

Лабораторная работа 11. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних паразитных связей.

29) Смоделировать в системе «Mathcad» внешнюю емкостную параллельную паразитную связь между двумя каналами.

30) Смоделировать в системе «Mathcad» внешнюю резистивную параллельную паразитную связь между двумя каналами.

31) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

32) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

Лабораторная работа 12. Моделирование и исследование переходных процессов в электрических цепях первого и второго порядка.

33) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» переходные процессы в RL-цепи при включении и отключении источника постоянного напряжения.

34) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» переходные процессы в RC-цепи при включении и отключении источника постоянного напряжения.

35) Смоделировать и провести исследования в программе «Electronics Workbench» переходных процессов в RC-цепи при включении на источник переменного напряжения.

36) Смоделировать и провести исследования в программе «Electronics Workbench» переходных процессов в RL-цепи при включении на источник переменного напряжения.

Лабораторная работа 13. Моделирование и исследование процесса распространения тока через электрические цепи с распределенными параметрами.

37) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.

38) Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.

Лабораторная работа 14. Моделирование и исследование принципов генерации электрических колебаний.

39) Смоделировать и исследовать в программе «Mathcad» свободные и затухающие колебания в колебательном контуре.

40) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» генераторы переменного и импульсного напряжений.

Лабораторная работа 15. Моделирование и исследование процессов модуляции и демодуляции.

41) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» амплитудные и частотные модуляторы.

42) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принципы амплитудной модуляции на полупроводниковом диоде.

43) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» амплитудный манипулятор.

44) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» частотный манипулятор.

Лабораторная работа 16. Моделирование и исследование процесса частотной фильтрации сигналов.

45) Смоделировать и исследовать в программе «Mathcad» пассивный фильтр низких частот.

46) Смоделировать и исследовать в программе «Mathcad» пассивный фильтр высоких частот.

47) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» пассивный фильтр низких частот.

48) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» пассивный фильтр высоких частот.

Повышенный уровень

Лабораторная работа 1. Моделирование и исследование простых аналоговых и цифровых сигналов.

49) Смоделировать в программе «Mathcad» многотональный сигнал и провести исследование его характеристик и операций преобразования.

50) Провести в программе «Electronics Workbench» исследование амплитудно-частотных и фазово-частотных спектров последовательности прямоугольных импульсов.

Лабораторная работа 2. Моделирование и исследование процесса распространения простых сигналов в физической среде.

51) Провести исследование в программах «Electronics Workbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RC-цепи.

52) Провести исследование в программах «Electronics Workbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RL –цепи.

Лабораторная работа 3. Моделирование и исследование характеристик физических полей, процессов их преобразования.

53) Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в скалярное поле дивергенции.

54) Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в векторное поле ротора.

Лабораторная работа 4. Моделирование и исследование свойств и характеристик волновых процессов.

55) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» процесс дисперсии волны.

56) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» бегущие и стоячие волны в длинной линии.

Лабораторная работа 5. Моделирование и исследование электрических полей.

57) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле заряженных тонких проводников.

Лабораторная работа 6. Моделирование и исследование магнитных полей и явления электромагнитной индукции.

58) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.

Лабораторная работа 7. Моделирование и исследование электромагнитных волн.

59) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственно-временного распределения векторов напряженностей сферических и цилиндрических электромагнитных волн.

Лабораторная работа 8. Моделирование и исследование процесса экранирования электромагнитных полей

60) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.

Лабораторная работа 9. Моделирование и исследование электрических цепей переменного тока.

61) Рассчитать в системе «Mathcad» электрический ток и распределение напряжений в разветвленной RL- цепи.

62) Рассчитать в системе «Mathcad» электрический ток и распределение напряжений в разветвленной RC-цепи.

63) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» разветвленную RL- цепь.

64) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» разветвленную RC-цепь.

Лабораторная работа 10. Моделирование и исследование явления резонанса в электрических цепях

65) Рассчитать в системе «Mathcad» электрический ток и распределение напряжений в параллельном колебательном контуре (разветвленной RLC цепи).

66) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» параллельный колебательный контур (разветвленную RLC цепь).

Лабораторная работа 11. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних паразитных связей.

67) Смоделировать в системе «Mathcad» последовательную паразитную связь через паразитную взаимную индуктивность между двумя каналами.

68) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индуктивность между двумя каналами.

Лабораторная работа 12. Моделирование и исследование переходных процессов в электрических цепях первого и второго порядка.

69) Смоделировать в системе «Mathcad» переходные процессы в RL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

70) Смоделировать в системе «Mathcad» переходные процессы в RL-цепи при коротком замыкании источника постоянного напряжения.

71) Смоделировать в системе «Mathcad» переходные процессы в RC-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

72) Смоделировать в системе «Mathcad» переходные процессы в RC-цепи при коротком замыкании источника постоянного напряжения.

73) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» апериодический процесс в RCL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

74) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» колебательный процесс в RCL-цепи при включении на источник постоянного напряжения.

Лабораторная работа 13. Моделирование и исследование процесса распространения тока через электрические цепи с распределенными параметрами.

75) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.

Лабораторная работа 14. Моделирование и исследование принципов генерации электрических колебаний.

76) Смоделировать и исследовать в программе «Mathcad» вынужденные колебания в генераторе.

Лабораторная работа 15. Моделирование и исследование процессов модуляции и демодуляции.

77) Смоделировать и исследовать в «Electronics Workbench» амплитудный детектор.

78) Смоделировать и исследовать в программе «Mathcad» частотный детектор.

Лабораторная работа 16. Моделирование и исследование процесса частотной фильтрации сигналов.

79) Смоделировать и исследовать в «Electronics Workbench» пассивный полосно-пропускающий фильтр.

80) Смоделировать и исследовать в «Electronics Workbench» пассивный полосно-заграждающий фильтр.

Критерии оценивания:

Критерии оценивания компетенций:

Оценка «отлично» выставляется, если студент продемонстрировал высокое умение применять полученные знания на практике через выполнение конкретного задания повышенного уровня, свободно без затруднений справился с поставленной задачей, показав владение разносторонними приемами и навыками ее выполнения, не допустил ошибок и неточностей.

Оценка «хорошо» выставляется, если студент продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания повышенного уровня, справился с поставленной задачей, показав владение необходимыми приемами и навыками ее выполнения, при этом допустил не более одной ошибки, исправленной после указания преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если студент продемонстрировал посредственное умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания повышенного уровня, с трудом справился с поставленной задачей, при этом допустил не более двух ошибок, исправленных после указания преподавателя, либо успешно выполнил задание базового уровня.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если студент не продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания базового уровня, не справился с поставленной задачей или допустил при ее выполнении серьезные ошибки.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя:

— представление оформленного отчета по лабораторной работе с выполненными разноуровневыми заданиями;

— защиту путем выполнения указанного преподавателем разноуровневого задания, причем уровень выполняемого задания определяется студентом самостоятельно.

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить общепрофессиональные компетенции ОПК-1, ОПК-2.

Для подготовки к данному оценочному мероприятию студенту отводится в семестре 9 часов в рамках его самостоятельной работы.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования отчетом по лабораторной работе.

Оценочный лист

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Вид работы						Итог
		Владение методикой выполнения задания	Правильность схемотехнического моделирования	Работоспособность модели	Точность измерений и правильность расчетов параметров и характеристик	Правильность оформления схем, графиков характеристик	Формулирование выводов, их соответствие теории	
1								
2								
...								

8. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

Вопросы для проверки уровня обученности

Базовый уровень

- 1) Физический уровень инфокоммуникационных систем и основы процесса передачи информации.
- 2) Физические основы взаимодействия инфокоммуникационных систем и внешних физических полей.
- 3) Характеристика физических полей как носителей информации.
- 4) Введение в теорию физического поля.
- 5) Характеристики физического поля: поток.
- 6) Характеристики физического поля: дивергенция.
- 7) Общая характеристика волн. Распределение волн по частоте.
- 8) Гармонические волны, их параметры.
- 9) Основы электрического взаимодействия.
- 10) Виды электрических полей, их сравнительная характеристика.
- 11) Основы магнитного взаимодействия.
- 12) Магнитное поле, его характеристики.
- 13) Магнитные носители информации.
- 14) Электромагнитная индукция.
- 15) Вихревое электрическое поле, ток смещения.
- 16) Поля элементарных электромагнитных излучателей. Ближняя и дальняя зоны.
- 17) Основы экранирования полей.
- 18) Экранирование электрических полей.
- 19) Экранирование магнитных полей.
- 20) Понятия электрических цепей и радиоэлектронных средств.
- 21) Схемы замещения физических процессов в электрических цепях.
- 22) Особенности электрических цепей переменного тока.
- 23) Резонанс напряжений в последовательном контуре.
- 24) Причины возникновения паразитных связей.
- 25) Паразитная емкостная связь.
- 26) Паразитная индуктивная связь.
- 27) Общие сведения о переходных процессах.
- 28) Анализ переходных процессов в RL цепях.
- 29) Анализ переходных процессов RC цепях.
- 30) Основные понятия теории длинных линий. Дифференциальные (телеграфные) уравнения длинной линии.
- 31) Физический смысл решений телеграфных уравнений.
- 32) Свободные колебания в идеальном колебательном контуре. Сохранение энергии при гармонических колебаниях.
- 33) Затухание свободных колебаний в реальном колебательном контуре.
- 34) Вынужденные колебания в колебательном контуре.
- 35) Основы модуляции. Временное и частотное представление сигналов.
- 36) Амплитудно-модулированные колебания.
- 37) Основы демодуляции.

Повышенный уровень

- 38) Представление информации на физическом уровне.
- 39) Среды передачи.
- 40) Характеристики физического поля: циркуляция, ротор.
- 41) Характеристики физического поля: градиент.
- 42) Уравнение плоской бегущей волны. Волновое уравнение.
- 43) Волновые явления.
- 44) Электростатическое поле, его характеристики и свойства.

- 45) Действие электрического поля на вещества. Электрическое поле в проводнике.
- 46) Проявление магнитного поля. Силы Ампера и Лоренца.
- 47) Свойства магнитного поля.
- 48) Уравнения Максвелла, их физический смысл.
- 49) Понятие электромагнитной волны, ее характеристики и свойства.
- 50) Перенос энергии электромагнитными волнами. Распространение радиоволн.
- 51) Регистрация электромагнитных полей.
- 52) Электромагнитное экранирование.
- 53) Электромагнитные процессы в цепи идеальной индуктивности и в цепи идеальной емкости.

- 54) Резонанс токов в параллельном контуре.
- 55) Паразитная гальваническая связь.
- 56) Анализ переходных процессов в колебательном контуре.
- 57) Волновые процессы в линии с распределенными параметрами.
- 58) Длинные линии в качестве колебательных систем.
- 59) Устройства генерации синусоидальных колебаний.
- 60) Генерация электромагнитных волн.
- 61) Частотно-модулированные колебания.
- 62) Основы частотной фильтрации (селекции).

Практические задания для проверки уровня обученности

- 1) Смоделировать в программе «Mathcad» гармонический сигнал и провести исследование его характеристик.
- 2) Провести в программе «Mathcad» исследование операций преобразования гармонического сигнала, имеющих характер дифференцирования и интегрирования.
- 3) Смоделировать в программе «Mathcad» последовательность прямоугольных импульсов из гармонических составляющих.
- 4) Смоделировать в программе «ElectronicsWorkbench» и провести исследование последовательности прямоугольных импульсов, сформированных из гармонических составляющих.
- 5) Провести в программе «ElectronicsWorkbench» моделирование и исследование кодирующего устройства, представляющего данные в цифровой код NRZ для передачи по каналу связи.
- 6) Провести исследование в программах «ElectronicsWorkbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RC-цепи.
- 7) Провести исследование в программах «ElectronicsWorkbench» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RL –цепи.
- 8) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в скалярном виде.
- 9) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» статическое физическое поле, образованное системой независимых источников, в векторном виде.
- 10) Смоделировать в системе «Mathcad» скалярное физическое поле и преобразовать его в векторное поле градиента.
- 11) Смоделировать в программах «ElectronicsWorkbench» и «MathCAD» затухающий гармонический волновой процесс и исследовать его характеристики.
- 12) Смоделировать и исследовать в программах «ElectronicsWorkbench» и «MathCAD» явление интерференции двух волн.
- 13) Смоделировать в программе «ElectronicsWorkbench» волновой пакет и определить его характеристики.
- 14) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского конденсатора.

