

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по выполнению практических работ  
по дисциплине «Физические основы защиты информации»  
для студентов направления подготовки  
10.03.01 Информационная безопасность  
Направленность (профиль)  
«Организация и технологии защиты информации  
(по отрасли или в сфере профессиональной деятельности)»

Ставрополь, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Раздел № 1 .....                                                             | 4   |
| ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....          |     |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....                                                 | 4   |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....                                                 | 34  |
| Раздел № 2.....                                                              | 42  |
| ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ .....                                 |     |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 .....                                                 | 42  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 .....                                                 | 63  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 .....                                                 | 82  |
| Раздел № 3.....                                                              | 98  |
| ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ..... | 98  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 .....                                                 | 98  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 .....                                                 | 121 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 .....                                                 | 131 |
| Раздел № 4.....                                                              | 147 |
| ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ .....                                               |     |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 – 16.....                                           | 147 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 – 16.....                                           | 159 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16-18.....                                             | 170 |
| Раздел № 5 .....                                                             | 178 |
| ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПОЛЯ                                               |     |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №18-20.....                                              | 178 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17 – 19.....                                           | 196 |
| Раздел № 6 .....                                                             | 178 |
| ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ОБЪЕКТОВ И ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ                        |     |
| 192                                                                          |     |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №20 -22.....                                             | 189 |

### 1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Целью изучения дисциплины «Физические основы защиты информации» является формирование набора профессиональных компетенций специалиста по направлению подготовки 10.03.01 – Информационная безопасность «Организация и технология защиты информации», способствующих углубленной подготовке к решению профессиональных задач в области защиты информации.

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

| Код, формулировка компетенции                                                                                   | Код, формулировка индикатора                                                                                                                                                                                              | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК-4 Способен применять необходимые физические законы и модели для решения задач профессиональной деятельности | ИД-2 ОПК-4 Применяет основные законы физики при решении задач профессиональной деятельности; способен проводить физический эксперимент и обрабатывать его результаты                                                      | полноценно использует необходимые физические законы для решения задач профессиональной деятельности;<br>-корректно использует необходимые модели для решения задач профессиональной деятельности;<br>-представляет последовательность шагов по использованию необходимых физических законов и моделей для решения задач профессиональной деятельности. |
|                                                                                                                 | ИД-3 ОПК-4 анализирует физическую сущность явлений и процессов, лежащих в основе функционирования микроэлектронной техники, применять основные физические законы и модели для решения задач профессиональной деятельности | - моделирует известные процессы, происходящие в электронных устройствах, для решения задач профессиональной деятельности                                                                                                                                                                                                                               |

## **РАЗДЕЛ № 1    ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Тема                    ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ КАК  
ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКА И  
УТЕЧКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ КАК ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКА И УТЕЧКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

**Время – 6 часов.**

#### **УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование электрических цепей с сосредоточенными параметрами.**
- 2. Исследование электрических цепей с сосредоточенными параметрами.**
- 3. Моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.**

### **СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

#### **ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Проблема технической защиты информации заключается в том, технические средства создания, обработки, хранения и передачи информации представляют собой совокупность радиотехнических цепей.

Радиотехнические цепи – это цепи, по которым распространяются и передаются электрические сигналы, т.е. это электрические цепи с высокочастотными токами большого диапазона частот. Следовательно, носителем информации в технических средствах создания, обработки, хранения и передачи информации является высокочастотный электрический ток или высокочастотная последовательность прямоугольных импульсов, которые при определенных условиях могут несанкционированно распространяться по непредусмотренным разработчиками электрическим цепям, что способствует созданию электрических каналов утечки информации.

Несанкционированная электрическая цепь возникает, если в пространстве создаются пути для распространения электрического тока. Условиями возникновения этих путей являются наличие рядом с ними проводников из материалов с высокой электропроводностью, окруженных хорошо изолирующей средой, либо электрических элементов, представляющих собой локальные

концентраторы электрических полей (конденсаторы) или магнитных полей (катушки индуктивности). Возникающие в первом случае электрические цепи, состоящие из проводящих длинных линий, представляют собой цепи с распределенными параметрами, поскольку их основные параметры (сопротивление и индуктивность проводников, а также емкость и проводимость между проводниками) распределены вдоль этих линий. Тогда как возникающие во втором случае электрические цепи, представляют собой цепи с сосредоточенными параметрами, поскольку их основные параметры сосредоточены в пределах входящих в них элементов (резисторов, катушек индуктивностей и конденсаторов) и от их места подключения в цепи, т.е. пространственных координат не зависят.

Таким образом, для обеспечения защиты информации от утечки по электрическим каналам необходимо владеть методикой анализа физических процессов, связанных с распространением высокочастотного тока или высокочастотная последовательность прямоугольных импульсов по электрическим цепям.

Целью данной лабораторной работы являются формирование у студентов умений моделировать и исследовать электрические цепи как физическую среду распространения тока и, следовательно, утечки электрических сигналов. Для достижения поставленной цели в лабораторной работе рассматриваются два учебных вопроса: моделирование и исследование электрических цепей с сосредоточенными параметрами; моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.

## **ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ**

### **1 – 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

#### **Краткие теоретические или справочно-информационные материалы**

Для упрощения анализа реальных электрических цепей принято абстрагироваться от физических процессов, протекающих в реальных элементах цепи. Для этого физические процессы приближенно заменять некоторой схематической моделью (схемой замещения), состоящей из совокупности идеализированных элементов, соединенных идеальными проводниками. Система уравнений, описывающих свойства такой модели, является математической моделью электрической цепи. Так, любую реальную пассивную линейную электрическую цепь с сосредоточенными параметрами можно представить в виде схемы замещения, состоящей из совокупности  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов.

*Простые электрические цепи, содержащие один реактивный элемент (конденсатор или индуктивность), описываются дифференциальными уравнениями первого порядка и поэтому называются электрическими цепями первого порядка. Электрические цепи второго порядка содержат два дуальных*

реактивных элемента – конденсатор и индуктивность. Математической моделью таких цепей служит дифференциальное уравнение второго порядка, поэтому порядок цепи так же равен двум.

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. Исходя из этого, последовательные цепи первого порядка подразделяются на интегрирующие и дифференцирующие цепи.

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

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

В основе действия интегрирующей цепи лежит накопление заряда на конденсаторе с ёмкостью  $C$  под действием приложенного тока (см. рис. 1, а) или накопление магнитного потока в катушке с индуктивностью  $L$  под действием приложенного напряжения (см. рис. 1, б), т.е.:

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

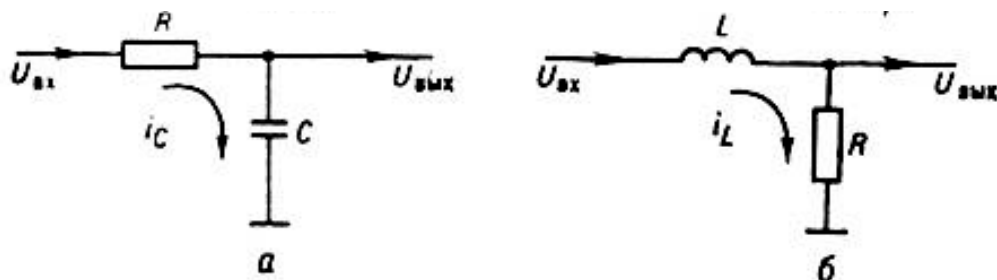


Рис. 1 – Интегрирующие цепи: а – RC цепь, б – RL цепь

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

$$U_{\text{вых}}(t) = U_c(t) = \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{\tau} \int U_{\text{вх}}(t) dt, \quad (2)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = U_R(t) = \frac{R}{L} \int U_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{\tau} \int U_{\text{вх}}(t) dt, \quad (3)$$

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  $[i = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R]$

поэтому интегрирование входного напряжения выполняется приближённо и тем точнее, чем меньше выходное напряжение по сравнению с входным. Последнее условие выполняется, если постоянная времени много больше интервала времени, по которому происходит интегрирование.

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

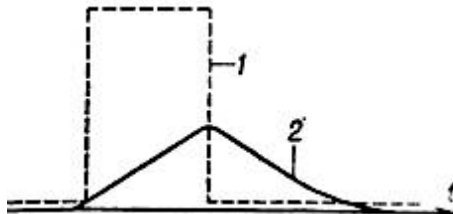


Рис. 2 – Выходное напряжение интегрирующей цепи (2) при входном воздействии в виде прямоугольного импульса (1)

На практике интегрирующие цепи применяются для преобразования импульсов, модулированных по длительности, в импульсы, модулированные по амплитуде, для удлинения импульсов, получения пилообразного напряжения, выделения низкочастотных составляющих сигнала и т.п., а также как интеграторы в аналоговых вычислительных устройствах.

**Дифференцирующая цепь** – электрическая цепь, в которой выходное напряжение или ток пропорциональны дифференциалу (производной) по времени от входного напряжения или тока, т.е. выходная реакция цепи  $U_{\text{вых}}(t)$  связана с входным воздействием  $U_{\text{вх}}(t)$  соотношением

$$U_{\text{вых}}(t) = \tau \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt},$$

где  $\tau$  – постоянная величина, имеющая размерность времени.

Простейшие дифференциальные цепи представлены на рис. 3.

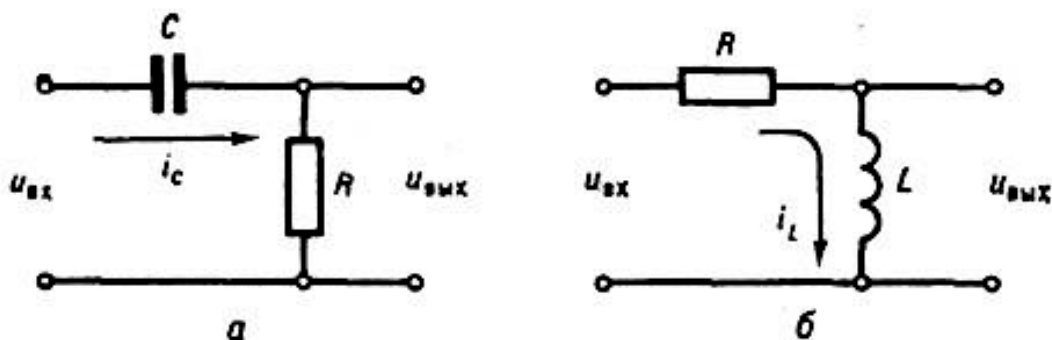


Рис. 3 – Дифференцирующие цепи: а – RC цепь, б – RL цепь

В дифференцирующей RC цепи, приведенной на рис. 1, а), ток  $i_C$  через ёмкость пропорционален производной приложенного к ней напряжения, т.е.

$$i_C = \frac{dU_C}{dt}. \quad (4)$$

Если параметры дифференцирующей цепи выбраны так, что  $U_C = U_{\text{вх}}$ , то

$$U_{\hat{u}\hat{o}}(t) \cong \tau \frac{dU_{\hat{a}\hat{o}}(t)}{dt} = RC \frac{dU_{\hat{a}\hat{o}}(t)}{dt} . \quad (5)$$

Условие  $U_C = U_{\text{вх}}$  выполняется, если на самой верхней частоте  $\omega_{\hat{a}}$  спектра входного сигнала  $R \ll 1/\omega_{\hat{a}}C$ .

Для дифференцирующей RL цепи, приведенной на рис. 1, б), при условии  $R \gg \omega_{\hat{a}}L$  имеем  $i_L \approx U_{\hat{a}\hat{o}}/R$ , тогда получим

$$U_{\hat{u}\hat{o}}(t) \cong L \frac{di_L(t)}{dt} = \tau \frac{dU_{\hat{a}\hat{o}}(t)}{dt} = \frac{L}{R} \frac{dU_{\hat{a}\hat{o}}(t)}{dt} . \quad (6)$$

Следовательно, при заданных параметрах цепи дифференцирование тем точнее, чем ниже частоты, на которых концентрируется энергия входного сигнала. Однако чем точнее дифференцирование, тем меньше коэффициент передачи цепи и, следовательно, уровень выходного сигнала. Это противоречие устраняется в активных цепях, где процесс дифференцирования сочетается с процессом усиления.

Временные диаграммы, иллюстрирующие прохождение импульса прямоугольной формы через дифференцирующую цепь, приведены на рис. 4. Данные диаграммы получены при условии, что постоянная времени цепи значительно меньше длительности импульса, источник входного напряжения характеризуется нулевым внутренним сопротивлением, а цепь – отсутствием паразитных ёмкостей. Поскольку наличие внутреннего сопротивления приводит к уменьшению амплитуды напряжения на входных клеммах и, следовательно, к уменьшению амплитуд выходных импульсов; наличие паразитных ёмкостей – к затягиванию процессов нарастания и спада выходных импульсов.

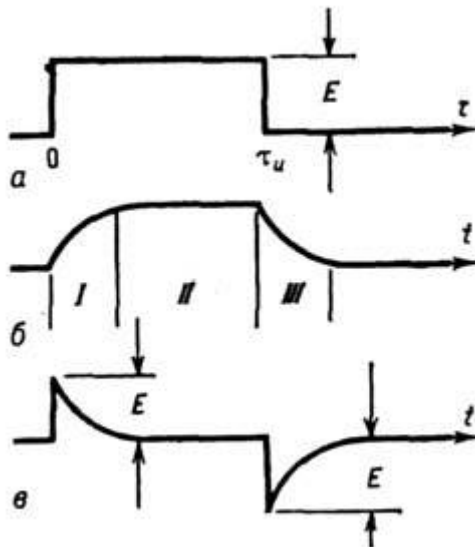


Рис. 4 – Прохождение импульса через дифференцирующую цепь RC:

- а) – входной импульс,  $U_{\text{вх}} = E$ ;
- б) – напряжение на ёмкости  $U_c(t)$ ;
- в) – выходное напряжение  $U_{\hat{u}\hat{o}}(t) = U_{\hat{a}\hat{o}} - U_C$ .

Итак, при прохождении через дифференцирующие цепи импульсных сигналов происходит уменьшение их длительности, отсюда понятие о этих цепях как об укорачивающих.

На практике дифференцирующие цепи применяют в импульсных и цифровых устройствах для укорачивания импульсов, а также как дифференциаторы в аналоговых вычислительных устройствах.

**Электрические цепи второго порядка называют RLC-цепями**, поскольку они помимо реактивных элементов – конденсатора и индуктивности, содержат резистор либо активное сопротивление соединительных проводников и катушка индуктивности.

RLC-цепи качественно отличаются от цепей первого порядка. В частности, в зависимости от соотношений между величинами элементов цепи переходные процессы в RLC-цепи носят аperiodический (как в цепях первого порядка) или колебательный характер. В частотной области RLC-цепь обладает резонансными свойствами и рассматривается как узкополосный фильтр.

В зависимости от того, каким способом в цепи соединены между собой индуктивность и конденсатор (последовательное или параллельное соединение), различают последовательный и параллельный колебательные контуры.

RLC цепи обладают резонансными свойствами.

### **Резонанс напряжений в последовательном контуре**

Перейдем теперь к рассмотрению процессов, происходящих в контуре, содержащем активное сопротивление, индуктивность и емкость (рис. 5, а). На концы цепи подано переменное напряжение  $U = U_m \cos \omega t$  (генератор внешнего напряжения включен в контур последовательно). В такой цепи будет течь переменный ток, параметры которого определяются величинами  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Внешнее напряжение должно быть равно сумме падений напряжений на отдельных элементах. Эту сумму найдем с помощью векторной диаграммы.

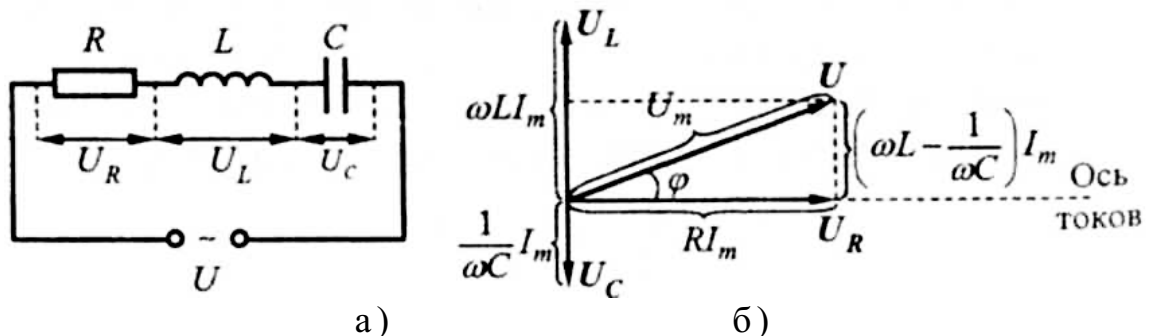


Рис. 5 – Цепь переменного тока, содержащая активное сопротивление, емкость и индуктивность, при последовательном подключении внешнего напряжения

Обозначим амплитуду тока через  $I_m$ . На активном сопротивлении  $R$  ток вызовет падение напряжения с амплитудой  $U_R = RI_m$ , причем фаза напряжения совпадает с фазой тока. На векторной диаграмме  $U_R$  нужно отложить вдоль оси токов (рис. 5, б). Падение напряжения на индуктивности с амплитудой  $U_L = \omega LI_m$  опережает ток по фазе  $\pi/2$  и на векторной диаграмме будет отложено в положительном направлении оси  $y$ . Падение напряжения на емкости будет иметь амплитуду  $U_C = I_m / (\omega C)$  и фазу, отстающую на  $\pi/2$  от фазы тока.

На векторной диаграмме вектор  $U_c$  будет отложен в отрицательном направлении оси  $y$ .

Падения напряжений  $U_R, U_L, U_C$  в сумме должны быть равны приложенному к цепи напряжению  $U$ . Поэтому, сложив векторы, изображающие  $U_R, U_L, U_C$  получим вектор длиной  $U_m$  (см. рис. 5, б). Из рисунка следует, что  $U_m^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$ , или

$$U_m^2 = R^2 I_m^2 + \left[ (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \right]^2, \quad (7)$$

откуда

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (8)$$

При этом сдвиг фаз между током и напряжением определяется условием

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R} \quad (9)$$

Поскольку ток отстает по фазе от напряжения, закон его изменения имеет вид

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (10)$$

Итак, если напряжение, поданное на цепь, содержащую последовательно включенные  $R, L$  и  $C$  (рис. 5), изменяется по закону  $U = U_m \cos \omega t$ , то в такой цепи течет переменный ток  $I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$ , где  $I_m$  и  $\varphi$  определяются формулами (8) и (9), соответственно. Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (11)$$

называется **полным сопротивлением (импедансом) цепи**, а величина  $(\omega L - 1/(\omega C))$  называется **реактивным сопротивлением**. При  $\omega L > 1/(\omega C)$  ток отстает по фазе от напряжения ( $\varphi > 0$ ), при  $\omega L < 1/(\omega C)$  - опережает его ( $\varphi < 0$ ).

Как следует из (8), амплитуда тока достигает максимума при таком значении частоты, когда обращается в нуль реактивное сопротивление:  $\omega L - 1/(\omega C) = 0$ , откуда  $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$ . Тогда сдвиг фаз между током и напряжением отсутствует, т.е. изменение тока  $I$  и напряжения  $U$  происходит синхронно. В этом случае полное сопротивление минимально:  $Z = Z_{\min} = R$ , амплитуда тока достигает максимального значения  $I_{m, \text{рез}} = U_m / R$ , а напряжения на емкости и индуктивности равны по величине ( $U_c = U_L$ ) и,

изменяясь в противофазе, взаимно компенсируются. При этом напряжение на активном сопротивлении максимально и равно  $U_m$ . *Это явление называется резонансом напряжений.* Резонансная частота в этом случае равна  $\omega_0$  и не зависит от затухания цепи.

Амплитуда напряжения на конденсаторе при таком резонансе равна

$$U_{c,pez} = \frac{I_{m,pez}}{\omega_i C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m = Q U_m \quad (12)$$

Итак, установлено, что при резонансе напряжений отношение напряжения на конденсаторе к амплитуде внешнего напряжения равно добротности контура  $Q$ . Вид резонансных кривых для тока приведен на рис. 6. Положение максимумов резонансных кривых для тока не зависит от затухания (сопротивления) цепи, причем как при малых, так и при больших частотах амплитуда тока  $I_m$  стремится к нулю.

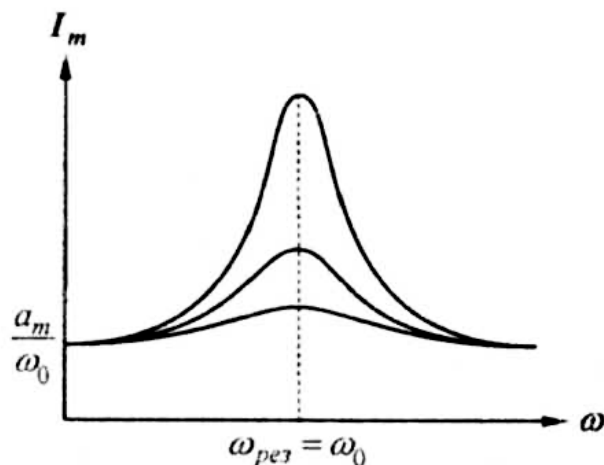


Рис. 6 – Резонансные кривые для амплитуды переменного тока

Так как добротность  $Q$  обычных колебательных контуров больше единицы, то напряжение, как на катушке индуктивности, так и на конденсаторе превышает напряжение, приложенное к цепи. Поэтому явление резонанса напряжений используется в технике для усиления колебания напряжения какой-либо определенной частоты.

Для сопоставления резонансных свойств различных контуров удобно пользоваться резонансными характеристиками в относительных единицах. Определим зависимость тока в контуре от частоты в относительном масштабе:

$$\begin{aligned} \frac{I_m(\omega)}{I_{m,pez}} &= \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{pez}} - \frac{\omega_{pez}}{\omega}\right)^2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{(\omega - \omega_{pez})(\omega + \omega_{pez})}{\omega \omega_{pez}}\right)^2}} \end{aligned} \quad (13)$$

Если рассматривать контур в качестве фильтрующего элемента, то имеет смысл анализировать поведение тока в нем при относительно небольших отклонениях частоты сигнала от резонансной частоты контура ( $\omega \approx \omega_{pez}$ ). С учетом этого можно принять:  $\omega + \omega_{pez} \approx 2\omega_{pez}$ . Если отклонение частоты сигнала от резонансной частоты контура обозначить через  $\Delta\omega = \omega - \omega_{pez}$ , то выражение (13) примет вид

$$\frac{I_m(\omega)}{I_{m,pez}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_{pez}}\right)^2}}. \quad (14)$$

Это соотношение является аналитическим описанием резонансной, или амплитудно-частотной, характеристики контура. Из него видно, что значительные токи в контуре возникают лишь при небольших отклонениях  $\Delta\omega$ , следовательно, контур обладает фильтрующими (избирательными) свойствами – способностью ослаблять сигналы, частоты которых отличаются от резонансной.

Мгновенное значение мощности, выделяемой в цепи переменного тока, равно

$$\begin{aligned} P(t) &= U(t)I(t) = U_m \cos\omega t \cdot I_m \cos(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} (\cos\varphi + \cos(2\omega t - \varphi)) \end{aligned} \quad (15)$$

При усреднении за период колебаний второе слагаемое в скобках пропадает, и мы получаем

$$P = \langle P(t) \rangle = \frac{U_m I_m}{2} \cos\varphi. \quad (16)$$

Используя (9) и рис. 9, б), можем записать  $\cos\varphi = R/Z$ , где  $Z$  – полное сопротивление цепи (11). С другой стороны, амплитуды тока и напряжения связаны соотношением (8):  $U_m = I_m Z$ . Тогда (16) можно представить в другом виде:

$$P = \frac{I_m^2 R}{2}, \text{ и } P = \frac{U_m^2}{2R}. \quad (17)$$

Для количественной оценки избирательности контура используют **полосу пропускания** – область частот, в которой мощность сигнала ослабляется не более, чем в два раза, что соответствует уменьшению тока или напряжения в  $\sqrt{2}$  раз (14).

Для случая ослабления мощности тока в два раза запишем:

$$\frac{I_m(\omega)}{I_{m,pez}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{2\Delta\omega}{\omega_{pez}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

Отсюда получаем:

$$Q = \frac{\omega_{pez}}{2\Delta\omega} \quad \text{или} \quad 2\Delta\omega = \frac{\omega_{pez}}{Q} \quad (19)$$

Таким образом, добротность контура определяет «остроту» резонансной кривой. Величина  $2\Delta\omega$  как раз и представляет ширину резонансной кривой на уровне половинной мощности (рис. 7).

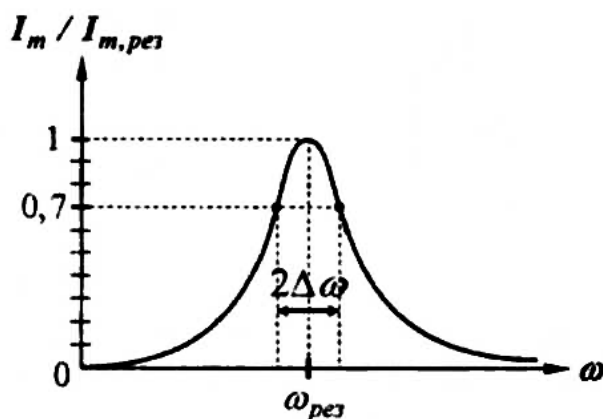


Рис. 7 – Полоса пропускания колебательного контура

Полуширина резонансной кривой оказывается численно равной показателю затухания колебаний в контуре:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{pez}}{2Q} = \frac{\omega_{pez}}{2\omega_{pez} L/R} = \frac{R}{2L} = \beta, \quad (20)$$

Электрический резонанс находит широкое применение в радиотехнике для выделения электромагнитных колебаний нужной частоты. На этом основана вся техника радиоприема. Для того чтобы радиоприемник принимал нужную радиостанцию, колебательный контур настраивают (обычно изменением емкости конденсатора) так, чтобы его собственная частота совпадала с частотой электромагнитных волн, излучаемых радиостанцией. Естественно, имеет смысл применение контуров с высокой добротностью (слабым затуханием). В противном случае сигнал при резонансе незначительно отличается от

напряжения и токов на других частотах, и избирательность контура оказывается недостаточной для надежного выделения полезного сигнала.

### Резонанс токов в параллельном контуре

Рассмотрим случай, когда генератор внешнего напряжения подключен к контуру параллельно. Пусть цепь состоит из двух параллельных ветвей, одна из которых содержит емкость  $C$ , а вторая – индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  (рис. 8, а).

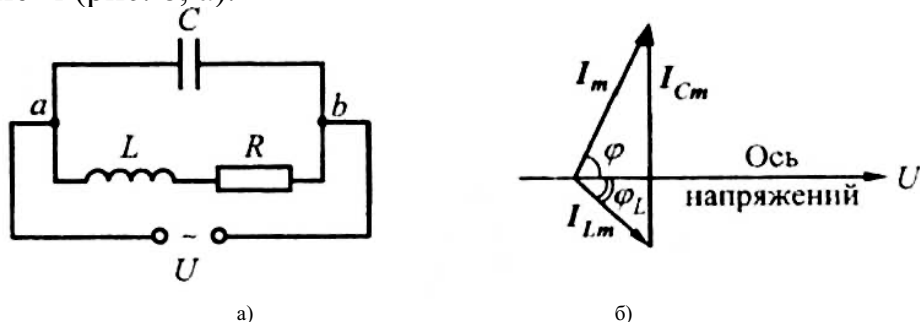


Рис. 8 – Цепь переменного тока, содержащая активное сопротивление, емкость и индуктивность, при параллельном подключении внешнего напряжения

Для обеих ветвей цепи напряжение между точками  $a$  и  $b$  будет общим, а силы тока в ветвях  $I_C$  и  $I_L$  различны. Согласно правилу Кирхгофа, полная сила тока  $I = I_C + I_L$ , поэтому задача сводится к сложению токов (рис. 8, б).

Изобразим колебания напряжения между точками  $a$  и  $b$  векторами, направленными вдоль линии  $U$  («ось напряжений», см. рис. 8, б). Тогда колебания тока в цепи, содержащей индуктивность и активное сопротивление, изображаются вектором  $I_{Lm}$ , длина которого равна

$$I_{Lm} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad (21)$$

а угол его наклона  $\varphi_L$  к оси напряжений находится из условия

$$\operatorname{tg} \varphi_L = \frac{\omega L}{R}, \quad (22)$$

В отсутствие конденсатора ток отстает по фазе от напряжения, что и отражено на рис. 8, б).

Колебания тока в другой ветви цепи, содержащей емкость  $C$ , изображены вектором  $I_{Cm}$ . При чисто емкостном сопротивлении этот ток опережает по фазе напряжение на  $\pi/2$ . Соответствующий вектор на рис. 8, б) повернут относительно оси напряжений на угол  $+\pi/2$ , а его длина (амплитуда тока) равна

$$I_{Cm} = U_m \omega C. \quad (23)$$

Колебания полного тока  $I$  определяются векторной суммой токов  $I_C$  и  $I_L$ , т.е. вектором  $I$ .

Если в цепи, изображенной на рис. 8, а), изменять параметры  $L$ ,  $C$ ,  $R$  и , то при некотором соотношении между этими величинами сдвиг фаз между

полным током и напряжением станет равным нулю и, следовательно, контур будет вести себя как чисто активное сопротивление (рис. 9). Этот частный случай называется **резонансом токов**. При резонансе полный ток становится минимальным. Следовательно, при резонансе токов сопротивление контура достигает наибольшего значения. В отличие от случая резонанса напряжений, оно не равно активному сопротивлению в цепи  $R$ , а зависит от величин  $L$  и  $C$ .



Рис. 9 – Резонанс токов

Найдем условие, при котором наступает резонанс токов. Из рис. 9 следует, что

$$I_{Cm} = I_{Lm} \sin \varphi_L, \quad (24)$$

где

$$\sin \varphi_L = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}. \quad (25)$$

Следовательно, можно записать

$$U_m \omega C = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = U_m \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (26)$$

откуда

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{1}{L\tilde{N}} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (27)$$

При малом затухании колебаний ( $R \ll \sqrt{L/\tilde{N}}$ ) резонансная частота  $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{L\tilde{N}} = \omega_0$ , т.е. в этом случае для резонанса токов (как и для резонанса напряжений) частота колебаний внешнего напряжения должна совпадать с частотой  $\omega_0$  собственных колебаний контура.

Можно показать, что полное сопротивление параллельного контура находится по формуле:

$$Z = \frac{L}{R\tilde{N}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{2\Delta\omega}{\omega_{\text{рез}}} \right)^2}}. \quad (28)$$

При  $\Delta\omega = 0$  сопротивление равно  $Q\sqrt{L/C}$ . Таким образом, как и в случае последовательного контура, сопротивление параллельного контура на резонансной частоте носит активный характер. Но в отличие от последовательного контура, в котором резонансное сопротивление очень мало и равно сопротивлению потерь

$R$ , в параллельном контуре оно велико, а если  $R=0$ , равно бесконечности. Найдем зависимость относительной величины напряжения на параллельном контуре от частоты (отношение напряжения на контуре в общем случае к напряжению при резонансе):

$$\frac{U_m(\omega)}{U_{m, \text{рез}}} = \frac{I_m Z}{I_m Z_{\text{рез}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{2\Delta\omega}{\omega_{\text{рез}}} \right)^2}} \quad (29)$$

Выражение (29) определяет резонансную характеристику параллельного контура. Параллельный контур, как и последовательный, обладает ярко выраженными свойствами частотной избирательности: при отклонении частоты колебаний питающего генератора от резонансной частоты напряжение на контуре резко падает. Отметим, что при резонансной частоте токи в ветвях параллельного контура оказываются в  $Q$  раз больше, чем ток, питающий контур. Поэтому резонанс в параллельном контуре называют резонансом токов.

Параллельный контур оказывает большое сопротивление переменному току с частотой, близкой к резонансной. По этой причине свойство резонанса токов используется в резонансных усилителях, позволяющих выделять одно определенное колебание из сигнала сложной формы.

Вид резонансных кривых в случае резонанса токов аналогичен виду резонансных кривых в случае резонанса напряжений. Полоса пропускания параллельного контура определяется так же, как и для последовательного контура.

Для улучшения избирательных свойств в качестве фильтрующего элемента часто используют не одиночный контур, а два контура, связанных между собой. Контуров называются связанными, если между ними существует обмен энергией. В простейших случаях связь может осуществляться за счет создания общего магнитного поля между катушками индуктивности или за счет включения между контурами емкости конденсатора. В первом случае связь называется индуктивной, во втором – емкостной.

## Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому 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 № | $E, В$ | $f, МГц$ | $R1, Ом$ | $C1, нФ$ | $L1, мкГ$ | $R1, Ом$ | $R2, Ом$ |
|-----------|--------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 0         | 1      | 1        | 8        | 20       | 1         | 2        | 2        |
| 1         | 1,1    | 1,1      | 5        | 21       | 0,9       | 1        | 1        |
| 2         | 1,2    | 1,2      | 6        | 22       | 0,8       | 2        | 2        |
| 3         | 1,3    | 1,3      | 7        | 23       | 0,7       | 3        | 1        |
| 4         | 1,4    | 1,4      | 8        | 24       | 0,6       | 4        | 2        |

| <i>Вариант №</i> | <i>E, В</i> | <i>f, МГц</i> | <i>R1, Ом</i> | <i>C1, нФ</i> | <i>L1, мкГ</i> | <i>R1, Ом</i> | <i>R2, Ом</i> |
|------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| 5                | 1,5         | 1,5           | 9             | 25            | 0,5            | 5             | 1             |
| 6                | 1,6         | 1,6           | 10            | 26            | 1              | 1             | 2             |
| 7                | 1,7         | 1,7           | 5             | 19            | 0,9            | 2             | 1             |
| 8                | 1,8         | 1,8           | 6             | 18            | 0,8            | 3             | 2             |
| 9                | 1,9         | 1,9           | 7             | 17            | 0,7            | 4             | 1             |
| 10               | 2,0         | 2,0           | 8             | 16            | 0,6            | 5             | 2             |
| 11               | 1,1         | 2,1           | 9             | 15            | 0,9            | 1             | 1             |
| 12               | 1,2         | 2,2           | 10            | 14            | 0,8            | 2             | 2             |
| 13               | 1,3         | 2,3           | 5             | 13            | 0,7            | 3             | 1             |
| 14               | 1,4         | 2,4           | 6             | 12            | 0,6            | 4             | 2             |
| 15               | 1,5         | 2,5           | 7             | 11            | 0,5            | 5             | 1             |
| 16               | 1,6         | 2,6           | 8             | 10            | 1              | 1             | 2             |
| 17               | 1,7         | 2,7           | 9             | 9             | 0,9            | 2             | 1             |
| 18               | 1,8         | 2,8           | 10            | 8             | 0,8            | 3             | 2             |
| 19               | 1,9         | 2,9           | 5             | 7             | 0,7            | 4             | 1             |
| 20               | 2,0         | 3,0           | 6             | 6             | 0,6            | 5             | 2             |
| 21               | 0,9         | 0,9           | 7             | 30            | 1,1            | 1             | 4             |
| 22               | 0,8         | 0,8           | 8             | 31            | 1,2            | 2             | 3             |
| 23               | 0,7         | 0,7           | 9             | 32            | 1,3            | 3             | 2             |
| 24               | 0,6         | 0,6           | 10            | 33            | 1,4            | 4             | 1             |
| 25               | 0,5         | 0,5           | 5             | 34            | 1,5            | 5             | 1             |

### 3. Задание для работы

- 1) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование интегрирующей RC цепи.
- 2) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование интегрирующей RL цепи.
- 3) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование дифференцирующей RC цепи.
- 4) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование дифференцирующей RL цепи.
- 5) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств последовательного колебательного контура.
- 6) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств параллельного колебательного контура.
- 7) Составить отчет о проделанной работе по первому вопросу в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

### 4. Порядок выполнения работы

#### 4.1. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование интегрирующей RC цепи.

4.1.1. Для схемы моделирующей интегрирующую RC цепь, приведенную на рис. 10, с учетом значений параметров *E*, *f*, *R1* и *C1*, заданных согласно варианту в таблице 1, рассчитать в системе компьютерной математики «MATHCAD» следующие характеристики:

- постоянную времени цепи ;

- емкостное реактивное сопротивление  $X_C$ ;
- модуль полного комплексного сопротивления цепи  $Z$ ;
- модуль силы тока в цепи  $I$ ;
- модули напряжений на резисторе  $U_R$  и конденсаторе  $U_C$ ;
- фазовый сдвиг по формуле

$$\psi(\omega) = -\frac{\arctg(\frac{X_C}{R}) \cdot 360^\circ}{2\pi};$$

– амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики цепи в диапазоне частот от 0 Гц до 100 МГц с шагом 1 кГц, воспользовавшись формулами

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

Формулы, используемые для расчетов, записать в отчете по лабораторной работе, а результаты расчетов занести в таблицу 2.

Отобразить в отчете по лабораторной работе АЧХ и ФЧХ интегрирующей RC цепи с частотой в логарифмическом масштабе.

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные данные для интегрирующей RC цепи

| Воздействие   | Исходные параметры | Расчетные данные |            |          |          |            |            | Экспериментальные данные |            |            |                  |                  |
|---------------|--------------------|------------------|------------|----------|----------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------------|------------------|
|               |                    | , мкс            | $X_C$ , Ом | $Z$ , Ом | $I$ , мА | $U_R$ , мВ | $U_C$ , мВ | $I$ , мА                 | $U_R$ , мВ | $U_C$ , мВ | $\varphi$ , град | $\varphi$ , град |
| гармоническое | 0,5 C1             |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | C1                 |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | 2 C1               |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
| импульсное    | 0,5 C1             |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | C1                 |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | 2 C1               |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |

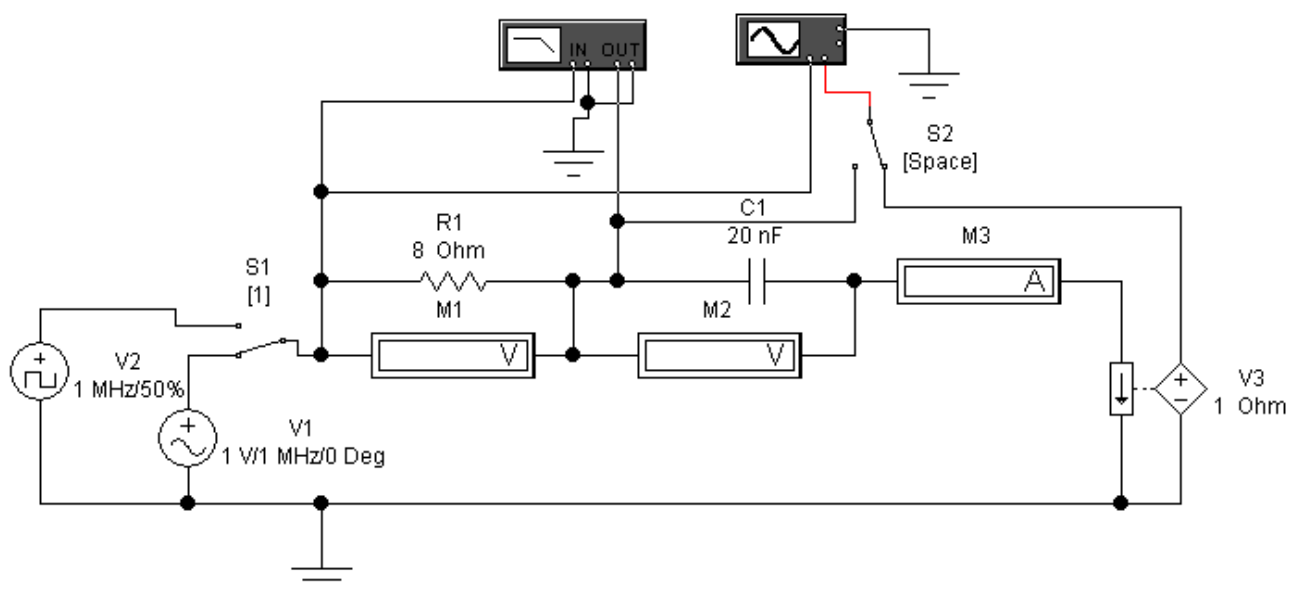


Рис. 10 – Интегрирующая RC цепь

4.1.2. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую интегрирующую RC цепь, приведенную на рис. 10. Установить заданные согласно варианту значения параметров  $R1$ ,  $C1$ ,  $E$  и  $f$ .

4.1.3. Подать на вход интегрирующей RC цепи гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и конденсаторе  $U_C$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 2.

4.1.4. Перевести переключатель S2 в левое положение и с помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T_2-T_1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и напряжения на конденсаторе  $U_C$ . Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и напряжением на конденсаторе в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot (T_2 - T_1) \cdot f \text{ и } \varphi_1 = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f.$$

Определить какое напряжение опережает, а какое отстает по фазе.

4.1.5. Перевести переключатель S2 в правое положение и с помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T_2-T_1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и тока  $I$  в цепи. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в цепи в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_2 = 2\pi \cdot (T_2 - T_1) \cdot f \text{ и } \varphi_2 = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f.$$

Определить, что опережает по фазе ток или напряжение.

4.1.6. Повторить пункты 4.1.3. – 4.1.5 для других значений емкости цепи, равных  $0,5C1$  и  $2C1$ .

4.1.7. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ цепи при исходных значениях  $C1$ , отобразить их отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ определить полосу пропускания цепи и ее характер. По полученной ФЧХ определить фазовый сдвиг на заданной частоте, сравнить его с рассчитанным сдвигом.

4.1.8. Подать на вход интегрирующей RC цепи импульсное воздействие, для этого переключатель S1 перевести в верхнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и конденсаторе  $U_C$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 2.

4.1.9. 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. По осциллограмме определить длительность переходных процессов и сравнить ее с длительностью импульса.

4.1.10. С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока через конденсатор, для этого переключатель S2 должен

находиться в правом положении. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете.

4.1.11. Повторить пункты 4.1.8. – 4.1.10 для других значений емкости цепи, равных 0,5С1 и 2С1.

4.1.12. Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в цепи, установить, что влияет на величину фазового сдвига в цепи, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в цепи.

**4.2. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование интегрирующей RL цепи.**

4.2.1. Для схемы моделирующей интегрирующую RL цепь, приведенную на рис. 11, с учетом значений параметров  $E$ ,  $f$ ,  $R1$  и  $L1$ , заданных согласно варианту в таблице 1, рассчитать в системе компьютерной математики «MATHCAD» следующие характеристики:

- постоянную времени цепи ;
- индуктивное реактивное сопротивление  $X_L$ ;
- модуль полного комплексного сопротивления цепи  $Z$ ;
- модуль силы тока в цепи  $I$ ;
- модули напряжений на резисторе  $U_R$  и катушке индуктивности  $U_L$ ;
- фазовый сдвиг по формуле

$$\psi(\omega) = -\frac{\arctg(\frac{X_L}{R}) \cdot 360^\circ}{2\pi};$$

– амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики цепи в диапазоне частот от 0 Гц до 100 МГц с шагом 1 кГц, воспользовавшись формулами

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

Формулы, используемые для расчетов, записать в отчете по лабораторной работе, а результаты расчетов занести в таблицу 3.

Отобразить в отчете по лабораторной работе АЧХ и ФЧХ интегрирующей RL цепи с частотой в логарифмическом масштабе.

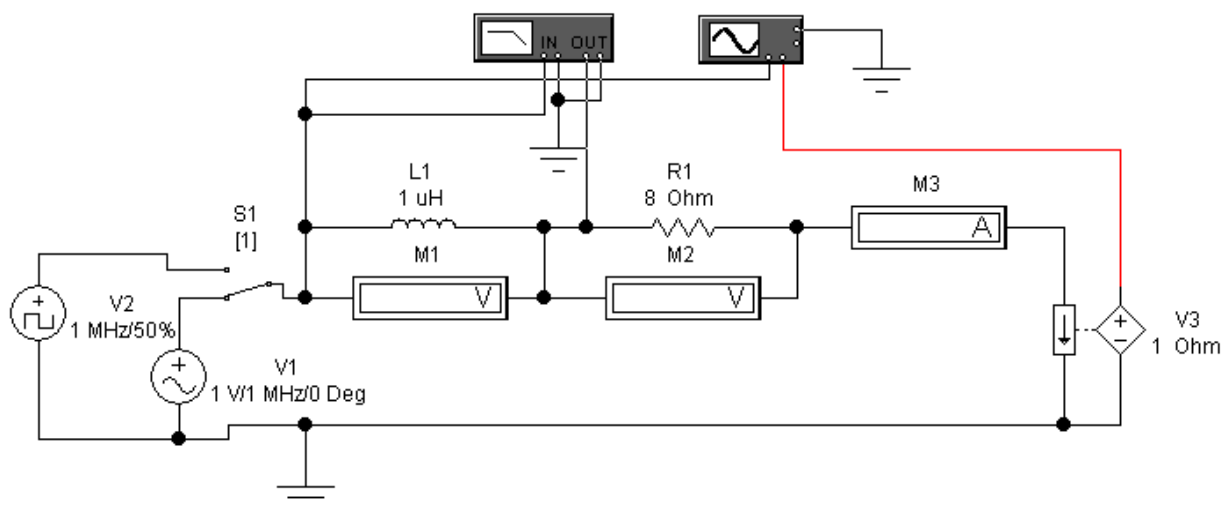


Рис. 11 – Интегрирующая RL цепь

Таблица 3 – Расчетные и экспериментальные данные для интегрирующей RL цепи

| Воздейс<br>твие   | Исходн<br>ые<br>параме<br>тры | Расчетные данные |               |          |          |               |               | Экспериментальные данные |               |               |                     |                     |
|-------------------|-------------------------------|------------------|---------------|----------|----------|---------------|---------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|
|                   |                               | , мкс            | $X_L$ ,<br>Ом | $Z$ , Ом | $I$ , мА | $U_R$ ,<br>мВ | $U_L$ ,<br>мВ | $I$ , мА                 | $U_R$ ,<br>мВ | $U_L$ ,<br>мВ | $\varphi$ ,<br>град | $\varphi$ ,<br>град |
| гармон<br>ическое | 0,5 L1                        |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | L1                            |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | 2 L1                          |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
| импуль<br>сное    | 0,5 L1                        |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | L1                            |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | 2 L1                          |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |

4.2.2. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую интегрирующую RL цепь, приведенную на рис. 11. Установить заданные согласно варианту значения параметров  $R1$ ,  $L1$ ,  $E$  и  $f$ .

4.2.3. Подать на вход интегрирующей RL цепи гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и индуктивности  $U_L$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 3.

4.2.4. С помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T2-T1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и тока  $I$  в цепи. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в цепи в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\theta_1 = 2\pi \cdot (T2 - T1) \cdot f \text{ и } \theta_1 = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f.$$

Определить, что опережает по фазе ток или напряжение. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и напряжением на выходе, т.е. на резисторе. Определить какое напряжение опережает, а какое отстает по фазе.

4.2.5. Повторить пункты 4.2.3. – 4.2.4 для других значений емкости цепи, равных  $0,5C1$  и  $2C1$ .

4.2.6. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ цепи при исходных значениях  $L1$ , отобразить их отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ определить полосу пропускания цепи и ее характер. По полученной ФЧХ определить фазовый сдвиг на заданной частоте, сравнить его с рассчитанным сдвигом.

4.2.7. Подать на вход интегрирующей RL цепи импульсное воздействие, для этого переключатель S1 перевести в верхнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и катушке  $U_L$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 3.

4.2.8. С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока в цепи (выходного напряжения). Полученные временные диаграммы отобразить в отчете. По осциллограмме определить длительность переходных процессов и сравнить ее с длительностью импульса.

4.2.9. Повторить пункты 4.2.7. – 4.2.8 для других значений индуктивности цепи, равных 0,5L1 и 2L1.

4.2.10. Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в цепи, установить, что влияет на величину фазового сдвига в цепи, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в цепи.