- 15) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.
- 16) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в магнитном поле.
- 17) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» магнитное поле от дискретного набора постоянных электрических токов.
- 18) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» параметры плоской электромагнитной волны.
- 19) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» пространственно-временное распределение векторов напряженностей плоской электромагнитной волны.
- 20) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.
- 21) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.
- 22) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» эквивалентную схему замещения внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами.
- 23) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» эквивалентную схему замещения внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами.
- 24) Смоделировать и исследовать пассивный фильтр низких частот.
- 25) Смоделировать и исследовать пассивный фильтр высоких частот.
- 26) Смоделировать в программе «Mathcad» многотональный сигнал и провести исследование его характеристик и операций преобразования.
- 27) Провести в программе «ElectronicsWorkbench» исследование амплитудно-частотных и фазочастотных спектров последовательности прямоугольных импульсов.
- 28) Провести исследование в программах «Mathcad» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RC-цепи.
- 29) Провести исследование в программах «Mathcad» процесса распространения простых сигналов через физическую среду, смоделированную в виде интегрирующей RL –цепи.
- 30) Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в скалярное поле дивергенции.
- 31) Смоделировать в системе «Mathcad» векторное физическое поле и преобразовать его в векторное поле ротора.
- 32) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» процесс дисперсии волны.
- 33) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» бегущие и стоячие волны в длинной линии.
- 34) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле заряженных тонких проводников.
- 35) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.
- 36) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственно-временного распределения векторов напряженностей сферических и цилиндрических электромагнитных волн.
- 37) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.
- 38) Смоделировать и исследовать в программе «ElectronicsWorkbench» эквивалентную схему замещения последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индуктивность между двумя каналами.
- 39) Смоделировать и исследовать пассивный полосовой пропускающий фильтр.
- 40) Смоделировать и исследовать пассивный полосовой заграждающий фильтр.

Критерии оценивания компетенций

(в соответствии с результатами освоения дисциплины)

Критерии оценки для проверки уровня теоретической обученности:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных категорий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не исказивших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более двух), существенно исказившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

Критерии оценки для проверки практической обученности:

оценка «отлично» выставляется, если он продемонстрировал высокое умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, свободно без затруднений справился с поставленной задачей, показав владение разносторонними приемами и навыками ее выполнения, не допустил ошибок и неточностей;

оценка «хорошо» выставляется, если он продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, справился с поставленной задачей, показав владение необходимыми приемами и навыками ее выполнения, при этом допустил не более одной ошибки;

оценка «удовлетворительно» выставляется, если он продемонстрировал посредственное умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, с трудом справился с поставленной задачей, при этом допустил не более двух ошибок;

оценка «неудовлетворительно» выставляется, если он не продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, не справился с поставленной задачей или допустил при ее решении три и более серьезные ошибки.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить общепрофессиональные компетенции ОПК-1 и ОПК-2. Для подготовки к экзамену студенту отводится 40.5 часов в рамках его самостоятельной работы.

Процедура проведения экзамена осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

Экзамен по дисциплине предусмотрен в устной форме по билетам. В экзаменационный билет включаются два теоретических вопроса и одно практическое задание

Для подготовки по билету отводится 30 минут - на теоретические вопросы, 10 минут на выполнение практического задания.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования рабочей программы дисциплины, собственным конспектом лекций не более 10 минут.

Практическое задание выполняется на ПЭВМ. При проверке практического задания, оцениваются: правильность моделирования, методики исследования, точность результатов измерения, оценка погрешности.