**4.3. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование дифференцирующей RC цепи.**

4.3.1. Для схемы моделирующей дифференцирующую RC цепь, приведенную на рис. 12, с учетом значений параметров  $E, f, R1$  и  $C1$ , заданных согласно варианту в таблице 1, рассчитать в системе компьютерной математики «MATHCAD» следующие характеристики:

- постоянную времени цепи ;
- емкостное реактивное сопротивление  $X_C$ ;
- модуль полного комплексного сопротивления цепи  $Z$ ;
- модуль силы тока в цепи  $I$ ;
- модули напряжений на резисторе  $U_R$  и конденсаторе  $U_C$ ;
- фазовый сдвиг по формуле

$$\psi(\omega) = \frac{\arctg\left(\frac{X_C}{R}\right) \cdot 360^\circ}{2\pi};$$

– амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики цепи в диапазоне частот от 0 Гц до 100 МГц с шагом 1 кГц, воспользовавшись формулами

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}}} \quad \text{и} \quad \varphi(\omega) = \frac{\arctg\left(\frac{1}{\omega \tau}\right) \cdot 360^\circ}{2\pi}.$$

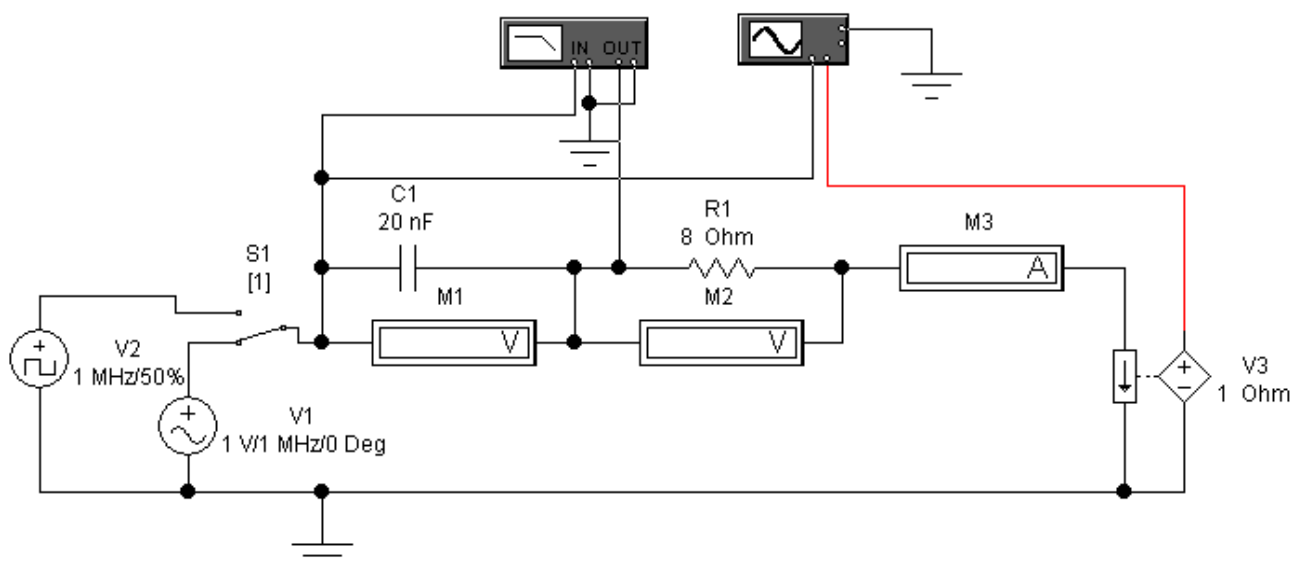


Рис. 12 – Дифференцирующая RC цепь

Формулы, используемые для расчетов, записать в отчете по лабораторной работе, а результаты расчетов занести в таблицу 4.

Отобразить в отчете по лабораторной работе АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RC цепи с частотой в логарифмическом масштабе.

Таблица 4 – Расчетные и экспериментальные данные для дифференцирующей RC цепи

| Воздействи    | Исходные параметры | Расчетные данные |            |          |          |            |            | Экспериментальные данные |            |            |                  |                  |
|---------------|--------------------|------------------|------------|----------|----------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------------|------------------|
|               |                    | , мкс            | $X_C$ , Ом | $Z$ , Ом | $I$ , мА | $U_R$ , мВ | $U_C$ , мВ | $I$ , мА                 | $U_R$ , мВ | $U_C$ , мВ | $\varphi$ , град | $\varphi$ , град |
| гармоническое | 0,5 C1             |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | C1                 |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | 2 C1               |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
| импульсное    | 0,5 C1             |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | C1                 |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |
|               | 2 C1               |                  |            |          |          |            |            |                          |            |            |                  |                  |

4.3.2. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую дифференцирующую RC цепь, приведенную на рис. 12. Установить заданные согласно варианту значения параметров  $R1$ ,  $C1$ ,  $E$  и  $f$ .

4.3.3. Подать на вход дифференцирующей RC цепи гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и конденсаторе  $U_C$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 4.

4.3.4. С помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T_2 - T_1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{ax}$  и тока  $I$  в цепи. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током  $I$  в цепи в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot (T_2 - T_1) \cdot f \text{ и } \varphi_1 = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f.$$

Определить, что опережает по фазе ток или напряжение. Определить фазовый сдвиг между входным напряжением и напряжением на выходе цепи, т.е. на резисторе. Установить, какое напряжение опережает, а какое отстает по фазе.

4.3.5. Повторить пункты 4.3.3. – 4.3.4 для других значений емкости цепи, равных **0,5C1** и **2C1**.

4.3.6. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ цепи при исходных значениях **C1**, отобразить их отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ определить полосу пропускания цепи и ее характер. По полученной ФЧХ определить фазовый сдвиг на заданной частоте, сравнить его с рассчитанным сдвигом.

4.3.7. Подать на вход дифференцирующей RC цепи импульсное воздействие, для этого переключатель S1 перевести в верхнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и конденсаторе  $U_C$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 4.

4.3.8. С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока в цепи (выходного напряжения). Полученные временные диаграммы отобразить в отчете. По осциллограмме определить длительность переходных процессов и сравнить ее с длительностью импульса.

4.3.9. Повторить пункты 4.3.7. – 4.3.8 для других значений емкости цепи, равных **0,5C1** и **2C1**.

4.3.10. Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в дифференцирующей цепи, установить, что влияет на величину фазового сдвига в цепи, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в цепи.

#### **4.4. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование дифференцирующей RL цепи.**

4.4.1. Для схемы моделирующей дифференцирующую RL цепь, приведенную на рис. 13, с учетом значений параметров  $E$ ,  $f$ ,  $R1$  и  $L1$ , заданных согласно варианту в таблице 1, рассчитать в системе компьютерной математики «MATHCAD» следующие характеристики:

- постоянную времени цепи ;
- индуктивное реактивное сопротивление  $X_L$ ;
- модуль полного комплексного сопротивления цепи  $Z$ ;
- модуль силы тока в цепи  $I$ ;
- модули напряжений на резисторе  $U_R$  и катушке индуктивности  $U_L$ ;
- фазовый сдвиг по формуле

$$\psi(\omega) = 90^\circ - \frac{\arctg(\frac{X_L}{R}) \cdot 360^\circ}{2\pi};$$

— амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики цепи в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц с шагом 1 кГц, воспользовавшись формулами

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}}} \text{ и } \varphi(\omega) = \frac{\arctg\left(\frac{1}{\omega \tau}\right) \cdot 360^\circ}{2\pi}.$$

Формулы, используемые для расчетов, записать в отчете по лабораторной работе, а результаты расчетов занести в таблицу 5.

Отобразить в отчете по лабораторной работе АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RL цепи с частотой в логарифмическом масштабе.

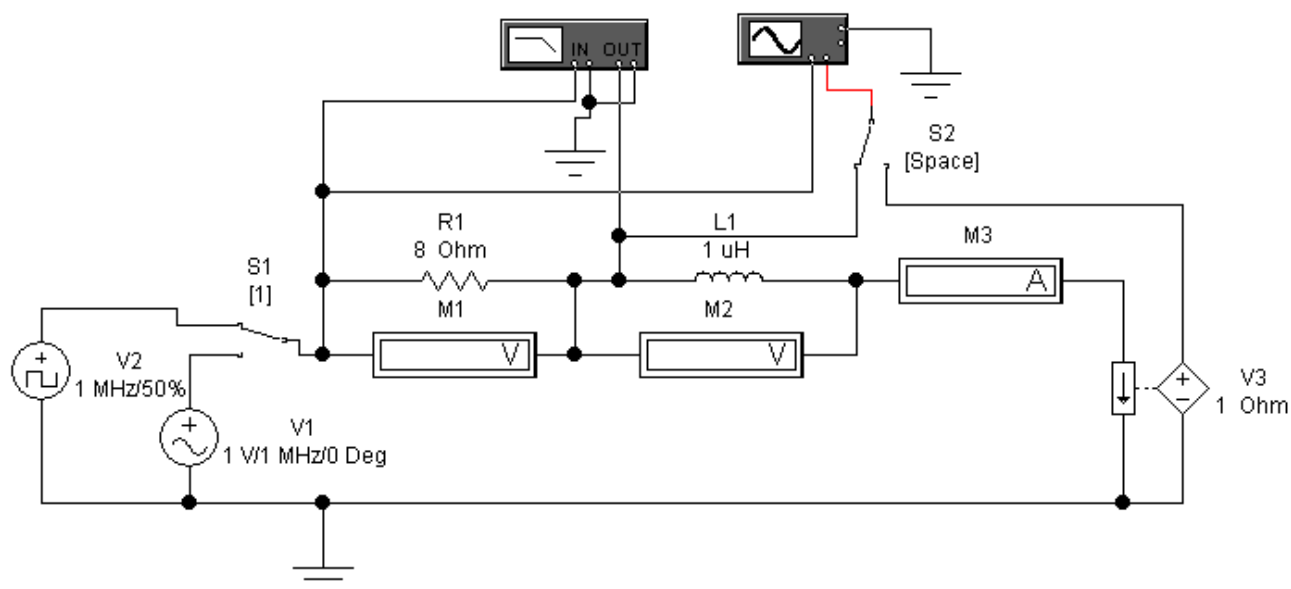


Рис. 13 – Дифференцирующая RL цепь

Таблица 5 – Расчетные и экспериментальные данные для дифференцирующей RL цепи

| Воздейс<br>твие   | Исходн<br>ые<br>параме<br>тры | Расчетные данные |               |          |          |               |               | Экспериментальные данные |               |               |                     |                     |
|-------------------|-------------------------------|------------------|---------------|----------|----------|---------------|---------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|
|                   |                               | , мкс            | $X_L$ ,<br>Ом | $Z$ , Ом | $I$ , мА | $U_R$ ,<br>мВ | $U_L$ ,<br>мВ | $I$ , мА                 | $U_R$ ,<br>мВ | $U_L$ ,<br>мВ | $\varphi$ ,<br>град | $\varphi$ ,<br>град |
| гармон<br>ическое | 0,5 L1                        |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | L1                            |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | 2 L1                          |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
| импульс<br>ное    | 0,5 L1                        |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | L1                            |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |
|                   | 2 L1                          |                  |               |          |          |               |               |                          |               |               |                     |                     |

4.4.2. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую дифференцирующую RL цепь, приведенную на рис. 10. Установить заданные

согласно варианту значения параметров  $R1$ ,  $L1$ ,  $E$  и  $f$ .

4.4.3. Подать на вход дифференцирующей RL цепи гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и катушке индуктивности  $U_L$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 5.

4.4.4. Перевести переключатель S2 в левое положение и с помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T2-T1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и выходного напряжения, т.е. на индуктивности  $U_L$ . Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и напряжением на индуктивности в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot (T2 - T1) \cdot f \text{ и } \varphi_1 = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f.$$

Определить какое напряжение опережает, а какое отстает по фазе.

4.4.5. Перевести переключатель S2 в правое положение и с помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T2-T1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и тока  $I$  в цепи. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в цепи в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_2 = 2\pi \cdot (T2 - T1) \cdot f \text{ и } \varphi_2 = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f.$$

Определить, что опережает по фазе ток или напряжение.

4.4.6. Повторить пункты 4.4.3. – 4.4.5 для других значений емкости цепи, равных  $0,5C1$  и  $2C1$ .

4.4.7. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ цепи при исходных значениях  $L1$ , отобразить их отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ определить полосу пропускания цепи и ее характер. По полученной ФЧХ определить фазовый сдвиг на заданной частоте, сравнить его с рассчитанным сдвигом.

4.4.8. Подать на вход дифференцирующей RL цепи импульсное воздействие, для этого переключатель S1 перевести в верхнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе  $U_R$  и катушке индуктивности  $U_L$ , тока  $I$  в цепи, результаты занести в таблицу 5.

4.4.9. С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и напряжения на индуктивности, для этого переключатель S2 должен находиться в левом положении. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете. По осциллограмме определить длительность переходных процессов и сравнить ее с длительностью импульса.

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

4.4.11. Повторить пункты 4.4.8. – 4.4.10 для других значений индуктивности цепи, равных  $0,5L1$  и  $2L1$ .

4.4.12. Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в дифференцирующей цепи, установить, что влияет на величину фазового сдвига в цепи, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в цепи.

#### **4.5. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств последовательного колебательного контура.**

4.5.1. Для схемы моделирующей последовательный колебательный контур в виде RLC цепи, приведенной на рис. 14, с учетом значений параметров  $E, f, R, C$  и  $L$ , заданных согласно варианту в таблице 1, рассчитать в системе компьютерной математики «MATHCAD» следующие характеристики:

- характеристическое (волновое) сопротивление контура ( $\rho = \sqrt{L/C}$ );
- добротность контура ( $Q = \rho/R$ );
- резонансную частоту контура ( $f_{\text{рез}} = 1/2\pi \sqrt{LC}$ );
- индуктивное и емкостное реактивные сопротивления  $X_L$  и  $X_C$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ ;
- модуль полного комплексного сопротивления цепи  $Z$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ ;
- модуль силы тока в цепи  $I_m$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ ;
- модули напряжений на резисторе  $U_R$ , емкости  $U_C$  и катушке индуктивности  $U_L$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ ;
- относительную резонансную кривую тока в контуре в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц с шагом 1 кГц, воспользовавшись формулами

$$I(\omega) = \frac{U_{\text{дв}}}{I_m \omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad \text{или} \quad I(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_{\text{рез}}}\right)^2}};$$

- теоретическую полосу пропускания контура с помощью выражения  $2\Delta f = \frac{f_{\text{рез}}}{Q} = \frac{R}{2\pi \cdot L}$ .

Формулы, используемые для расчетов, записать в отчете по лабораторной работе, а результаты расчетов занести в таблицу 6.

Отобразить в отчете по лабораторной работе резонансную кривую тока в контуре с частотой, отложенной в логарифмическом масштабе.

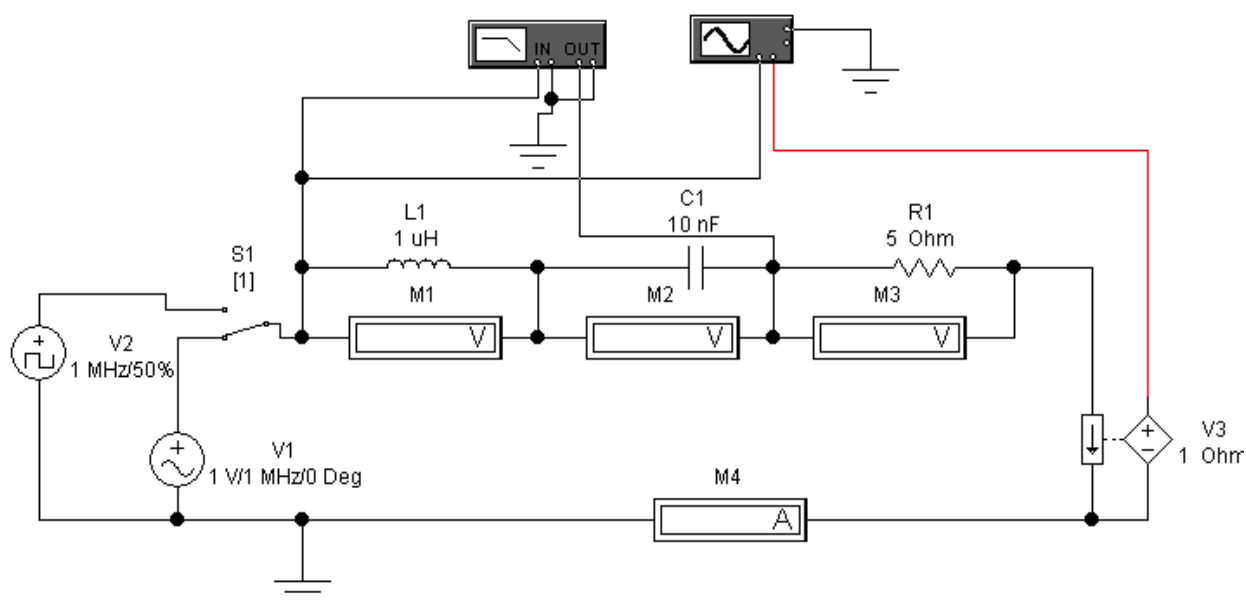


Рис. 14 – Последовательный колебательный контур

Таблица 6 – Расчетные и экспериментальные данные для последовательного колебательного контура

| Воздействи    | Исходные параметры  | Расчетные данные |       |       |                     |                     |                     | Экспериментальные данные |                     |                     |                     |        |
|---------------|---------------------|------------------|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|
|               |                     | Q                | Z, Ом | I, мА | U <sub>R</sub> , мВ | U <sub>L</sub> , мВ | U <sub>C</sub> , мВ | I, мА                    | U <sub>R</sub> , мВ | U <sub>L</sub> , мВ | U <sub>C</sub> , мВ | , град |
| гармоническое | 0,1f <sub>рез</sub> |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
|               | f <sub>рез</sub> ,  |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
|               | 10f <sub>рез</sub>  |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
| гармоническое | 0,1f <sub>рез</sub> |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
|               | f <sub>рез</sub> ,  |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
|               | 10f <sub>рез</sub>  |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
| гармоническое | 0,1f <sub>рез</sub> |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
|               | f <sub>рез</sub> ,  |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |
|               | 10f <sub>рез</sub>  |                  |       |       |                     |                     |                     |                          |                     |                     |                     |        |

4.5.2. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую последовательный колебательный контур в виде RLC цепи, приведенной на рис. 14. Установить заданные согласно варианту значения параметров **R1**, **L1**, **C1**, **E** и рассчитанное значение резонансной частоты **f<sub>рез</sub>**.

4.5.3. Подать на вход колебательного контура гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение. Измерить значения напряжений на резисторе **U<sub>R</sub>**, емкости **U<sub>C</sub>** и катушке индуктивности **U<sub>L</sub>**, тока **I** в цепи. Незначительно меняя значение частоты входного воздействия, точно настроить колебательный контур на резонансную частоту, добившись того, чтобы напряжения на емкости **U<sub>C</sub>** и катушке индуктивности **U<sub>L</sub>** были примерно равны. Результаты измерений занести в таблицу 6.

4.5.4. С помощью осциллографа измерить значение временного промежутка  $T_2 - T_1$  между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и тока в контуре. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в контуре в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot (T_2 - T_1) \cdot f \text{ и } \varphi_1 = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f.$$

Определить, что опережает по фазе ток или напряжение.

4.5.5. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ контура, отобразить их в отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ и ФЧХ определить полосу пропускания контура, сравнить ее с теоретически рассчитанной полосой. По полученной ФЧХ определить фазовый сдвиг на заданной частоте, сравнить его с рассчитанным сдвигом.

4.5.6. Повторить пункты 4.5.3. – 4.5.5 для других значений частот входного воздействия, равных  $0,1f_{рез}$  и  $10f_{рез}$ .

4.5.7. Установить в генераторе резонансную частоту  $f_{рез}$ , повторить пункты 4.5.3. – 4.5.5 для других значений добротности  $Q$ , устанавливая активное сопротивление  $R$  в 5 раз меньше и в 5 раз больше.

4.5.8. Подать на вход контура импульсное воздействие на частоте резонанса, для этого переключатель  $S_1$  перевести в верхнее положение. С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока в контуре. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете.

4.5.9. С помощью анализатора Фурье получить спектр входного напряжения и тока в контуре, сравнив их сделать выводы. Полученные спектры отобразить в отчете.

4.5.10. Повторить пункты 4.5.8. – 4.5.9 для других значений частот входного воздействия, равных  $0,1f_{рез}$  и  $10f_{рез}$ .

4.5.11. Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в колебательном контуре, установить, что влияет на резонансные свойства контура, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в контуре.

#### ***4.6. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств параллельного колебательного контура.***

4.6.1. Для схемы моделирующей параллельный колебательный контур в виде RLC цепи, приведенной на рис. 15, с учетом значений параметров  $E, f, R_1, R_2, C_1$  и  $L_1$ , заданных согласно варианту в таблице 1, рассчитать в системе компьютерной математики «MATHCAD» следующие характеристики:

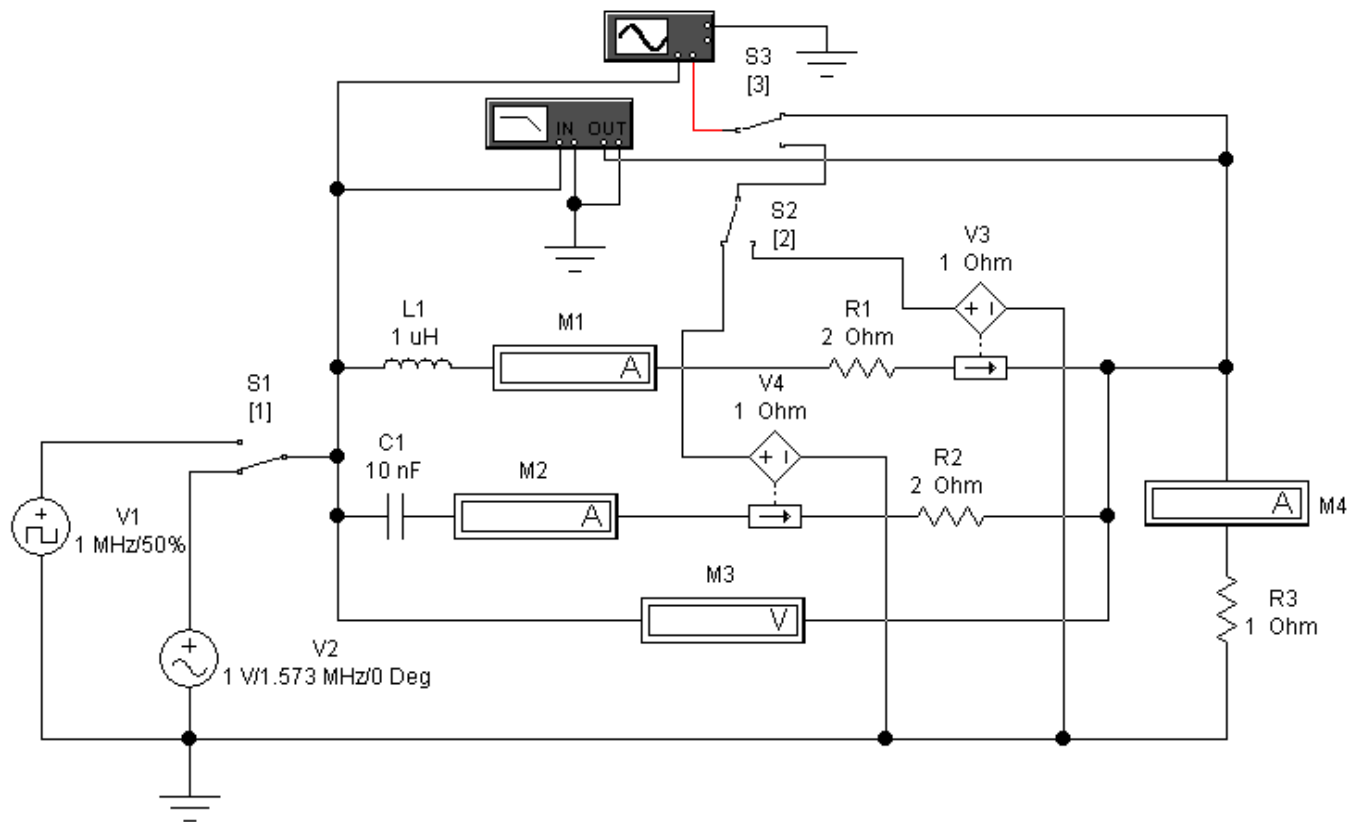


Рис. 14 – Последовательный колебательный контур

– характеристическое (волновое) сопротивление контура ( $= \sqrt{L/C}$ );

– добротность контура –  $Q = \rho / R_y$ , где  $R_y = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ ;

– резонансную частоту контура -

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_y}{L}\right)^2};$$

– индуктивную и емкостную реактивные проводимости  $B_L$  и  $B_C$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ , воспользовавшись формулами:

$$B_L = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2}, \quad B_C = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2};$$

– модуль полного комплексного сопротивления цепи  $Z$ , на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$  по формуле

$$Z_y = \frac{1}{B_L + B_C} + R_i;$$

– модуль силы тока в цепи  $I_m$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ ;

– модули токов в ветвях емкости  $I_C$  и катушке индуктивности  $I_L$  на частотах  $0,1f_{\text{рез}}, f_{\text{рез}}, 10f_{\text{рез}}$ ;

– относительную резонансную кривую тока в контуре в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц с шагом 1 кГц, воспользовавшись формулами

$$I(\omega) = \frac{U_{\hat{a}\hat{o}}}{I_{m\hat{o}\hat{a}\hat{c}} Z_{\hat{y}}};$$

– теоретическую полосу пропускания контура с помощью выражения

$$2\Delta f = \frac{f_{\hat{o}\hat{a}\hat{c}}}{Q} = \frac{R_{\hat{y}}}{2\pi \cdot L}.$$

Формулы, используемые для расчетов, записать в отчете по лабораторной работе, а результаты расчетов занести в таблицу 7.

Отобразить в отчете по лабораторной работе резонансную кривую тока в контуре с частотой, отложенной в логарифмическом масштабе.

Таблица 7 – Расчетные и экспериментальные данные для параллельного колебательного контура

| Воздействи    | Исходные параметры  | Расчетные данные |       |       |       |                     |                     | Экспериментальные данные |       |                     |                     |        |
|---------------|---------------------|------------------|-------|-------|-------|---------------------|---------------------|--------------------------|-------|---------------------|---------------------|--------|
|               |                     | Q                | Z, Ом | U, мВ | I, мА | I <sub>L</sub> , мА | I <sub>C</sub> , мА | U, мВ                    | I, мА | I <sub>L</sub> , мА | I <sub>C</sub> , мА | , град |
| гармоническое | 0,1f <sub>рез</sub> |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
|               | f <sub>рез</sub> ,  |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
|               | 10f <sub>рез</sub>  |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
| гармоническое | 0,1f <sub>рез</sub> |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
|               | f <sub>рез</sub> ,  |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
|               | 10f <sub>рез</sub>  |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
| гармоническое | 0,1f <sub>рез</sub> |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
|               | f <sub>рез</sub> ,  |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |
|               | 10f <sub>рез</sub>  |                  |       |       |       |                     |                     |                          |       |                     |                     |        |

4.6.2. Запустить программу схемотехнического моделирования «Electronics Workbench EWB 5.12». Собрать схему, моделирующую параллельный колебательный контур в виде RLC цепи, приведенной на рис. 15. Установить заданные согласно варианту значения параметров **R1, R2, L1, C1, E** и рассчитанное значение резонансной частоты **f<sub>рез</sub>**.

4.6.3. Подать на вход колебательного контура гармоническое воздействие, для этого переключатель S1 перевести в нижнее положение. Измерить значения напряжения на контуре **U**, токов в ветвях емкости **I<sub>C</sub>** и катушки индуктивности **I<sub>L</sub>**, тока **I** в цепи. Незначительно меняя значение частоты входного воздействия, точно настроить колебательный контур на резонансную частоту, добившись того, чтобы токи в ветвях емкости **I<sub>C</sub>** и катушки индуктивности **I<sub>L</sub>** были примерно равны. Результаты измерений занести в таблицу 7.

4.6.4. С помощью осциллографа измерить значение временного промежутка T2–T1 между одинаковыми фазами входного напряжения **U<sub>вх</sub>** и тока в цепи. Для этого переключатель S3 перевести в верхнее положение. Рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в контуре в радианах и градусах соответственно по формулам

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot (T_2 - T_1) \cdot f \text{ и } \varphi_1 = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f.$$

Определить, что опережает по фазе ток или напряжение.

4.6.5. Перевести переключатель S3 в нижнее положение, а переключатель S2 в левое положение. С помощью осциллографа измерить значение временного промежутка T2–T1 между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и тока в ветви емкости. По известным формулам рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в ветви контура в градусах. Определить, что опережает по фазе ток или напряжение.

4.6.6. Перевести переключатель S2 в правое положение. С помощью осциллографа измерить значение временного промежутка T2–T1 между одинаковыми фазами входного напряжения  $U_{вх}$  и тока в ветви индуктивности. По известным формулам рассчитать фазовый сдвиг между входным напряжением и током в ветви контура в градусах. Определить, что опережает по фазе ток или напряжение.

4.6.7. С помощью графопостроителя получить АЧХ и ФЧХ контура, отобразить их в отчете по лабораторной работе и сравнить с ранее рассчитанными характеристиками. По полученной АЧХ и ФЧХ определить полосу пропускания контура, сравнить ее с теоретически рассчитанной полосой. По полученной ФЧХ определить фазовый сдвиг на заданной частоте, сравнить его с рассчитанным сдвигом.

4.6.8. Повторить пункты 4.6.3. – 4.6.6 для других значений частот входного воздействия, равных  $0,1f_{рез}$  и  $10f_{рез}$ .

4.6.9. Привести схему в исходное состояние. Установить в генераторе резонансную частоту  $f_{рез}$ , повторить пункты 4.6.3. – 4.5.6 для других значений добротности  $Q$ , устанавливая активные сопротивления  $R$  в 2 раз меньше и в 2 раз больше.

4.6.10. Подать на вход контура импульсное воздействие на частоте резонанса, для этого переключатели S1 и S3 перевести в верхнее положение. С помощью осциллографа снять временные диаграммы входного напряжения и тока в контуре. Полученные временные диаграммы отобразить в отчете.

4.6.11. С помощью анализатора Фурье получить спектр входного напряжения и тока в контуре, сравнив их сделать выводы. Полученные спектры отобразить в отчете.

4.6.12. Повторить пункты 4.6.10. – 4.6.11 для других значений частот входного воздействия, равных  $0,1f_{рез}$  и  $10f_{рез}$ .

4.6.13. Сделать выводы по результатам, проделанной работы, в выводах отразить все физические процессы, происходящие в колебательном контуре, установить, что влияет на резонансные свойства контура, какие процессы приводят к искажению формы прямоугольных импульсов в контуре.

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

В отчете привести:

- исходные данные,
- выполняемые задания,

- исследуемые принципиальные электрические схемы,
- формулы и результаты расчетов,
- результаты исследований – измеренные параметры, занесенные в таблицы, осциллограммы, АЧХ, ФЧХ и спектры;
- выводы о проделанной работе.

## **5. 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 исследуемой схеме.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

- 1) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.
- 2) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.
- 3) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

***Лабораторная работа разработана  
доцентом кафедры ОТЗИ, кандидатом технических наук, профессором РАЕ  
Сагдеевым К.М.***

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ КАК ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКА И УТЕЧКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

## **УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.**

## **СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

### **ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Проблема технической защиты информации заключается в том, технические средства создания, обработки, хранения и передачи информации представляют собой совокупность радиотехнических цепей.

Радиотехнические цепи – это цепи, по которым распространяются и передаются электрические сигналы, т.е. это электрические цепи с высокочастотными токами большого диапазона частот. Следовательно, носителем информации в технических средствах создания, обработки, хранения и передачи информации является высокочастотный электрический ток или высокочастотная последовательность прямоугольных импульсов, которые при определенных условиях могут несанкционированно распространяться по непредусмотренным разработчиками электрическим цепям, что способствует созданию электрических каналов утечки информации.

Несанкционированная электрическая цепь возникает, если в пространстве создаются пути для распространения электрического тока. Условиями возникновения этих путей являются наличие рядом с ними проводников из материалов с высокой электропроводностью, окруженных хорошо изолирующей средой, либо электрических элементов, представляющих собой локальные концентраторы электрических полей (конденсаторы) или магнитных полей (катушки индуктивности). Возникающие в первом случае электрические цепи, состоящие из проводящих длинных линий, представляют собой цепи с распределенными параметрами, поскольку их основные параметры (сопротивление и индуктивность проводников, а также емкость и проводимость между проводниками) распределены вдоль этих линий. Тогда как возникающие во втором случае электрические цепи, представляют собой цепи с сосредоточенными параметрами, поскольку их основные параметры сосредоточены в пределах входящих в них элементов (резисторов, катушек индуктивностей и конденсаторов) и от их места подключения в цепи, т.е. пространственных координат не зависят.

Таким образом, для обеспечения защиты информации от утечки по

электрическим каналам необходимо владеть методикой анализа физических процессов, связанных с распространением высокочастотного тока или высокочастотная последовательность прямоугольных импульсов по электрическим цепям.

Целью данной лабораторной работы являются формирование у студентов умений моделировать и исследовать электрические цепи как физическую среду распространения тока и, следовательно, утечки электрических сигналов. Для достижения поставленной цели в лабораторной работе рассматриваются два учебных вопроса: моделирование и исследование электрических цепей с сосредоточенными параметрами; моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.

## 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. 15.

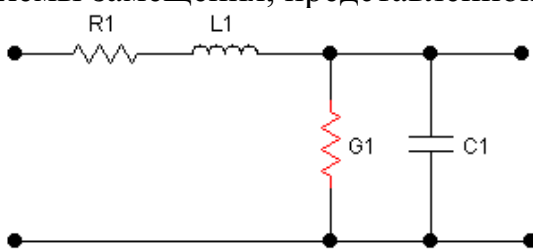


Рис. 15 – Схема замещения сегмента длинной линии

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:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (30)$$

Решение уравнений (30) дает следующий набор характеристик (вторичных параметров) однородной длинной линии:

1) Волновое (характеристическое) сопротивление

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (31)$$

2) Коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} = \alpha + j\beta. \quad (32)$$

3) Коэффициент затухания

$$\alpha = \sqrt{0.5 \cdot \left( \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC) \right)}. \quad (33)$$

4) Коэффициент фазы

$$\beta = \sqrt{0.5 \cdot \left( \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (RG - \omega^2 LC) \right)}. \quad (34)$$

Если в длинной линии выполняется условие, при котором не происходит искажения сигналов, т.е.  $R/L = G/C$ , то получим

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (35)$$

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

$$\alpha = \sqrt{RG}, \quad (36)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}. \quad (37)$$

При тех же условиях скорость распространения электромагнитного поля длиной  $\lambda$  и периодом  $T$  вдоль линии равна

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{2\pi \cdot f \cdot \lambda}{2\pi} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (38)$$

а время задержки сигнала при прохождении длинной линии длиной  $l$

$$\Delta\tau = l/v. \quad (39)$$

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:

$$LC = \frac{1}{\tilde{n}^2} \approx 11,11 \cdot 10^{-18}. \quad (40)$$

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 8 – 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> |
|------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| <b>19</b>        | 43          | 0,35         | 0,1           | 40            |
| <b>20</b>        | 48          | 0,4          | 0,2           | 30            |
| <b>21</b>        | 49          | 0,35         | 0,3           | 25            |
| <b>22</b>        | 44          | 0,3          | 0,4           | 20            |
| <b>23</b>        | 39          | 0,25         | 0,5           | 25            |
| <b>24</b>        | 34          | 0,2          | 1             | 30            |
| <b>25</b>        | 29          | 0,15         | 0,5           | 40            |

### **3. Задание для работы**

8) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.

9) Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.

10) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.

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

### **4. Порядок выполнения работы**

**4.8. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.**

4.8.1. 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.

4.8.2. К входу витой пары через переключатель подключить синусоидальный генератор и генератор прямоугольных импульсов, выход витой пары нагрузить на активное сопротивление, величиной 100 Ом.

4.8.3. С помощью графопостроителя получить АЧХ распределенной цепи. Отобразить полученную АЧХ в отчете. Измерить резонансную частоту сегмента витой пары.

4.8.4. 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.

4.8.5. Повторить предыдущий пункт, подавая на вход гармоническое воздействие на резонансной частоте и на частоте, равной 100 МГц.

4.8.6. 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.

4.8.7. С помощью Фурье-анализатора получить спектры входной и выходной импульсной последовательности, которые занести в отчет. Сравнить полученные спектры, сделать выводы о том, какие процессы приводят к искажению формы импульсов.

4.8.8. Повторить предыдущий пункт, последовательно подавая на вход витой пары импульсное воздействие на частотах 1 и 10 МГц.

4.8.9. Сделать выводы по результатам проделанной работы, в том числе о пропускной способности витой пары.

**4.9. Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.**

4.9.1. В системе компьютерной математики «MathCAD» записать формулы, описывающие расчет параметров однородной длинной линии. Для этого воспользоваться выражениями (31) – (39).

4.9.2. С помощью созданной математической модели рассчитать следующие параметры витой пары:

- волновое (характеристическое) сопротивление;
- коэффициент распространения;
- коэффициент затухания;
- коэффициент фазы;
- временную задержку.

4.9.3. Построить графики зависимостей коэффициента затухания и коэффициента фазы от длины линии (1 – 100000 м).

4.9.4. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

**4.10. Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.**

4.10.1. 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. 16. Установить значения первичных параметров линии связи в соответствии с заданным вариантом.

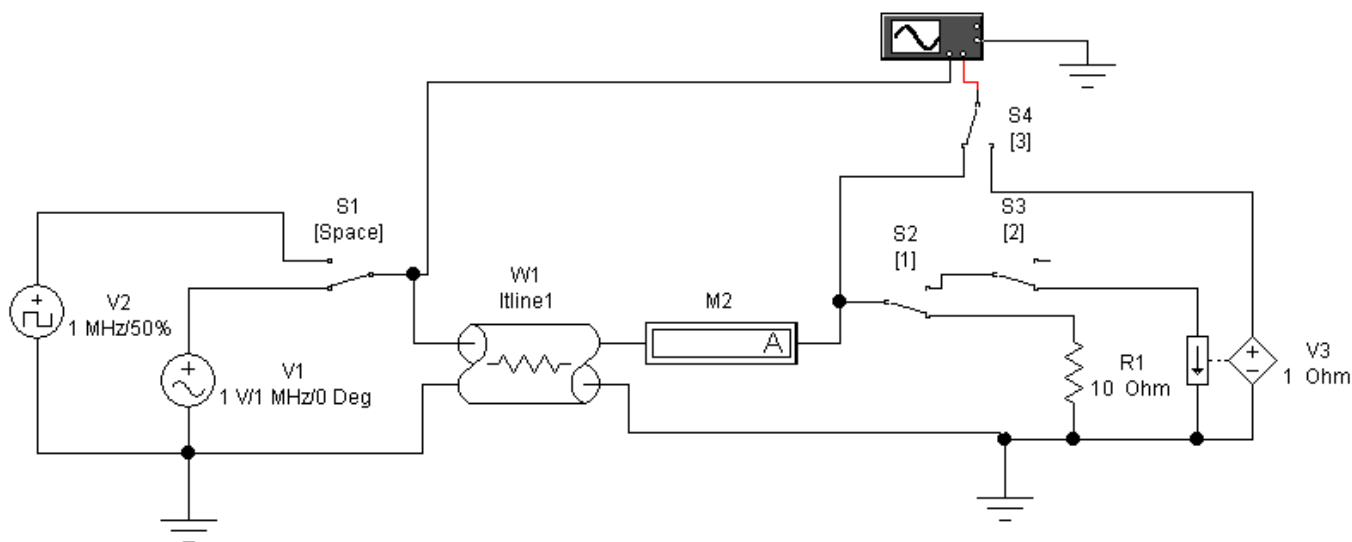


Рис. 16 – Схема исследования линии связи с потерями

4.10.2. Создать в линии связи режим бегущей волны. Для этого рассчитать характеристическое (волновое) сопротивление линии связи и установить нагрузочное сопротивление  $R1$ , равное волновому сопротивлению.

4.10.3. 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.

4.10.4. Включить симулятор, как только на экране осциллографа появится выходное напряжение отключить его. Отобразить в отчете временные диаграммы входного и выходного напряжения.

4.10.5. Измерить с помощью осциллографа и занести в отчет амплитуды входного и выходного напряжений, по величинам которых рассчитать:

- величину выходного тока  $I_{вых}$ ;
- коэффициент затухания  $\alpha = U_{вх} / U_{вых}$ ;

4.10.6. 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

$$\beta = 2\pi \cdot (T2 - T1) \cdot f \text{ и } \beta = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f.$$

4.10.7. 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.

4.10.8. 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.

4.10.9. Повторить выполнение пунктов 4.10.3 – 4.10.8 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.

4.10.10. Сделать выводы по результатам проделанной работы, охарактеризовав протекающие в линии связи физические процессы.

**4.11. 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.

## **5. 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 исследуемой схеме.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

4) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

5) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

6) Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

***Лабораторная работа разработана  
доцентом кафедры ОТЗИ, кандидатом технических наук, профессором РАЕ  
Сагдеевым К.М.***

**РАЗДЕЛ № 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

**Тема МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОЛН**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ,  
МАГНИТНЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОЛН**

**Время – 10 часов.**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование электрических полей.**
- 2. Исследование электрических полей.**
- 3. Моделирование и исследование магнитных полей.**
- 4. Моделирование и исследование явления электромагнитной индукции.**
- 5. Моделирование и исследование электромагнитных волн.**

**СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

**ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ**

**1 – 2. 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  $\epsilon_a$  и относительную  $\epsilon$  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/м<sup>3</sup>, 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:

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

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

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

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.

$$\operatorname{div} \varepsilon_n \dot{\vec{E}} = \rho, \quad (1.10)$$

$$\int_V \operatorname{div} \dot{\vec{E}} \, dV = \oint_S \varepsilon_n \dot{\vec{E}} \cdot d\vec{S} = q, \quad (1.11)$$

В эти уравнения вошла комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_n$ , которая учитывает и диэлектрические свойства среды, и ее проводимость  $\sigma$

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

### Движение заряженных частиц в электрическом поле.

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

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

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  $V_0$  попадают в электрическое поле плоского конденсатора. Если зазор между пластинами 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:  $E_x = E_z = 0$ ,  $E_y = E$ .

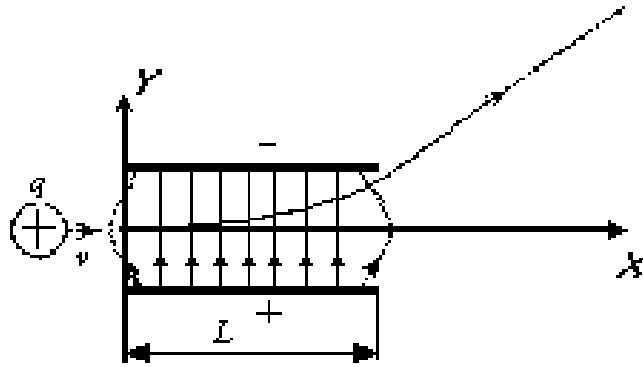


Рис. 1.1 – Движение заряженной частицы в поле плоского конденсатора

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  $\vec{P} = m \cdot \vec{V}_i$ , а с другой стороны сила электрического поля  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ , направленная перпендикулярно начальному движению частицы. В этом случае помимо тангенсальной составляющей вектора полного ускорения  $\vec{a}_t$ , направленной по касательной к траектории движения, возникает нормальная (центростремительная) составляющая вектора полного ускорения  $\vec{a}_n$ , 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  $S_o$  – расстояние точки от исходного положения в момент начала отсчета или иначе путь, пройденный к моменту  $t=0$ ;  $V_o$  – начальная скорость;  $a_t$  – касательное ускорение;  $t$  – текущее время.

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

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

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  $\vec{V} = V_o$  в однородном электрическом поле плоского конденсатора запишем уравнение движения в виде траектории движения вектора силы:

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

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.

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

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:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}}, \quad \vec{P} = m \cdot \vec{V} = \frac{m_0 \vec{V}}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}}. \quad (1.18)$$

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:

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

### 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  $\tau$  находится в среде с проницаемостью  $\epsilon_a$  (см. рис. 1.2).

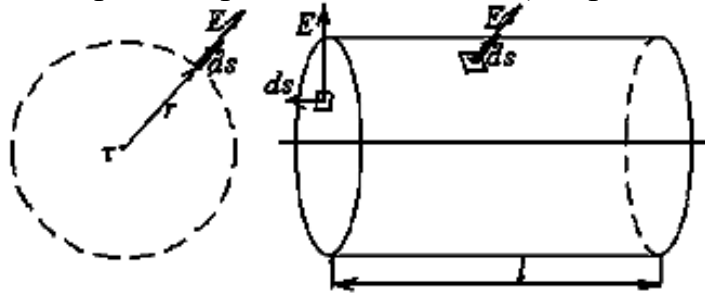


Рис. 1.2 – Заряженная ось

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

$$\oint \overline{E} ds = \oint E ds = E \oint ds = E \cdot 2\pi r l.$$

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

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

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  $\tau$  и  $-\tau$ . Именно такой случай показан на рис. 1.3.

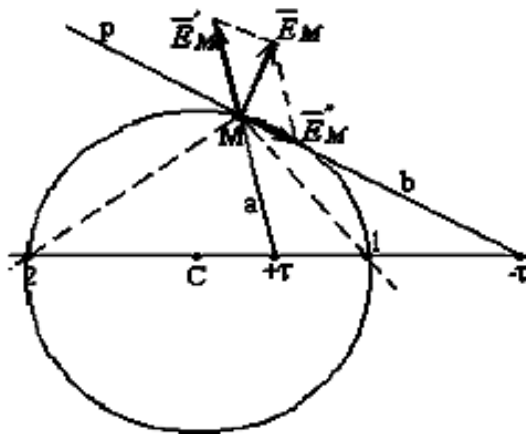


Рис. 1.3 – Две заряженные оси

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:  $\overline{E}_M = \overline{E}'_M + \overline{E}''_M$ , где  $\overline{E}'_M$  и  $\overline{E}''_M$  – составляющие, создаваемые положительно и отрицательно заряженной осью соответственно. Величины этих составляющих могут быть определены по формулам:

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

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).

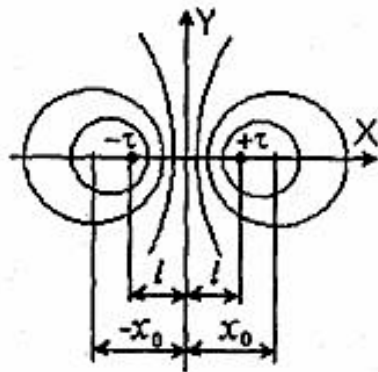


Рис. 1.4 – Эквипотенциальные линии двух заряженных осей

С практической точки зрения рассмотрим электростатическое поле и ёмкость двухпроводной линии электропередачи ЛЭП (см. рис. 1.5).

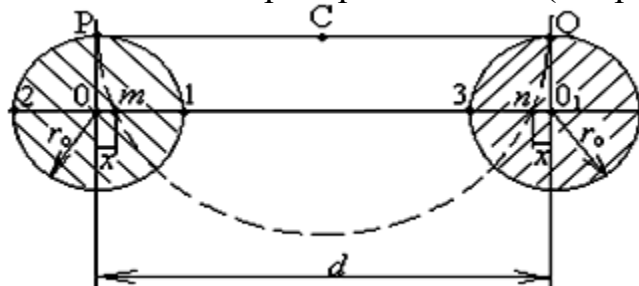


Рис. 1.5 – Провода ЛЭП

Пусть провода ЛЭП имеют одинаковый радиус  $r_0$ , расположены на расстоянии  $d$  друг от друга и находятся в среде с проницаемостью  $\epsilon_a$ . Если левому проводу сообщен заряд  $\tau$  на единицу длины, правому  $-\tau$ , то в пространстве между проводами возникнет электростатическое поле, которое можно представить в виде части поля двух заряженных осей. Действительно, поскольку провода металлические, то внутри них поля нет ( $E=0$ ), а потенциал всех точек каждого провода одинаков, т.е. поверхность каждого провода является эквипотенциальной. Поэтому две заряженные оси, расположенные в точках  $m$  и  $n$ , создадут такую же картину поля как и двухпроводная ЛЭП, если точки  $m$  и  $n$  расположить так, чтобы поверхности проводов были для них эквипотенциалами. Точки  $m$  и  $n$  принято называть электрическими осями в отличие от геометрических осей (точки  $O$  и  $O1$ ). Смещение электрических и

геометрических осей ( $x$ ) в силу симметрии одинаково в левом и правом проводе. Для определения величины  $x$  возьмём точки 1 и 2 и запишем выражения потенциалов этих точек в поле двух заряженных осей, расположенных в точках  $m$  и  $n$ :

$$\varphi_1 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b}{a} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{d-r_o-x}{r_o-x}; \quad \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b}{a} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{d+r_o-x}{r_o+x}. \quad (1.25)$$

Так как точки 1 и 2 расположены на поверхности одного и того же провода, 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

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

относительно  $x$ , получим

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 ( $\hat{O} = \frac{\hat{E}\hat{e}}{\hat{A}}$ ). 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

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

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 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.

### 3. Задание для работы

12) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского конденсатора.

13) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.

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

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

#### ***4.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского конденсатора.***

4.1.1. Исходные данные для моделирования – плоский конденсатор длиной  $L$  и зазором (расстоянием) между пластин  $d$  создает электрическое поле напряженностью  $E$ . Заряженная частица массой  $m_0$ , обладающая зарядом  $q$ , изначально движется со скоростью  $V_0$ . 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.  $x_0=y_0=z_0=0$ . Скорость частицы в начальный момент времени направлена вдоль оси  $x$ , т.е.  $\dot{x}_0 = V_0$ ,  $\dot{y}_0 = \dot{z}_0 = 0$ .

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

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        |

| Вариант | $L, м$ | $d, м$ | $m_0, кг$            | $q, Кл$               | $E, В/м$            | $V_0, м/с$ |
|---------|--------|--------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------|
| 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         |

#### 4.1.2. Алгоритм расчета траектории движения в системе «Mathcad».

- 1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:  $L, d, E, m, q, V_0$ .
- 2) Для решения системы дифференциальных уравнений (1.17) необходимо воспользоваться функцией *rkfixed*, которая использует для поиска решения метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

Для этого выполнить следующие операции:

– сформировать вектор начальных условий:

$$u := \begin{pmatrix} 0 \\ v_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow x(0) - \text{координата частицы в начальный момент времени вдоль оси X} \\ \leftarrow x'(0) - \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси X} \\ \leftarrow y(0) - \text{координата частицы в начальный момент времени вдоль оси Y} \\ \leftarrow y'(0) - \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Y} \\ \leftarrow z(0) - \text{координата частицы в начальный момент времени вдоль оси Z} \\ \leftarrow z'(0) - \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Z} \end{array}$$

– сформировать вектор первых и вторых производных:

$$D(t, u) := \begin{pmatrix} u_1 \\ 0 \\ u_3 \\ \frac{q \cdot E}{m_0} \\ u_5 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow x'(t) - \text{первая производная x по t} \\ \leftarrow x''(t) - \text{вторая производная x по t} \\ \leftarrow y'(t) - \text{первая производная y по t} \\ \leftarrow y''(t) - \text{вторая производная y по t} \\ \leftarrow z'(t) - \text{первая производная z по t} \\ \leftarrow z''(t) - \text{вторая производная z по t} \end{array}$$

3) Задать граничные точки интервала  $t1 := 0$ ,  $t2 := 100$ , на котором будет искаться решение дифференциальных уравнений с помощью функции `rkfixed`, а также число точек  $N := 100$ , в которых ищется приближенное решение.

4) Ввести функцию `rkfixed`, которая возвращает матрицу, в которой первый столбец содержит точки, в которых должны быть найдены решения; остальные столбцы содержат значения решений и их производных

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

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

$$x := \frac{L}{N \cdot t2} \cdot (Z)^{\langle 1 \rangle} \quad y := Z^{\langle 3 \rangle},$$

где оператор  $Z^{\langle n \rangle}$  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 параметры только оси абсцисс от 0 до  $L$ .

6) Построить график зависимости ускорения движения частицы от координаты, т.е. график зависимости  $a(x)$ . Для этого ввести оператор:

$$A := Z^{\langle n \rangle}.$$

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

4.1.3. 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  $y(x)$ .

4.1.4. 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  $y(x)$ .

4.1.5. 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  $y(x)$ .

4.1.6. 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  $y(x)$ .

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

#### 4.2. Смоделировать и рассчитать электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.

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

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 |       |       |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | $x_1$  | $y_1$ | $z_1$ | $x_2$ | $y_2$ | $z_2$ |
| 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 |
| 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  |

| Вариант | № источн. | Заряд q            | x1  | y1 | z1 | Вариант | № источн. | Заряд q            | x1  | y1 | z1 |
|---------|-----------|--------------------|-----|----|----|---------|-----------|--------------------|-----|----|----|
|         | 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  |

#### 4.2.2. Алгоритм расчета поля в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

– диэлектрическую проницаемость вакуума или электрическую постоянную  $\varepsilon_o = 10^{-9}/36 \cdot \pi$  ;

– относительную диэлектрическую проницаемость среды  $\varepsilon = 1$  ;

– абсолютную диэлектрическую проницаемость среды  $\varepsilon_a = \varepsilon_o \cdot \varepsilon$  ;

– массив точек, в которых располагаются заряды,  $i = 0 \dots 9$  ;

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

– 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  $EX, EY, EZ$ :

$$E_{k,i} := \frac{q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_a \cdot \{r_{k,i}\}^2}$$

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

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

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

$$EPX_k := \{EP_k\}_0 \quad EPY_k := \{EP_k\}_1 \quad EPZ_k := \{EP_k\}_2$$

$$EPP_k := \sqrt{\{EPX_k\}^2 + \left[\{EPY_k\}^2 + \left[\{EPZ_k\}^2\right]\right]}$$

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:

| $x_{p1_k} =$ | $y_{p1_k} =$ | $z_{p1_k} =$ | $r_{k,0} =$ | $r_{k,1} =$ | $r_{k,2} =$ |
|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| -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) Поостроить графики зависимости модуля суммарного поля **ERP** 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.

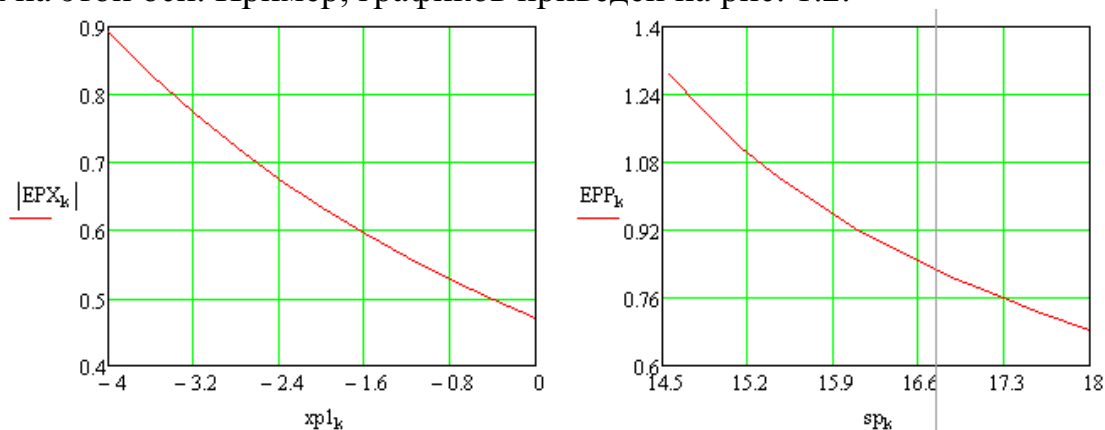


Рис. 1.2

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 **ERP** от расстояния **sp** и модуля его проекций **EPX**, **EPY**, **EPZ** на координатные оси.

4.2.4. 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 **ERP** от расстояния **sp**.
- 2) Взять исходные данные любого другого варианта и внести координаты  $x_n$ ,  $y_n$ ,  $z_n$  и величины зарядов  $q$  в одностолбцовые матрицы вместо нулевых элементов. Провести вычисления и построить новый график зависимости модуля суммарного поля **ERP** от расстояния **sp**.

4.2.5. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

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

4.3.1. Исходные данные для моделирования: прямой нитевидный проводник длиной  $l = 10$  м в фиксированный момент времени имеет линейный заряд, величиной  $I$ . 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 явления 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  $I$  в пикокулонах на метр; координаты размещения проводника ( $XI$ ,  $YI$ ) в плоскости  $XOY$  пространства; координаты смещения ( $X$ ,  $Y$ ) 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 | $I, \text{пКл/м}$    | $XI, \text{м}$ | $YI, \text{м}$ | $X, \text{м}$ | $Y, \text{м}$ |
|---------|----------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 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             |

| Вариант | $l, \text{ нКл/м}$   | $X1, \text{ м}$ | $Y1, \text{ м}$ | $X, \text{ м}$ | $Y, \text{ м}$ |
|---------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 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             |

#### 4.3.2. Алгоритм моделирования электрического поля в системе «Mathcad»:

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

– функцию  $\text{ORIGIN}=1$  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  $l = 10 \text{ м}$  ;

– величину линейного заряда первого проводника  $l$  ;

– величину линейного заряда второго проводника  $2$  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  $X, Y$  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

$$U1_{x,y} := \frac{-\tau1 \cdot \log(r1_{x,y} + 1, e^1)}{2\pi \cdot \epsilon_a} \quad U2_{x,y} := \frac{-\tau2 \cdot \log(r2_{x,y} + 1, e^1)}{2\pi \cdot \epsilon_a} ;$$

– 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

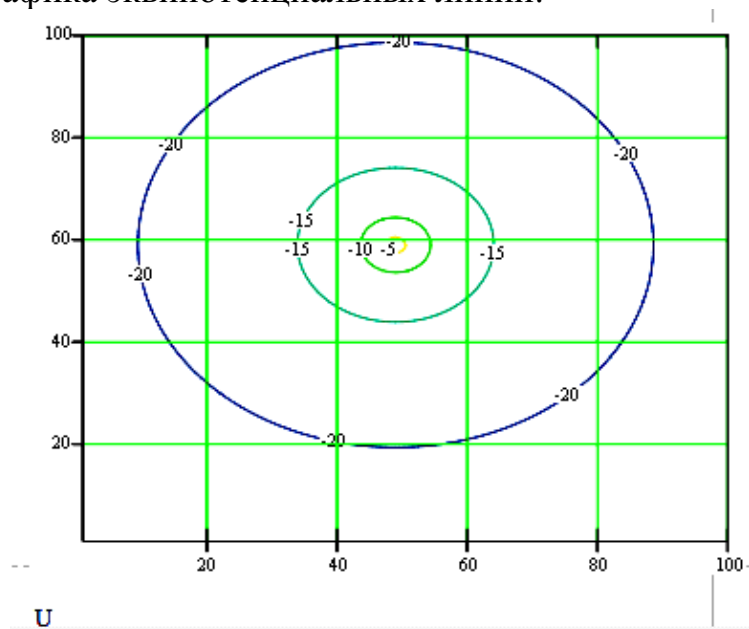
$$E := \frac{\Delta U}{d} \quad D := \epsilon a \cdot E ;$$

– электрической емкости проводников

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

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:



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

1) Последовательно устанавливая величину линейного заряда второго проводника  $2$ , равную  $-0,5\tau l$ ;  $-0,6\tau l$ ;  $-0,7\tau l$ ;  $-0,8\tau l$ ;  $-0,9\tau l$   $-\tau l$ , провести исследования:

– зависимости вида отображения поля от соотношения величин линейных зарядов  $1/2$  проводников, построив графики эквипотенциальных линий электрического поля, создаваемого двумя тонкими заряженными проводниками;

– зависимости модуля напряженности поля  $E$  между проводниками от соотношения величин линейных зарядов  $1/2$  проводников, построив соответствующий график;

– зависимости модуля вектора электрической индукции поля  $D$  между проводниками от соотношения величин линейных зарядов  $1/2$  проводников, построив соответствующий график;

– зависимости величины емкости электрических проводников  $C$  от соотношения величин их линейных зарядов  $l/2$ , построив соответствующий график.

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

- для этого установить следующие исходные данные:  $U = -1$ ,  $Y = 0$ ;
- изменяя расстояние  $X$  от 1 до 10, построить график зависимости электрической емкости  $C$  от расстояния между проводниками  $d$ ;
- установить  $X = 1$ , 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  $\epsilon$  среды между проводниками от 1 до 10, построить график зависимости электрической емкости  $C$  от абсолютной диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon_a$ .

#### ***4.4. 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.

#### **5. 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:**

7) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

8) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

9) Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОЛН

### УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Моделирование и исследование явления электромагнитной индукции. Моделирование и исследование электромагнитных волн.

### СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

#### ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

#### ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ

### 3 - 4. 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

$$\vec{F}_\text{Л} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}]. \quad (2.1)$$

Эта сила перпендикулярна к скорости  $\vec{v}$  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  $\vec{B}$ , то сила  $\vec{F}_\text{Л}$  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  $\vec{F}_\text{Л} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] = q \vec{v} \times \vec{B}$  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  $\omega$  противоположны. Если же заряд  $q$  отрицателен, то эти направления совпадают.

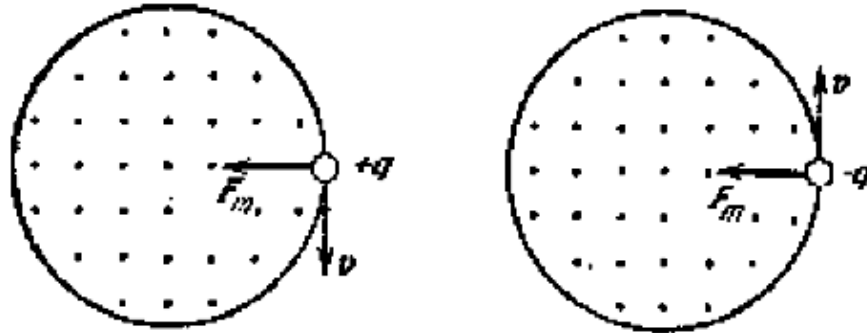


Рис. 2.1 – Движение частицы в магнитном поле по окружности

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.

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}. \quad (2.2)$$

Следовательно, радиус окружности пропорционален скорости движения частицы

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}, \quad (2.3)$$

отношение  $q/m$  - называют удельным зарядом частицы.

При скорости  $v$ , намного меньшей скорости света, круговая частота  $\omega$  не зависит от  $v$ , т.е.

$$\omega = \frac{|q| \cdot B}{m}. \quad (2.4)$$

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

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{|q| \cdot B}, \quad (2.5)$$

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

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

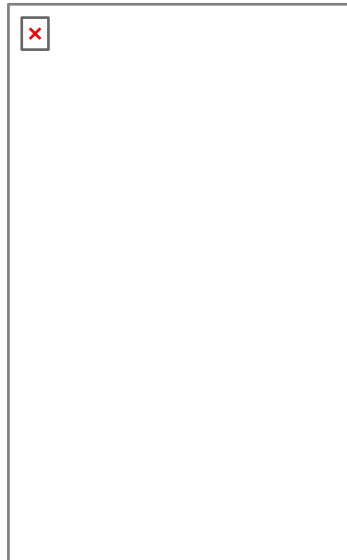


Рис. 2.2 – Движение заряженной частицы в магнитном поле по спирали

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.  $V_{\parallel} = V \cos \alpha$ ;

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

$$r = \frac{m \cdot v \cdot \sin \alpha}{q \cdot B}, \quad (2.6)$$

В результате сложения двух данных движений возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю (см. рис. 2.2). Шаг винтовой (спиральной) линии равен

$$h = v \cos \alpha \cdot T = \frac{2\pi \cdot m \cdot v \cdot \cos \alpha}{q \cdot B}. \quad (2.7)$$

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

Если скорость заряженной частицы составляет угол  $\alpha$  с направлением вектора  $\vec{B}$  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: . 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 поле 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

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}, \vec{B}] = q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ 0 & B & 0 \end{vmatrix} = -\dot{z} B \vec{i} + \dot{x} B \vec{k} \quad (2.8)$$

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

$$\begin{cases} \frac{d(m_0 \cdot \dot{x})}{dt} = -B \dot{z} q \\ \frac{d(m_0 \cdot \dot{y})}{dt} = 0 \\ \frac{d(m_0 \cdot \dot{z})}{dt} = B \dot{x} q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ddot{x} = -\frac{qB}{m_0} \dot{z} \\ \ddot{y} = 0 \\ \ddot{z} = \frac{qB}{m_0} \dot{x} \end{cases} \quad (2.9)$$

### 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  $\ell_2$  с током  $I_2$ , то на него будет действовать сила:

$$F = \frac{\mu_a I_1}{2\pi r} I_2 \ell_2 \quad (2.10)$$

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,  $\mu_a$  генри/метр (Гн/м). Это магнитная постоянная или магнитная проницаемость. Различают абсолютную  $\mu_a$ , относительную  $\propto$  магнитную проницаемость и магнитную проницаемость вакуума  $\mu_o = 4 \cdot 10^{-7} = 1.26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.,

$$\mu_a = \mu \mu_o \quad (2.11)$$

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

$$\vec{B} = \frac{\mu_a I_1}{2\pi r} [\vec{e}_{I1} \times \vec{e}_r] \text{ тесла (Тл)}. \quad (2.12)$$

Вместе с магнитной индукцией вводят напряженность магнитного поля  $\vec{H}$ . Напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией через магнитную проницаемость

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_a \text{ (A/m)} . \quad (2.13)$$

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

$$\vec{j}_\Sigma = dI/dS \cdot \vec{e}_S . \quad (2.14)$$

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

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_\Sigma + \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} . \quad (2.15)$$

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

$$\oint_S \text{rot } \vec{H} d\vec{S} = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_\Sigma + \epsilon_a \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{S} . \quad (2.16)$$

Анализ соотношений (2.15) и (2.16) показывает, что они выглядят несколько сложнее выражений для расчета электрического поля (1.8) и (1.9). Это связано с двумя причинами. Во-первых, в левой части уравнения (2.15) 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 (1.8) можно представить в виде скалярного произведения  $\epsilon_a \vec{\nabla} \vec{E}$ , а левую часть уравнения (2.15) в виде векторного произведения  $\vec{\nabla} \times \vec{H}$ .

Во-вторых, в уравнении (2.16) в правой части кроме плотности тока присутствует еще одно слагаемое:

$$\vec{j}_{\Sigma \text{ см}} = \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} . \quad (2.17)$$

Из структуры выражения (2.16) 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 (2.15) 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 (2.15) и (2.16) можно записать для переменных токов, изменяющихся с определенной круговой частотой, воспользовавшись методом комплексных амплитуд.

$$\text{rot} \dot{\underline{H}} = \dot{\underline{j}}_b + i\omega \underline{\epsilon}_n \dot{\underline{E}} \quad (2.18)$$

$$\oint_L \dot{\underline{H}} d\bar{l} = \dot{\underline{I}}_b + i\omega \int_S \underline{\epsilon}_n \dot{\underline{E}} d\bar{S} \quad (2.19)$$

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 (2.20), интегральной (2.21) форме и для комплексной амплитуды напряженности полей (2.22), (2.23).

$$\text{rot} \bar{\underline{E}} = -\bar{\underline{j}}_m - \mu_0 \frac{\partial \bar{\underline{H}}}{\partial t} \quad (2.20)$$

$$\oint_L \bar{\underline{E}} d\bar{l} = -\bar{\underline{I}}_m - \mu_0 \int_S \frac{\partial \bar{\underline{H}}}{\partial t} d\bar{S} \quad (2.21)$$

$$\text{rot} \bar{\underline{E}} = -\bar{\underline{j}}_m - i\omega \underline{\mu}_n \bar{\underline{H}} \quad (2.22)$$

$$\oint_L \bar{\underline{E}} d\bar{l} = -\bar{\underline{I}}_m - i\omega \int_S \underline{\mu}_n \bar{\underline{H}} d\bar{S} \quad (2.23)$$

### 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. 2.3). Необходимо рассчитать магнитное поле в точке  $c$ .

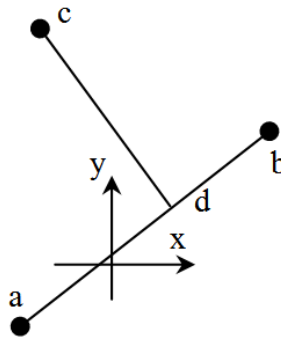


Рис. 2.3.

Магнитная индукция для бесконечного проводника с током рассчитывается из соотношения

$$\vec{B} := \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} [\vec{e}_l \times \vec{e}_r] \quad (2.24).$$

Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  представляет собой векторное произведение и направлен перпендикулярно двум прямым  $ab$  и  $cd$  (см. рис. 2.3). 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:

$$x(y_k - y_n) + y(x_n - x_k) + (x_k y_n - x_n y_k) = 0, \quad (2.25)$$

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

$$r(x_p, y_p) := \pm \frac{Ax_p + By_p + C}{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot (-\text{sign}C)}. \quad (2.26)$$

Итак, все величины в выражении (2.24) 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.

$$BS(xp, yp) := \sum_i BI(xp, yp)_i \quad (2.27)$$

Если в переменную 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

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\dot{I}_M - i\omega \int_S \mu_n \vec{H} d\vec{S} = -\dot{I}_M - i\omega \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (2.28)$$

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  $(ixm \cdot iym)$  числе точек подсчитана магнитная индукция, то интеграл можно заменить суммой по поверхности прямоугольника площадью  $x1 \cdot y1$ , т.е.

$$\frac{1}{-i\omega} \oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \vec{B} d\vec{S} \approx \sum_k B_k \Delta S_k = \Delta S \sum_k B_k = \frac{x1 \cdot y1}{ixm \cdot iym} \sum_k B_k \quad (2.29)$$

Тогда для расчета ЭДС нужно ввести выражение:

$$E = -i\omega \frac{x1 \cdot y1}{ixm \cdot iym} \sum_{ix} \sum_{iy} BS_{ix, iy} \quad (2.30)$$

### 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

Варианты заданий для моделирования и исследований приведены в таблицах 1.2, 2.1 – 2.2.

#### 3. Задание для работы

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.

3) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.

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

#### **4.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в магнитном поле.**

4.1.1. Исходные данные для моделирования – в трехмерном пространстве существует однородное магнитное поле, у которого вектор магнитной индукции  $\vec{A}$  направлен в вдоль оси  $Y$ . В пространство поля попадает заряженная частица массой  $m_0$ , обладающая зарядом  $q$ , движущаяся со скоростью  $V_0$ . В начальный момент времени координаты частицы были равными нулю, а вектор скорости направлен вдоль оси  $X$ . Исходные данные для каждого варианта приведены в таблице 2.1.

Задача моделирования – в системе «Mathcad» получить траекторию движения заряженной частицы в однородном магнитном поле.

Таблица 2.1 – Исходные данные моделирования.

| <b>Вариант</b> | <b><math>m_0</math>, кг</b> | <b><math>q</math>, Кл</b> | <b><math>B</math>, В/м</b> | <b><math>V_0</math>, м/с</b> | <b><math>\alpha</math>, град</b> |
|----------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1.             | $1,7 \cdot 10^{-27}$        | $1,6 \cdot 10^{-19}$      | $10 \cdot 10^{-8}$         | 1000                         | 10                               |
| 2.             | $1,8 \cdot 10^{-27}$        | $3,2 \cdot 10^{-19}$      | $9 \cdot 10^{-8}$          | 1100                         | 20                               |
| 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                         | 75                               |
| 10.            | $1,5 \cdot 10^{-27}$        | $-1,6 \cdot 10^{-19}$     | $1 \cdot 10^{-8}$          | 900                          | 65                               |
| 11.            | $1,4 \cdot 10^{-27}$        | $-1,6 \cdot 10^{-19}$     | $1,5 \cdot 10^{-8}$        | 800                          | 55                               |
| 12.            | $1,3 \cdot 10^{-27}$        | $1,6 \cdot 10^{-19}$      | $2,5 \cdot 10^{-8}$        | 700                          | 45                               |
| 13.            | $1,6 \cdot 10^{-27}$        | $-1,6 \cdot 10^{-19}$     | $3,5 \cdot 10^{-8}$        | 1100                         | 35                               |
| 14.            | $1,8 \cdot 10^{-27}$        | $-3,2 \cdot 10^{-19}$     | $4,5 \cdot 10^{-8}$        | 1200                         | 25                               |
| 15.            | $1,9 \cdot 10^{-27}$        | $-4,8 \cdot 10^{-19}$     | $5,5 \cdot 10^{-8}$        | 1300                         | 15                               |
| 16.            | $2 \cdot 10^{-27}$          | $1,6 \cdot 10^{-19}$      | $6,5 \cdot 10^{-8}$        | 1000                         | 20                               |
| 17.            | $2,1 \cdot 10^{-27}$        | $3,2 \cdot 10^{-19}$      | $7,5 \cdot 10^{-8}$        | 900                          | 25                               |
| 18.            | $2,2 \cdot 10^{-27}$        | $4,8 \cdot 10^{-19}$      | $8,5 \cdot 10^{-8}$        | 800                          | 30                               |
| 19.            | $1,7 \cdot 10^{-27}$        | $3,2 \cdot 10^{-19}$      | $9,5 \cdot 10^{-8}$        | 700                          | 35                               |
| 20.            | $1,5 \cdot 10^{-27}$        | $-3,2 \cdot 10^{-19}$     | $5,7 \cdot 10^{-8}$        | 600                          | 40                               |
| 21.            | $1,4 \cdot 10^{-27}$        | $1,6 \cdot 10^{-19}$      | $8,7 \cdot 10^{-8}$        | 500                          | 45                               |
| 22.            | $1,3 \cdot 10^{-27}$        | $-1,6 \cdot 10^{-19}$     | $6,6 \cdot 10^{-8}$        | 600                          | 50                               |
| 23.            | $1,2 \cdot 10^{-27}$        | $1,6 \cdot 10^{-19}$      | $4,3 \cdot 10^{-8}$        | 700                          | 55                               |
| 24.            | $1,8 \cdot 10^{-27}$        | $-1,6 \cdot 10^{-19}$     | $3,8 \cdot 10^{-8}$        | 800                          | 60                               |
| 25.            | $1,9 \cdot 10^{-27}$        | $-3,2 \cdot 10^{-19}$     | $7,2 \cdot 10^{-8}$        | 900                          | 65                               |

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

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:  $B$ ,  $m$ ,  $q$ ,  $V_0$ .

2) Для решения системы дифференциальных уравнений (2.9) необходимо воспользоваться функцией *rkfixed*, которая использует для поиска решения метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

Для этого выполнить следующие операции:

– сформировать вектор начальных условий:

$$u := \begin{pmatrix} 0 \\ v_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow x(0) - \text{координата частицы в начальный момент времени вдоль оси X} \\ \leftarrow x'(0) - \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси X} \\ \leftarrow y(0) - \text{координата частицы в начальный момент времени вдоль оси Y} \\ \leftarrow y'(0) - \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Y} \\ \leftarrow z(0) - \text{координата частицы в начальный момент времени вдоль оси Z} \\ \leftarrow z'(0) - \text{скорость частицы в начальный момент времени вдоль оси Z} \end{array}$$

– сформировать вектор первых и вторых производных:

$$D(t, u) := \begin{pmatrix} u_1 \\ -\frac{B \cdot q}{m_0} \cdot u_5 \\ u_3 \\ 0 \\ u_5 \\ \frac{B \cdot q}{m_0} \cdot u_1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow x'(t) - \text{первая производная x по t} \\ \leftarrow x''(t) - \text{вторая производная x по t} \\ \leftarrow y'(t) - \text{первая производная y по t} \\ \leftarrow y''(t) - \text{вторая производная y по t} \\ \leftarrow z'(t) - \text{первая производная z по t} \\ \leftarrow z''(t) - \text{вторая производная z по t} \end{array}$$

3) Задать граничные точки интервала  $t1 := 0$ ,  $t2 := 10$ , на котором будет искомое решение дифференциальных уравнений с помощью функции *rkfixed*, а также число точек  $N := 10000$ , в которых ищется приближенное решение.

4) Ввести функцию *rkfixed*, которая возвращает матрицу, в которой первый столбец содержит точки, в которых должны быть найдены решения; остальные столбцы содержат значения решений и их производных

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

5) Построить траекторию движения частицы, т.е. график зависимости  $z(x)$ , т.к. траектория находится в плоскости ZOY. Для этого ввести операторы:

$$x := Z^{\langle 1 \rangle} \quad z := Z^{\langle 5 \rangle},$$

где оператор  $Z^{\langle n \rangle}$  означает выделение  $n$ -го столбца матрицы  $Z$ .

На панели инструментов последовательно нажать на значки (пиктограммы)   $\rightarrow$   (или Вставка  $\rightarrow$  График  $\rightarrow$  X-Y график). В открывшемся шаблоне графика в месте ввода функции вставить  $z$ , в месте ввода переменной  $x$ .

6) Рассчитать радиус окружности траектории движения, для этого в программу ввести оператор

$$R_{\text{кр}} := \frac{m_0 \cdot v_0}{|q| \cdot B}.$$

4.1.3. Провести исследование зависимости траектории движения частицы от величины магнитной индукции  $B$ . Для этого сначала уменьшить заданную магнитную индукцию поля в 2 раз, а затем исходную увеличить в 2 раз. Для каждого значения произвести расчет радиуса  $R$  и построить графики

зависимости  $z(x)$ . Установить зависимость радиуса  $R$  от величины магнитной индукции  $B$ .

4.1.4. 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 произвести расчет радиуса  $R$  и построить графики зависимости  $z(x)$ . Установить зависимость радиуса  $R$  от величины начальной скорости движения  $V_0$ .

4.1.5. 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 радиуса  $R$  и построить графики зависимости  $z(x)$ . Установить зависимость радиуса  $R$  от величины начальной массы  $m_0$  заряда.

4.1.6. 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 произвести расчет радиуса  $R$  и построить графики зависимости  $z(x)$ . Установить зависимость радиуса  $R$  от величины заряда  $q$ .

4.1.7. Провести моделирование общего случая, когда вектор скорости направлен под углом к магнитному полю, отличным от  $90^\circ$ .

1) Внести изменение в программу:

- в рабочем окне программы в области исходных данных ввести значение угла ;
- ввести операторы для расчета проекций вектора скорости на оси координат:

$$v_x := V_0 \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot 2\pi}{360}\right) \quad v_y := V_0 \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot 2\pi}{360}\right) \quad v_z := 0 ;$$

- внести изменения в вектор начальных условий следующим образом:

$$u := \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \\ 0 \\ v_y \\ 0 \\ v_z \end{pmatrix}$$

- ввести оператор для расчета шага винтовой (спиральной) линии траектории движения заряда

$$h := \frac{2\pi \cdot m_0 \cdot \left( V_0 \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot 2\pi}{360}\right) \right)}{|q| \cdot B} ;$$

- вывести 3-х мерный график траектории движения частицы; для этого 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 координаты функции ( $x, y, z$ ).

2) Последовательно провести исследование зависимости траектории движения от величины магнитной индукции  $B$ , от начальной скорости движения  $V_0$ , от массы  $m_0$ , от величины заряда  $q$  и его знака. Для этого повторить выполнение пунктов 4.1.3 – 4.1.6, рассчитав для каждого случая шаг винтовой (спиральной) линии  $h$ , построив графики траекторий движения, установить зависимость  $h$  от перечисленных величин.

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

## 4.2. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» магнитное поле от дискретного набора постоянных электрических токов.

4.2.1. 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 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 2.2.

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 1.2.

Таблица 2.2 – 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      |

| Вариант | № провод. | Ток, мА                  | x <sub>n1</sub> | y <sub>n1</sub> | x <sub>k1</sub> | y <sub>k1</sub> | Вариант | № провод. | Ток, мА                  | x <sub>n1</sub> | y <sub>n1</sub> | x <sub>k1</sub> | y <sub>k1</sub> |
|---------|-----------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|-----------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4       | 4         | $(25+19j) \cdot 10^{-3}$ | -7              | -3              | -1              | -4              | 17      | 4         | $(45+21j) \cdot 10^{-3}$ | -8              | -10             | -8              | -4              |
|         | 1         | $(17-11j) \cdot 10^{-3}$ | -8              | -4              | -3              | -5              |         | 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             |
|         | 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              |

4.2.2. Построить на одном рисунке геометрическую модель проводников и прямоугольной области, в которой производится расчет магнитного поля.

#### 4.2.3. Алгоритм расчета поля в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- оператор ORIGIN=1, обеспечивающий нумерацию элементов матриц и массивов, начиная с единицы;
- диэлектрическую проницаемость вакуума или электрическую постоянную  $\varepsilon_o = 10^{-9}/36 \cdot \pi$  ;
- относительную диэлектрическую проницаемость среды  $\varepsilon = 1$ ;
- магнитную проницаемость вакуума или магнитную постоянную  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  ;
- относительную магнитную проницаемость среды  $\mu = 1$ ;
- номер проводника с током,  $i = 1 \dots 4$  ;
- координаты начальных точек  $xn, yn$  и конечных точек  $xk, yk$ , через которые проходят проводники, а также величины их токов, взяв из таблицы 2.2 только реальную часть, в виде одностолбцовых четырех элементных матриц, например

$$\begin{matrix}
 xn := \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 8 \\ 8 \end{pmatrix} & yn := \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 6 \\ 3 \end{pmatrix} & xk := \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \\ 8 \\ 2 \end{pmatrix} & yk := \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} & I := \begin{pmatrix} 11 \cdot 10^{-3} \\ 12 \cdot 10^{-3} \\ 13 \cdot 10^{-3} \\ 14 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

- координаты диагонали прямоугольной области  $(x1, y1), (x2, y2)$ , в точках которого рассчитывается магнитное поле;
- 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 -  $ix := 1 \dots M \quad iy := 1 \dots M$  .

2) Ввести формулы для промежуточных расчетов:

- абсолютной диэлектрической проницаемости среды  $\varepsilon_a = \varepsilon_o \cdot \varepsilon$  ;
- абсолютной магнитной проницаемости среды  $\mu_a = \mu_o \cdot \mu$  ;
- текущих координаты по оси x и y для точек, в которых будет рассчитываться магнитное поле:

$$\begin{matrix}
 xp_{ix} := x1 + \frac{ix \cdot (x2 - x1)}{M} & yp_{iy} := y1 + \frac{iy \cdot (y2 - y1)}{M}
 \end{matrix}$$

- матриц коэффициентов уравнения i-ой прямой, описывающей проводник, по которому проходит ток:

$$\begin{matrix}
 A_i := yk_i - yn_i & B_i := (xn_i - xk_i) & C_i := xk_i \cdot yn_i - xn_i \cdot yk_i
 \end{matrix}$$

3) Ввести формулы для расчетов:

– кратчайшего расстояния от точки, для которой проводится расчет, до всех прямых линий на которых расположены проводники с током

$$R1_{ix,iy} := \frac{A_1 \cdot xp_{ix} + B_1 \cdot yp_{iy} + C_1}{\left| \sqrt{(A_1)^2 + (B_1)^2} \cdot \{\text{sign}(C_1)\} \right|} \quad R2_{ix,iy} := \frac{A_2 \cdot xp_{ix} + B_2 \cdot yp_{iy} + C_2}{\left| \sqrt{(A_2)^2 + (B_2)^2} \cdot \{-\text{sign}(C_2)\} \right|}$$

$$R3_{ix,iy} := \frac{A_3 \cdot xp_{ix} + B_3 \cdot yp_{iy} + C_3}{\left| \sqrt{(A_3)^2 + (B_3)^2} \cdot \{\text{sign}(C_3)\} \right|} \quad R4_{ix,iy} := \frac{A_4 \cdot xp_{ix} + B_4 \cdot yp_{iy} + C_4}{\left| \sqrt{(A_4)^2 + (B_4)^2} \cdot \{-\text{sign}(C_4)\} \right|} ;$$

– магнитного поля в текущей точке от каждого проводника

$$BI1_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_1}{2\pi \cdot R1_{ix,iy}} \quad BI2_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_2}{2\pi \cdot R2_{ix,iy}} \quad BI3_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_3}{2\pi \cdot R3_{ix,iy}} \quad BI4_{ix,iy} := \frac{\mu a \cdot I_4}{2\pi \cdot R4_{ix,iy}} ;$$

– величину суммарного магнитного поля в рассматриваемых точках пространства:

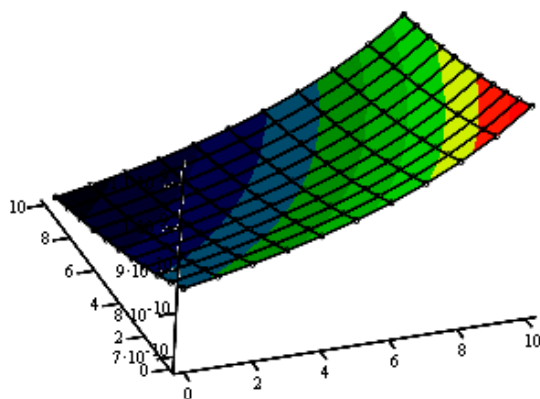
$$BS := BI1 + BI2 + BI3 + BI4 ;$$

– величину напряженности магнитного поля в рассматриваемых точках пространства:

$$\underline{\underline{H}} := \frac{BS}{\mu a} .$$

4) Поострить 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 рисунке.



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.

4.2.5. 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;

4.2.6. 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.

4.2.7. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

### ***4.3. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.***

4.3.1. 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 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 2.2. Частота переменного тока задается номером варианта, умноженным на  $10^5$  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 1.2.

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.

4.3.2. Загрузить в системе «Mathcad» файл с программой, разработанной при выполнении предыдущего задания, и сохранить его под новым именем.

4.3.3. 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  $f$ ;
- 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

$$t := 0, \frac{6\pi}{100 \cdot \omega} .. \frac{120\pi}{\omega}$$

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  $t = 10^{-6}$ .

4.3.4. 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  $|A|$  от частоты  $f$ . В отчете привести графики зависимости ЭДС от времени для частот переменного тока  $f$  и  $11f$ .

4.3.5. 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.

4.3.6. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

**4.4. 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.

## **5. 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:**

10) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

11) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

12) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И 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  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  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

$$\Delta \vec{H} + \gamma^2 \vec{H} = -\text{rot } \vec{j}_\Sigma + i\omega \epsilon_a \vec{j}_M + \text{grad } \frac{\rho_M}{\mu_n}; \quad (3.1)$$

$$\Delta \vec{E} + \gamma^2 \vec{E} = \text{rot } \vec{j}_M + i\omega \mu_a \vec{j}_\Sigma + \text{grad } \frac{\rho_\Sigma}{\epsilon_n}, \quad (3.2)$$

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.

$$\Delta \vec{H} + \gamma^2 \vec{H} = 0; \quad (3.3)$$

$$\Delta \vec{E} + \gamma^2 \vec{E} = 0. \quad (3.4)$$

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:

$$\begin{aligned} \int_V \text{div} [\vec{E} \times \vec{H}] \cdot dV &= \oint_S [\vec{E} \times \vec{H}] dS = \oint_S \vec{P} dS = \\ &= - \int_V (\vec{j}_M \vec{H} + \vec{j}_\Sigma \vec{E}) \cdot dV - \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu_a H^2}{2} + \frac{\epsilon_a E^2}{2} \right) \cdot dV, \end{aligned} \quad (3.5)$$

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

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.6)$$

через поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ . Источник вектора Пойнтинга (см. первый интеграл в верхней строке выражения (3.5)) – изменение мощности токов, протекающих в поле (первый интеграл в нижней части выражения (3.5)) 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

$$\dot{\vec{\Pi}} = \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^* \quad P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\dot{\vec{\Pi}}) \quad Q = \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\dot{\vec{\Pi}}) \quad S = \frac{1}{2} \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.7)$$

Вектор содержит действительную часть – активную мощность  $P$  и мнимую часть  $Q$  – реактивную мощность. Если между векторами  $E$  и  $H$  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 распространения. 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  $\Pi_z$ , которую можно найти, спроектировав выражение (3.6) на ось  $z$ .

$$\bar{\Pi}_z = \bar{e}_z (\bar{E}_x \bar{H}_y - \bar{E}_y \bar{H}_x) \quad (3.8)$$

Отсюда следует, что в плоской волне отличны от нуля только поперечные составляющие электромагнитного поля. Электромагнитное поле поперечное.

В плоскости перпендикулярной направлению распространения (плоскость  $ХОУ$ ) координатные оси пока можно расположить произвольно. Направим ось  $x$  по электрическому полю, тогда  $E_y = 0$ . Теперь, в выражении (3.8) останется одно слагаемое,

$$\bar{\Pi}_z = \bar{e}_z \bar{E}_x \bar{H}_y \quad (3.9)$$

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:

$$\vec{E}_x = A \exp(-i \underline{\gamma} z), \quad (3.10)$$

$$\vec{H}_y = \frac{A}{Z_c} \exp(-i \underline{\gamma} z), \quad (3.11)$$

$$\underline{\gamma} = \omega \sqrt{\epsilon_n \mu_n}, \quad Z_c = \frac{\underline{\gamma}}{\omega \mu_n} = \sqrt{\frac{\mu_n}{\epsilon_n}} \quad (3.12)$$

Величину  $Z_c$  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 (3.10, 3.11) входит комплексная постоянная распространения  $\underline{\gamma}$ . Ее действительная и мнимая часть по-разному влияют на свойства электромагнитного поля. Обычно ее записывают в таком виде:

$$\underline{\gamma} = \beta - i\alpha \quad (3.13)$$

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

$$\vec{E}_x = A \exp(-\alpha z) \exp(-i \beta z), \quad (3.14)$$

$$\vec{H}_y = \frac{A}{Z_c} \exp(-\alpha z) \exp(-i \beta z) \quad (3.15)$$

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. Прделаем это и получим:

$$E_x(t) = A \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z), \quad (3.16)$$

$$H_y(t) = \frac{A}{Z_c} \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z - \phi_z) \quad (3.17)$$

Здесь  $Z_c$  модуль комплексного волнового сопротивления  $\underline{Z}_c$ , а  $\phi_z$  – его фаза.

Итак, получены выражения для комплексного изображения электрического и магнитного поля в плоской волне (3.14) и (3.15) и выражения для расчета значения самого электрического и магнитного поля (3.16) и (3.17).

Ввиду большой значимости этих выражений, обсудим полученный результат. Начнем с выражения (3.16) для электрического поля. Выражение содержит периодическую функцию – косинус. Аргумент косинуса непрерывно изменяется в пространстве и во времени. Его называют фазой электрического поля плоской волны  $\Phi$ ,

$$\Phi_E = \omega t - \beta z \quad (3.18)$$

Фаза магнитного поля отличается на фазовый угол волнового сопротивления,

$$\Phi_H = \omega t - \beta z - \phi_z.$$

Косинус периодическая функция, поэтому через  $2\pi$  радиан значения полей повторяются. Если зафиксировать координату и изменять время, то значения поля повторяются через

$$T = 2\pi/\omega \quad (3.19)$$

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

$$\lambda = 2\pi/\beta \quad (3.20)$$

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

$$v_\Phi = \omega/\beta, \quad (3.21)$$

которая называется фазовой скоростью.

Каждая величина, входящая в выражение для фазы (3.18) имеет свое название. Кроме переменных координаты  $z$  и времени  $t$  в выражение входит круговая частота  $\omega$  и волновое число  $\beta$ .

Выражение, которое стоит перед функцией косинуса в (3.16) называют амплитудой электрического поля в плоской волне, та же величина в (3.17) – 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  $\alpha$ .

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.

$$\bar{E}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{G}(\omega) \exp(i\omega t - i\beta z) d\omega \quad (3.22)$$

Сигнал считаем узкополосным, то есть  $\Delta\omega_{\max}/\omega_0 \ll 1$ , где  $\Delta\omega_{\max}$  – максимальное отклонение по круговой частоте от центральной частоты  $\omega_0$ . Воспользуемся этим свойством сигнала для того, чтобы представить его в виде гармонического колебания с несущей круговой частотой  $\omega_0$ . Для этого волновое число  $\beta$  разложим в степенной ряд вблизи несущей.

Учитывая то, что отклонение частоты от центральной невелико, в ряду удержим лишь первые два слагаемые

$$\beta \approx \beta_0 + (\omega - \omega_0) \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega \rightarrow \omega_0} = \frac{\omega_0}{v_{\phi}} + \frac{\omega - \omega_0}{v_{\Gamma}} \quad (3.23)$$

Волновое число узкополосного немонахроматического сигнала представлено в виде двух слагаемых. Первое слагаемое – волновое число монохроматической несущей. Второе слагаемое возникает из-за того, что существуют спектральные составляющие с частотой, отличной от несущей. Их распространение описывается с помощью понятия групповой скорости.

$$v_{\Gamma} = \frac{1}{\left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega \rightarrow \omega_0}} \quad (3.24)$$

Перепишем экспоненту в выражении (3.22) с учетом введенных обозначений, т.е.

$$\exp i\omega t - i\beta z = \exp i\omega_0 t - i\beta_0 z \exp \left( i \frac{\omega - \omega_0}{v_{\Gamma}} v_{\Gamma} t - z \right)$$

Само выражение (3.22), теперь запишется так:

$$\bar{E}(t) = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{G}(\omega) \exp \left( i \frac{\omega - \omega_0}{v_{\Gamma}} (v_{\Gamma} t - z) \right) d\omega \right\} \exp(i\omega_0 t - \beta_0 z) \quad (3.25)$$

Узкополосный немонахроматический сигнал (3.22) заменен эквивалентным монохроматическим (см. выражение 3.25) с круговой частотой

$\omega_0$  и волновым числом  $\beta_0$  – соответствующим центральной частоте монохроматического сигнала и амплитудой, определяемой выражением (3.25) перед мнимой экспонентой. Этот сигнал перемещается во времени со скоростью  $V_{ГР}$ .

### 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 3.1 приведена сферическая система координат. Эта система формируется тремя координатными поверхностями, проходящими через интересующую нас точку М, и полярной осью  $O'Z'$ , проходящей через начало координат. Одна поверхность – сфера с центром в начале координат, вторая – плоскость, содержащая полярную ось и точку М, а третья – плоскость, перпендикулярная полярной оси.

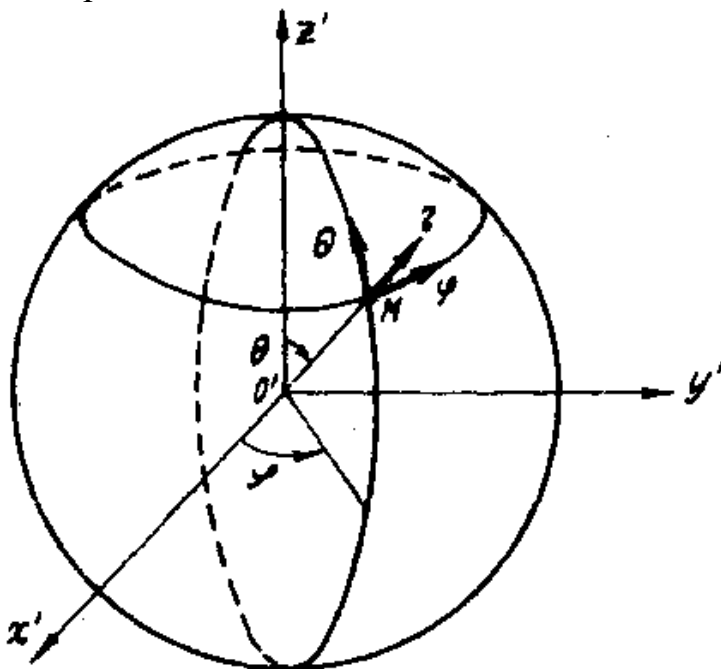


Рис. 3.1 – Сферическая волна

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 М касательные к координатным линиям образуют прямоугольный трехгранник. Сферическая система координат ортогональна.

Если в точке М (рис. 3.1) задан вектор электрического поля  $E$ . Его принято обозначать прямой со стрелкой, берущей начало в точке М. Не следует забывать, что этот вектор описывает, электрическое поле в точке М, 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. 3.1 это прямые  $r$ ,  $\phi$  и  $\theta$ .

Будем рассматривать однородную симметричную сферическую волну, у которой электрическое и магнитное поле не зависят от угловых координат  $\phi$  и  $\theta$ . Единственная координата, вдоль которой изменяется поле – радиус  $r$ . Выберем систему координат так, чтобы электрическое поле было направлено по оси  $\phi$ . Расчет показывает, что если на пути электромагнитной волны нет препятствий и, следовательно, не возникает отражений, то

$$\dot{E}_{\phi} = \frac{A}{r} \exp(-i\beta r) \quad (3.26)$$

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 (3.26).

Воспользовавшись законом электромагнитной индукции, найдем магнитное поле

$$\dot{H}_{\theta} = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} \dot{E}_{\phi} = -\frac{\dot{E}_{\phi}}{Z_c} \quad (3.27)$$

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.

$$\dot{\vec{P}} = \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^* = \dot{E}_{\phi} \dot{H}_{\theta} \vec{e}_r \quad (3.28)$$

Выражения (3.26), (3.27) 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.

$$E_r(t) = \frac{A}{r} \exp(-\alpha r) \cos(\omega t - \beta r) \quad ; \quad (3.29)$$

$$H_{\theta}(t) = \frac{A}{r Z_c} \exp(-\alpha r) \cos(\omega t - \beta r - \phi_z) \quad (3.30)$$

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. 3.2).

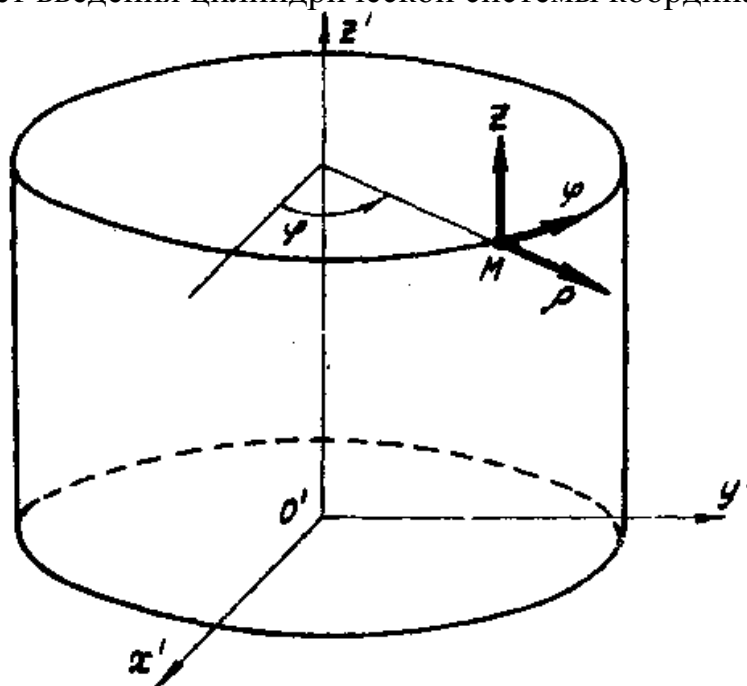


Рис. 3.2 – Цилиндрическая волна

Система координат формируется тремя координатными поверхностями, проходящими через интересующую нас точку  $M$ , и полярной осью  $O'Z'$ , проходящей через начало координат. Опишем эти поверхности. Одна поверхность – цилиндр, ось которого совпадает с полярной осью  $O'Z'$ ; 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  $\rho, \varphi, z$  (см. рис. 3.2) – ортогональная и криволинейная. Координатные оси это прямые  $\rho, \varphi, z$  (см. рис. 3.2).

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. 3.3 приводятся графики этих функций.

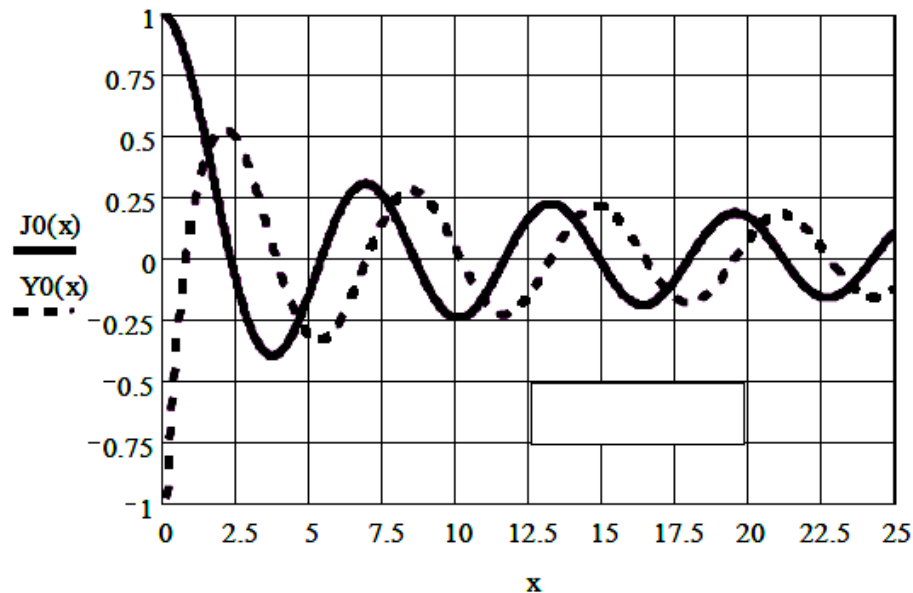


Рис. 3.3 – Графики функций Бесселя  $J_0(x)$  и Неймана  $Y_0(x)$

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 используется 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.

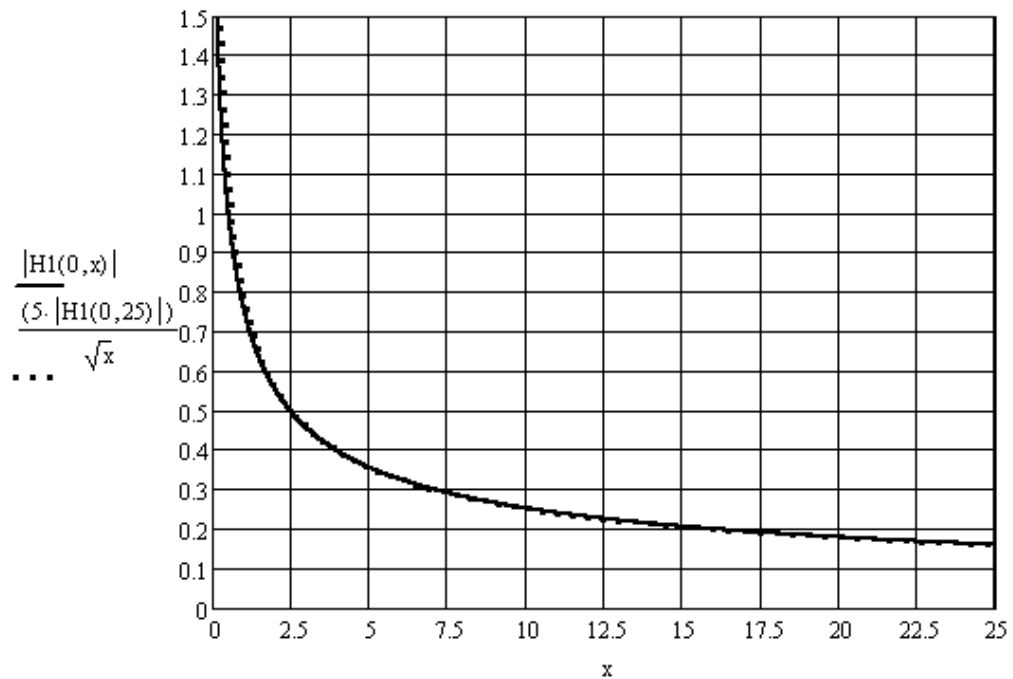


Рис. 3.4 – График модуля функции Ханкеля

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:

$$E(\rho, t) = \text{Re}\{H_0(\beta\rho) e^{i\omega t}\}, \quad (3.31)$$

где  $\omega$  – круговая частота, а  $\beta$  – волновое число. На больших расстояниях от оси ( $\beta\rho \gg 1$ ) волновое поле приобретает вид:

$$E(\rho, t) = \frac{A}{\sqrt{\rho}} \cos(\omega t - \beta\sqrt{\rho}) \quad (3.32)$$

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  $\rho$ , 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 по третьему 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 пункте 4.1.

### 3. Задание для работы

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.

3) Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственно-временного распределения векторов напряженностей сферических и цилиндрических электромагнитных волн.

4) Составить отчет о проделанной работе по третьему вопросу в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

#### ***4.1. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» параметры плоской электромагнитной волны.***

4.1.1. Исходные данные для моделирования – плоская монохроматическая электромагнитная волна распространяется в среде немагнитного диэлектрика, имеющего следующие параметры: относительная диэлектрическая проницаемость -  $\epsilon = 81$ , диэлектрическая проводимость -  $\sigma_\epsilon$  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.

#### 4.1.2. Алгоритм разработки программы в системе «Mathcad».

1) Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

– мнимую единицу,

– параметры среды  $\epsilon$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma_m$ ;

– начальные параметры волны  $E_0$  и  $f$ .

– постоянные величины  $\epsilon_0 := 10^{-9}/36\pi$   $\mu_0 := 4\pi 10^{-7}$ .

2) Ввести формулы для расчета параметров среды:

- круговой (циклической) частоты волны –  $\omega := 2\pi \cdot f$  ;
- комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей

$$\epsilon n := \epsilon - \epsilon_0 - i \frac{\sigma_e}{\omega} \quad \mu n := \mu - \mu_0 - i \frac{\sigma_m}{\omega} ;$$

- скорости света –  $c := \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$  ;

- показателя преломления –  $n := \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$  ;

- волновых сопротивлений вакуума и среды –  $Z_{c0} := \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad Z_c := \sqrt{\frac{\mu n}{\epsilon n}}$  .

3) Ввести формулы для расчета параметров плоской электромагнитной волны:

- постоянной (коэффициента) распространения волны –  $\gamma := \omega \cdot \sqrt{\mu n - \epsilon n}$  ;

- 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 –  $vf := \frac{\omega}{\beta}$  .

4.1.3. 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  $\gamma$ , волновое число  $\beta$ , коэффициент затухания волны  $\alpha$ , длину волны  $\lambda$ , фазовую скорость плоской волны  $vf$ .

4) Оценить рассчитанные величины, сделать выводы.

4.1.4. Провести расчет параметров плоской электромагнитной волны в среде немагнитного диэлектрика. Для этого выполнить следующие операции:

1) Ввести в составленную программу заданные исходные данные –  $\epsilon$ ,  $\sigma_e$ ,  $\mu$ ,  $\sigma_m$ .

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  $\gamma$ , волновое число  $\beta$ , коэффициент затухания волны  $\alpha$ , длину волны  $\lambda$ , фазовую скорость плоской волны  $vf$ .

4.1.5. 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.

#### **4.2. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» пространственно-временное распределение векторов напряженностей плоской электромагнитной волны.**

4.2.1. 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. 3.5. 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.

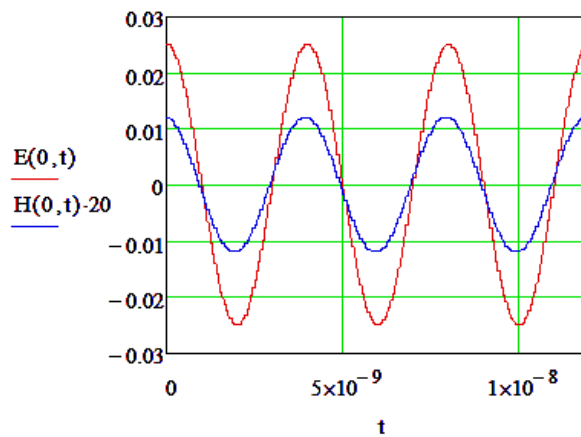


Рис. 3.5

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.

4.2.2. Сделать выводы по результатам выполненного задания.

**4.3. Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственного распространения сферических и цилиндрических электромагнитных волн.**

4.3.1. 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

$$u := \frac{1}{\beta}, \frac{1.01}{\beta} \dots \frac{50}{\beta}.$$

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  $t$

$$EC(u, t) := \operatorname{Re}(EKC(u) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t)).$$

4.3.2. 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 выбрали так, чтобы для цилиндрической волны выполнялось условие  $\beta u \gg 1$ , т.е. обеспечивалась 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 напряженностей электрических полей в сферических и цилиндрических волнах.

4.3.3. 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.

4.3.4. Сделать выводы по результатам выполненного задания.

### 5. 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:**

13) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

14) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

15) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

**РАЗДЕЛ №  
3.**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ**

**Тема № 13.**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ**

**Время – 10 часов.**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

1. Моделирование и исследование процессов регистрации электрических полей.
2. Моделирование и исследование процессов регистрации магнитных полей.
3. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних паразитных связей.

**СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ**

**1 – 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ  
РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

**Краткие теоретические или справочно-информационные материалы**

Информационные характеристики электромагнитных полей в радиочастотном диапазоне содержатся в параметрах:

- напряженность электрического поля ( $E$ ), характеризующую электрическую составляющую поля, В/м,
- напряженность магнитного поля ( $H$ ), характеризующую магнитную составляющую поля, А/м.

*В качестве датчиков для регистрации различных компонент электромагнитного поля* используются:

- индукционные датчики при регистрации вариаций магнитного поля на высоких частотах,
- кварцевые магнитометры при регистрации вариаций магнитного поля на низких частотах,

- электрические диполи или емкостные датчики для регистрации вариаций электрического поля,
- изотропные (ненаправленные) антенны при регистрации вариаций ЭМП на очень высоких частотах.

**Измерение характеристик электромагнитного поля осуществляется двумя методами:**

- **прямым методом**, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных с использованием прибора (средства измерения), проградуированного в единицах измеряемой величины;
- **косвенным методом**, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными посредством прямых измерений.

### **Принципы измерения характеристик магнитного поля**

Как правило, приборы для измерения магнитных величин электромагнитных полей состоят из двух частей:

- 1) Измерительного преобразователя, назначением которого является преобразование магнитной величины в величину иного вида (электрическую, механическую), более удобную для дальнейших операций
- 2) Измерительного устройства для измерения выходной величины измерительного преобразователя.

Одним из способов измерения характеристик магнитного поля основан на использовании явления электромагнитной индукции, поэтому такой способ измерения называют индукционным. Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС в контуре определяется изменением магнитного потока, пронизывающего контур.

В общем случае индукционный электромагнитный преобразователь (датчик) представляет собой 4-х полюсник (см. рис. 1.1), на входы которого подается магнитное поле с индукцией  $B$ , а с выходов измеряется ЭДС индукции.

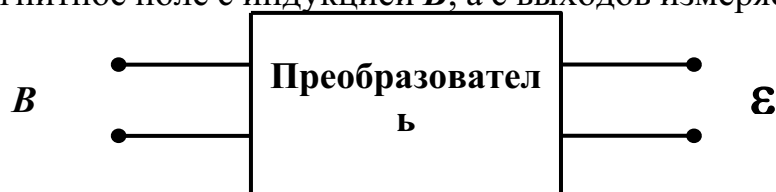


Рис. 1.1 – Индукционный электромагнитный преобразователь

Рассмотрим принцип работы данного индукционного преобразователя. В простейшем случае **индукционное электромагнитное преобразование** (измерительное преобразование) **осуществляется катушкой индуктивности**, представленной в нескольких вариантах на рис. 1.2.

ЭДС в катушке будет индуцироваться в результате изменения во времени внешнего магнитного поля. Если датчик находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , то в его обмотке имеющей витков  $N$ , наводится ЭДС, определяемая формулой

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (1.1)$$

где  $\Phi$  – потокосцепление, т.е. полный магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий все витки катушки.

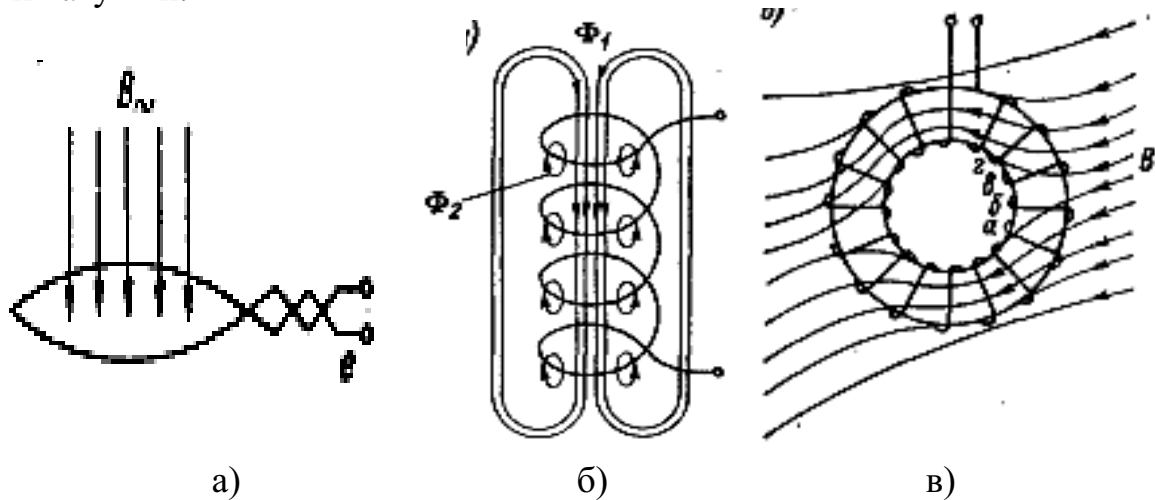


Рис. 1.2 – Простейшие индукционные датчики:  
а) контур, б) соленоид, в) тороид

Таким образом, выходной величиной индукционного датчика является ЭДС  $\mathcal{E}$ , а входной – скорость изменения потокосцепления  $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$  или магнитной индукции  $B$ .

Для того, чтобы использовать индукционный способ для косвенного измерения магнитной индукции или напряженности магнитного поля необходимо получить уравнение преобразования, представляющее собой однозначную функциональную зависимость между выходной величиной измерителя и входной измеряемой величиной поля.

Для переменного магнитного поля  $B(t) = B_m \cos(\omega t)$ , изменяющегося по гармоническому закону с частотой колебаний  $\omega$ , а именно такие поля применяются для передачи информации, ЭДС в неподвижной катушке с площадью поперечного сечения  $S$  будет равна

$$\mathcal{E}(t) = N S \omega B_m \sin(\omega t). \quad (1.2)$$

Известно, что индуктивность измерительной катушки  $L$  равна

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}, \quad (1.3)$$

где  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  – магнитная постоянная, В·с/А·м,  $\mu$  – магнитная проницаемость среды,  $l$  – длины катушки.

В свою очередь напряженность  $H$  магнитного поля связана с величиной магнитной индукции  $B$  соотношением

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu}. \quad (1.4)$$

Для простоты градуировки индукционного преобразователя выражение (1.4) должно иметь линейный характер, что возможно для изотропной диамагнетической или парамагнетической среды. Это означает, что в качестве индукционного датчика необходимо использовать катушку индуктивности без ферромагнитного сердечника с каркасом из органического диамагнетика.

Тогда на основе выражения (1.2) с учетом выражений (1.3) и (1.4) можно получить уравнение преобразования, т.е.

$$\mathcal{E}(t) = \frac{l\omega L}{N} H_m \sin(\omega t) = k \cdot L \cdot H(t). \quad (1.5)$$

где  $k$  – линейный коэффициент преобразования, пропорциональный частоте колебания.

Из выражения (1.5) видно, что **выходная величина (ЭДС) индукционного датчика линейно зависит от изменения напряженности магнитного поля и частоты**, т.е. индукционный датчик представляет собой линейный преобразователь. Подключение сопротивления нагрузки к катушке индуктивности приведет к протеканию в ней индукционного тока. Таким образом, измерив падение напряжения на сопротивлении нагрузки, можно определить величину магнитной индукции  $B$  или напряженности магнитного поля  $H$ . Для этого необходимо проградуировать шкалу вольтметра с учетом линейных аналитических зависимостей

$$H = \frac{U \cdot N}{\alpha \cdot \omega \cdot L \cdot l} \text{ или } B = \frac{U}{\alpha \cdot \omega \cdot N \cdot S}. \quad (1.6)$$

где  $\alpha$  – калибровочный коэффициент, учитывающий потери в реальном индукционном преобразователе.

Рассмотрим **эквивалентную схему индукционного электромагнитного преобразователя**. В качестве индукционного датчика выберем соленоидальную катушку, содержащую  $N$  витков, показана на рис. 1.2, б.

Основной поток  $\Phi_1$  контура пронизывает всю обмотку и сцепляется со всеми витками. Однако некоторая часть потока  $\Phi_2$ , называемая потоком рассеяния, замыкается, не пронизывая ряд витков. Соответственно полная индуктивность контура имеет две составляющие: **основную индуктивность**  $L = N^2/Z_m$  и индуктивность рассеяния  $L_{рас} = N/Z'_m$ , где  $Z_m$  и  $Z'_m$  – магнитные сопротивления основного потока и потока рассеяния. Если в обмотку преобразователя введем ферромагнитный сердечник, в котором концентрируется магнитный поток, то доля потоков рассеяния в общем потоке уменьшается и отношение  $L/L_{рас}$  увеличивается, однако в этом случае соотношение (4) будет иметь нелинейный характер, что существенно усложнит калибровку и градуировку вольтметра. Наименьшую индуктивность рассеяния имеет тороидальная катушка (рис. 1.2, в).

**Эквивалентная схема преобразователя**, в которой учтены сопротивление обмотки постоянному току  $R_o$ , основная индуктивность  $L$ , индуктивность рассеяния  $L_{рас}$ , межвитковая емкость  $C$  и сопротивление потерь  $R_{ном}$ , приведена на рис. 1.3.

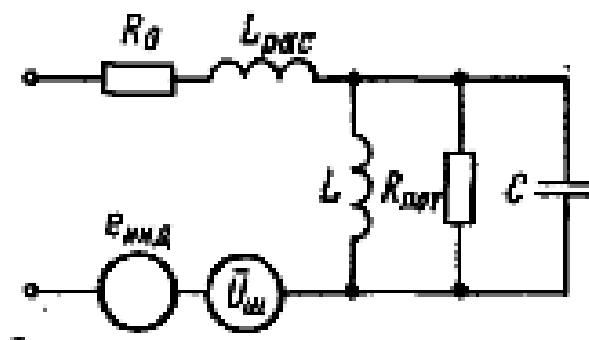


Рис. 1.3 – Эквивалентная электрическая схема индукционного датчика

В эквивалентной схеме учтены также источники ЭДС  $e_{ind}$  и помех  $U_n$ , которые характерны для этих преобразователей. Уменьшить составляющую помехи можно, применяя в преобразователях симметричные магнитные цепи и симметричные обмотки. В качестве примера на рис. 1.2, в) показана магнитная цепь в виде тороидального сердечника. При равномерной обмотке для каждого витка есть симметрично расположенный по отношению к магнитному потоку, пронизывающему тор, парный виток (например, витки б и в или а и г). ЭДС помехи, наводимые в «парных» витках, компенсируют друг друга, и суммарная ЭДС при идеальной симметрии равна нулю.

#### Принципы измерения напряженности электрического поля

*Простейшим измерительным устройством переменной напряженности электрического поля является электрический диполь, представленный на рис. 1.4.*

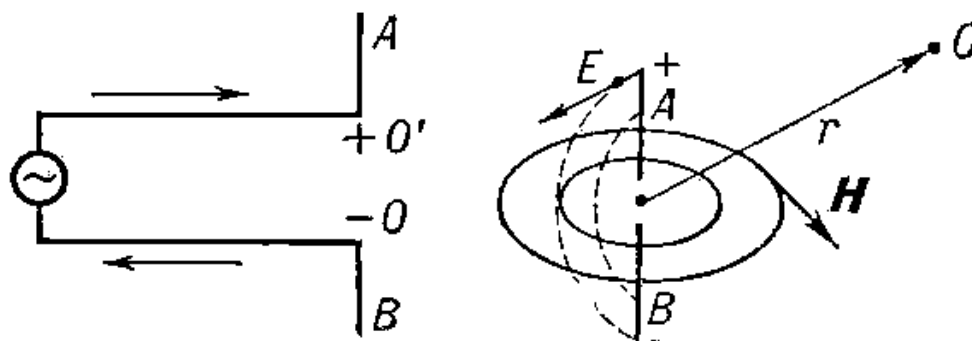


Рис. 1.4 – Электрический диполь и принцип работы

Известно, если на электрический диполь (симметричный вибратор) действует распространяющаяся в пространстве от источника  $O$  электромагнитная волна, то её электрическое поле (см. рис. 1.4) возбуждает в диполе колебания тока, которые затем усиливаются, преобразуются по частоте и воздействуют на выходные приборы. На этом принципе работают приемные антенны радиоприемников. Следовательно, симметричные вибраторы, как и электрический диполь, могут использоваться для регистрации величины электрического поля электромагнитной волны. При этом индукционный ток, возбужденный в цепи вибратора будет пропорционален напряженности электрического поля.

Рассмотрим линейный симметричный вибратор, расположенный в

свободном воздушном пространстве и изображенный на рис. 1.5. Он представляющий собой тонкий цилиндрический проводник радиусом  $d$ . Длина каждого плеча обозначена через  $l$ , ширина зазора, к которому подключается фидер – через  $\delta$ . Поскольку обычно  $l \gg \delta$ , то значение  $2l$  можно считать общей длиной вибратора. Симметричные вибраторы используются, как в метровом диапазоне, так и в дециметровом и в сантиметровом диапазоне волн.

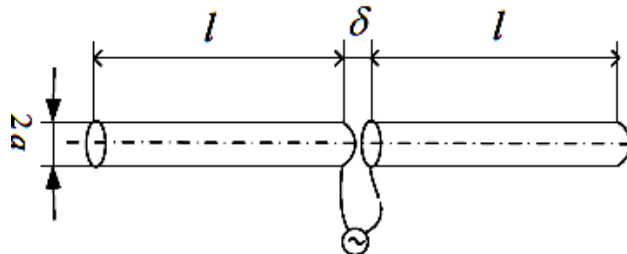


Рис. 1.5 – Линейный симметричный вибратор

Если длина линейного симметричного вибратора близка к половине длины волны принимаемых колебаний, т.е.  $2l \approx \lambda/2$ , то такой вибратор называют полуволновым вибратором. Его наиболее часто используют в качестве приемной антенны.

Закон распределения тока, наводимый волной, в симметричном вибраторе зависит от соотношения длины вибратора и длины принимаемой волны. Он определяется путём решения достаточной сложной электродинамической задачи взаимодействия электромагнитного поля с проводящей поверхностью вибратора. Для упрощения вводят понятие действующей длины вибратора – это коэффициент, имеющий размерность длины, который связывает между собой амплитуду напряжённости поля в точке приёма с направлением максимального приёма и ЭДС, наводимого на зажимах вибратора:

$$\mathcal{E}_{A \max} = \ell_d E_{\max} \quad (1.7)$$

Физический смысл действующей длины состоит в том, что это такая геометрическая длина линейной вибратора с равномерным и синфазным распределением тока вдоль неё, при котором этот вибратор создаёт на зажимах максимальную ЭДС, равную максимальной ЭДС, созданной реальным вибратором с неравномерным и несинфазным распределением тока (см. рис. 1.6).

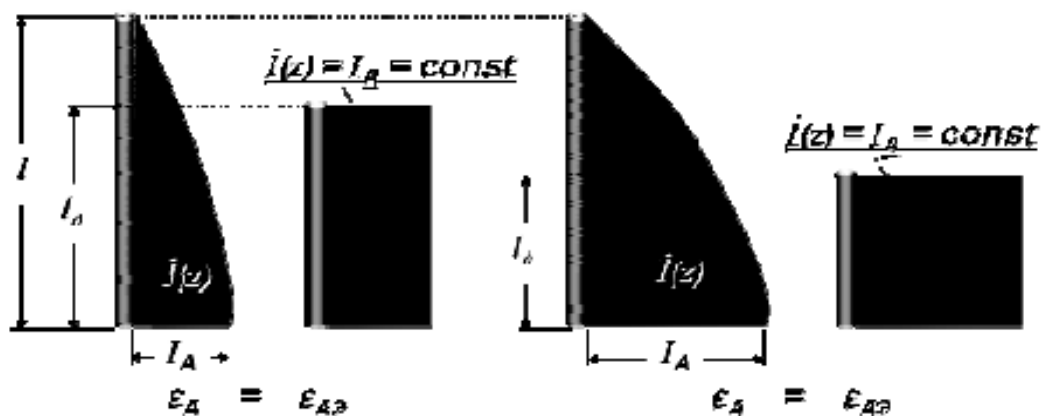


Рис. 1.6 – Физический смысл действующей длины антенны

Чем больше неравномерность и несинфазность в распределении тока вдоль вибратора, тем меньший процент от ее геометрической длины составляет действующая:  $0 < l_d < l$ .

Итак, действующая длина симметричного полуволнового вибратора зависит от его геометрической длины и от закона распределения амплитуды и фазы тока в нем, т.е.

$$l_{\ddot{a}} = \int_{-l}^l \sin(k(l-z)) dz, \quad (1.8)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – коэффициент фазы волны тока, совпадающий с коэффициентом фазы электромагнитной волны в свободном пространстве,  $z$  – координата.

Ток смещения

С учетом того, что расстояния от источника излучения до вибратора как правило  $r \gg 2l$ , то фронт приемной волны можно считать плоским. Это позволяет ввести понятие действующей или эффективной длины волны

Таким образом, электрический диполь представляет собой линейный преобразователь изменений напряженности электрического поля  $E$  в изменения электрического тока  $i$  в его цепи.

Переменное электрическое поле  $E(t) = E_m \cos(\omega t)$ , изменяющееся по гармоническому закону с частой колебаний, а именно такие поля применяются для передачи информации, возбуждает в цепи электрического диполя с емкостью  $C$  электрический ток, определяемый формулой

$$i = \frac{\partial q}{\partial t} \approx \varepsilon_o C \frac{\partial E}{\partial t} = \varepsilon_o \omega \cdot C \cdot E_m \sin(\omega t), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл/(В·м) – диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная).

Из выражения (6) видно, что величина силы тока линейно зависит от изменения напряженности электрического поля и величины емкости диполя, то есть емкостной датчик представляет собой линейный преобразователь. Протекая через сопротивление нагрузки, ток вызовет изменение выходного напряжения датчика, пропорционального напряженности электрического поля. Это позволяет проградуировать шкалу вольтметра в величинах соответствующих напряженности электрического поля, т.е.

$$P_{\Sigma} = (1/2) |I_{\Pi}|^2 R_{\Sigma}. \quad (1.27)$$

Таким образом, сопротивления излучения — это коэффициенты пропорциональности между мощностью излучения и половиной квадрата тока в пучности. Используя (1.26), получаем:

$$R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} \{[\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]^2 / \sin \theta\} d\theta. \quad (1.28)$$

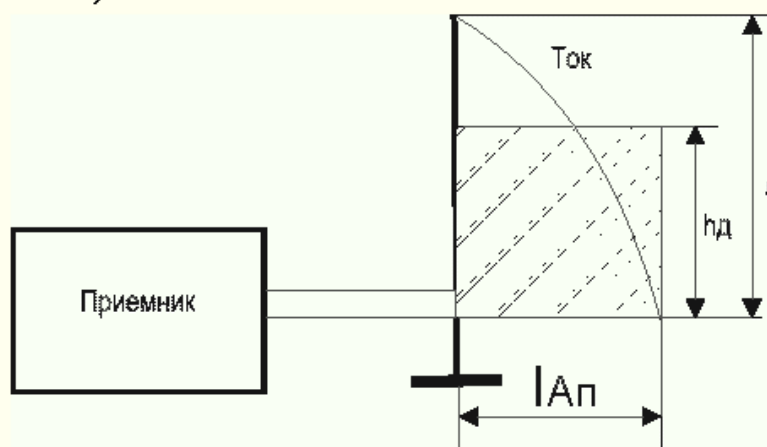
В (1.27) сопротивление излучения отнесено к модулю тока в пучности.

#### Действующая высота $h_d$

— величина, на которую нужно умножить напряженность электрического поля в точке приема, чтобы получить э. д. с., развиваемую антенной.  $h_d$  зависит от типа антенны и ее относительных размеров (по отношению к длине волны). Физически  $h_d$  равна высоте воображаемой антенны, обладающей одинаковой с реальной антенной способностью принимать радиоволны, но в которой ток по всей длине имеет постоянное значение, равное току в пучности реальной антенны  $I_{Ap}$  (рис.1).

Понятием «действующая высота» удобно пользоваться при расчете одновибраторных антенн длиной не более  $\lambda/4$ .

Эффективная площадь антенны  $A_{эф}$  определяет ту часть площади фронта плоской волны, с которой снимает энергию антенна. Понятие эффективная площадь используется при расчете многовибраторных и других сложных антенн (это понятие может быть применено и к одновибраторной антенне).



### Содержание практической работы, выполняемой студентами по первому учебному вопросу

#### 1. Описание лабораторного оборудования:

– ПЭВМ с программой схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» и системой компьютерной математики «Mathcad – 14».

#### 2. Исходные данные для моделирования и исследования

Исходные данные для моделирования и исследований приведены непосредственно в пунктах задания.

#### 3. Задание для работы

16) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения индукционного преобразователя для измерения магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

17) Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения электрического диполя для измерения напряженности электрического поля.

18) Составить отчет о проделанной работе по первому вопросу в

соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

**4.1. Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения индукционного преобразователя для измерения магнитной индукции и напряженности магнитного поля.**

4.1.1. Собрать эквивалентную электрическую схему замещения индукционного датчика, приведенную на рис. 5. Переменная ЭДС индукции, наводимая в измерительной катушке за счет изменения магнитной индукции  $B$  или напряженности  $H$  магнитного поля, моделируется источником гармонического колебания  $V1$ . В данной схеме помимо индуктивности измерительной катушки  $L1$  учтены активное сопротивление обмотки  $R0$ , индуктивность рассеяния  $L0$ , межвитковая емкость  $C0$ . Индукционный ток в катушке измеряется с помощью амперметра. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки  $R1$ , пропорциональное входной магнитной величине, выступает в качестве выходной электрической величины, измеряемой вольтметром.

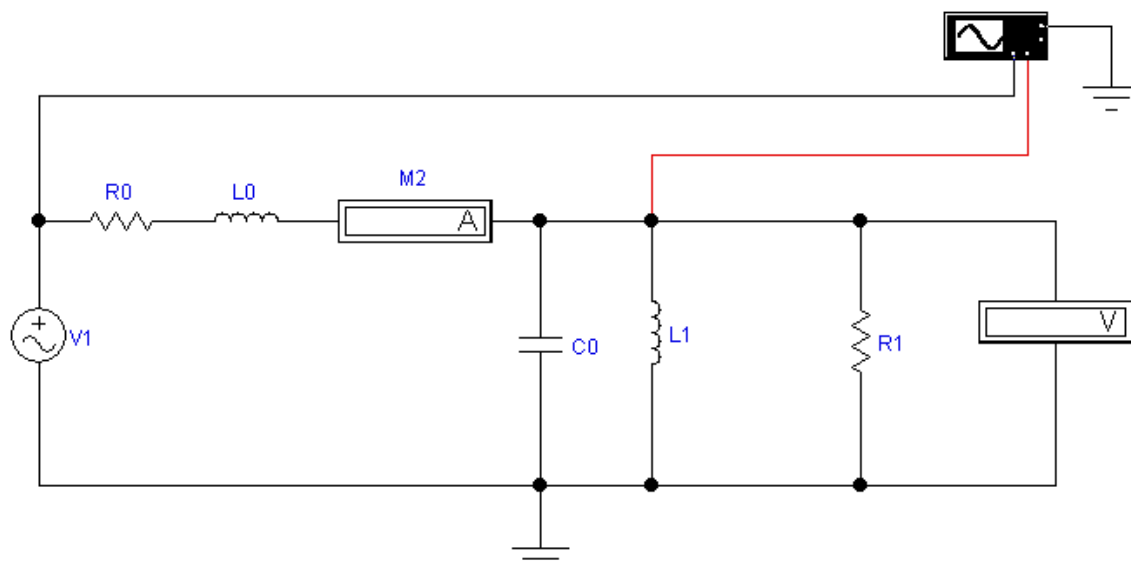


Рис. 5 – Эквивалентная схема замещения индукционного преобразователя

4.1.2. Провести расчет параметров измерительной однослойной катушки, приведенной на рис. 6.

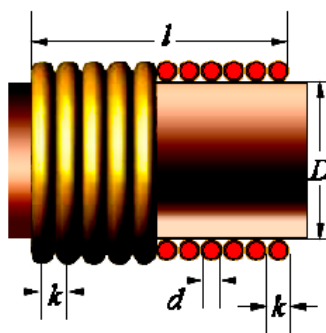


Рис. 6 – Однослойная катушка с видом намотки виток к витку

Исходными данными для расчета являются:  $D$  – диаметр каркаса,  $d$  – диаметр (толщина) провода,  $N$  – число витков,  $l$  – длина намотки. Они

представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные к расчету параметров катушки

| <i>Вариант</i> | <i>D, см</i> | <i>d, мм</i> | <i>l/D</i> |
|----------------|--------------|--------------|------------|
| 26.            | 3            | 1            | 0,7        |
| 27.            | 4            | 2            | 0,8        |
| 28.            | 5            | 2,5          | 0,9        |
| 29.            | 6            | 1,5          | 1,0        |
| 30.            | 7            | 3            | 1,1        |
| 31.            | 8            | 1            | 1,2        |
| 32.            | 9            | 2            | 1,3        |
| 33.            | 10           | 2,5          | 1,4        |
| 34.            | 3            | 1,5          | 1,5        |
| 35.            | 4            | 3            | 0,7        |
| 36.            | 5            | 1            | 0,8        |
| 37.            | 6            | 2            | 0,9        |
| 38.            | 7            | 2,5          | 1,0        |
| 39.            | 8            | 1,5          | 1,1        |
| 40.            | 9            | 3            | 1,2        |
| 41.            | 10           | 1            | 1,3        |
| 42.            | 3            | 2            | 1,4        |
| 43.            | 4            | 2,5          | 1,5        |
| 44.            | 5            | 1,5          | 0,7        |
| 45.            | 6            | 3            | 0,8        |
| 46.            | 7            | 1            | 0,9        |
| 47.            | 8            | 2            | 1,0        |
| 48.            | 9            | 2,5          | 1,1        |
| 49.            | 10           | 1,5          | 1,2        |
| 50.            | 6            | 3            | 1,3        |

Порядок расчета:

1) Выбрать размеры (форм-фактор) катушки, обеспечивающие наименьшее значение паразитной межвитковой емкости. Данное требование выполняется при соотношении отношения длины намотки к ее диаметру  $l/D = 0,7 \dots 1,5$ .

2) Рассчитать длину намотки  $l$  по заданному в таблице 1.1 диаметру  $D$ .

3) Рассчитать число витков по формуле  $N = [l/d]$ , где квадратные скобки означают операцию округление результата до целого числа в меньшую сторону.

4) Рассчитать величину межвитковой емкости по формуле  $C_{ov} = 0,46 \cdot D \cdot 10^{-12}$ .

5) Рассчитать величину индуктивности измерительной катушки по формуле:

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} \text{ [Гн]}, \text{ где } S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \text{площадь поперечного сечения витка}$$

(каркаса) катушки.

6) Рассчитать активное сопротивление катушки по формуле  $R_o = 0,1 \cdot \pi \cdot D \cdot N$  [Ом].

7) Рассчитать величину индуктивности рассеяния, равную 5% от  $L$ .

4.1.3. Установить в собранной схеме рассчитанные параметры, а также установить следующие исходные данные:

- сопротивление нагрузки  $R1 = 50$  Ом;
- действующее напряжение источника ЭДС, равное 1 мВ;
- частоту источника ЭДС, равную 1 МГц.

Включить симулятор EWB, убедиться в работоспособности схемы.

4.1.4. Провести измерение индукционного тока  $I$  в катушке и выходного напряжения  $U$  преобразователя. Включив осциллограф, произвести измерение периода  $T$  выходного напряжения и временной задержки между наведенной переменной ЭДС  $E(t)$  и выходным напряжением  $U(t)$ , т.е.  $\Delta t = T2 - T1$ .

4.1.5. Изобразить в отчете осциллограммы ЭДС индукции и выходного напряжения индукционного преобразователя.

4.1.6. Рассчитать линейную  $f$  и циклическую частоту индукционного тока, и фазовый сдвиг между ЭДС индукции и выходным напряжением. Результаты занести в отчет.

4.1.7. Рассчитать величину калибровочного (поправочного) коэффициента, учитывающего потери в реальном индукционном преобразователе, по формуле  $\alpha = U/E$ .

4.1.8. Составить градуировочные таблицы для изменения шкалы вольтметра так образом, чтобы можно было производить измерения напряженности магнитного поля  $H$  и магнитной индукции  $B$ . Для этого выполнить следующие операции:

– рассчитать по измеренной величине выходного напряжения напряженность входного магнитного поля по формуле

$$H = \frac{U \cdot N}{\alpha \cdot l \cdot \omega L};$$

– определить коэффициент преобразования  $k_1 = H/U$ ;

– рассчитать по измеренной величине выходного напряжения магнитную индукцию по формуле

$$B = \frac{U}{\alpha \cdot N \cdot S \cdot \omega};$$

– определить коэффициент преобразования  $k_2 = B/U$ ;

– заполнить градуировочные таблицы:

|            |     |     |   |   |    |
|------------|-----|-----|---|---|----|
| $U$ , мВ   | 0,1 | 0,5 | 1 | 5 | 10 |
| $H$ , мА/м |     |     |   |   |    |
| $B$ , нТл  |     |     |   |   |    |

4.1.9. Провести исследование зависимости свойств индукционного преобразователя от частоты измеряемой величины. Для этого изменить частоту источника ЭДС, уменьшив в начале ее в 2 раза, а затем увеличив в 2 раза. Повторить выполнение пунктов 4.1.4 – 4.1.8.

4.1.10. Сделать выводы о способности исследуемой схемы работать в качестве индукционного преобразователя для регистрации параметров магнитного поля. Определить, как зависит выходное напряжение преобразователя от параметров измерительной катушки.

### **4.3. Исследовать эквивалентную схему замещения электрического диполя для измерения напряженности электрического поля**

4.3.1. Собрать эквивалентную электрическую схему замещения электрического диполя, приведенную на рис. 6, с указанными на схеме параметрами. В данной схеме учтены сопротивление проводников диполя  $R_o$ , емкость  $C$  диполя, индуктивность  $L_k$ , сопротивление нагрузки  $R_n$ . Источник синусоидального напряжения моделирует (имитирует) изменение напряженности  $E$  переменного электрического поля.

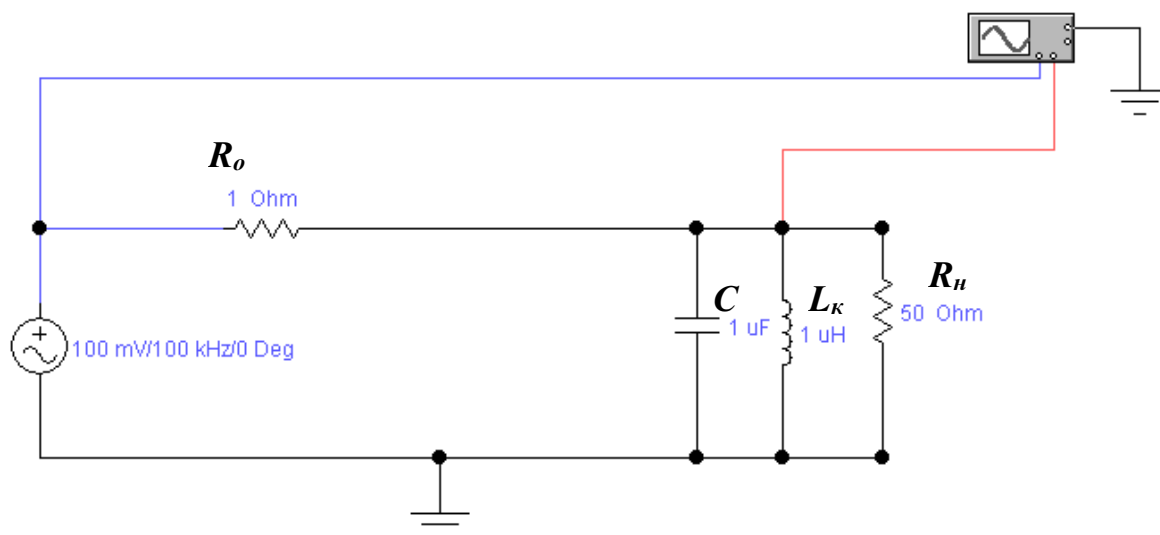


Рис. 6 – Эквивалентная схема замещения электрического диполя

4.3.2. Включить симулятор EWB, убедиться в работоспособности схемы.

4.3.3. Включив осциллограф, произвести измерение амплитуды напряжения и периода (частоты) колебания с помощью осциллографа. Изобразить в отчете осциллограммы входного сигнала и выходного сигнала электрического диполя.

4.3.4. С помощью осциллографа измерить и рассчитать фазовый сдвиг выходного и входного сигналов.

4.3.5. Используя выражение (6), а также учитывая, что  $U_{\text{вых}} = i R_n$ , пересчитать полученную амплитуду напряжения выходного сигнала в амплитуду напряженности  $E$  электрического поля.

4.3.6. Сделать выводы о способности исследуемой схемы работать в качестве электрического диполя для регистрации информационных параметров электрического поля.

**4.4. 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.

**3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАВОДОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ЗА СЧЕТ ВНЕШНИХ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ**

**Краткие теоретические или справочно-информационные материалы**

**3.1. 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.

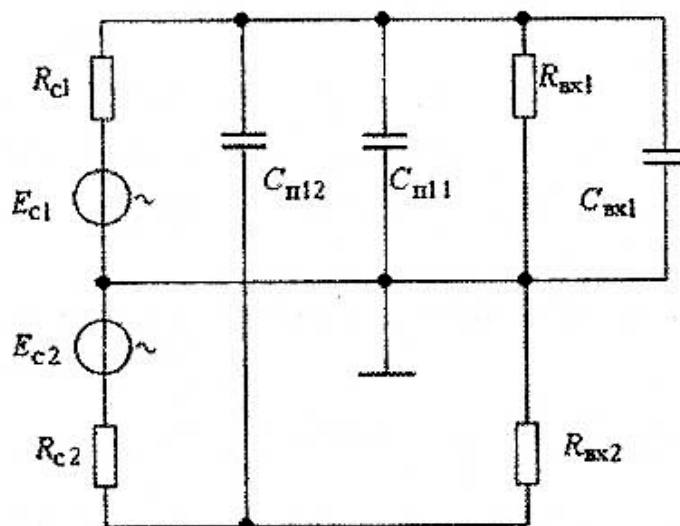


Рис. 3.1 – Эквивалентная схема внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами

Рассмотрим порядок расчета помехи  $U_{n,n12}$ , наводимой из второго канала в первый. Напряжение сигнала во втором канале (на сопротивлении  $R_{ex2}$ )

определяется выражением

$$U_{c2} = E_{c2} R_{bx2} / (R_{c2} + R_{bx2}). \quad (2.1)$$

Входное сопротивление первого канала для сигнала наводки образуется параллельным соединением следующих элементов: выходного сопротивления генератора  $R_{c1}$ , паразитной емкости  $C_{n11}$ , входного сопротивления сигнала  $R_{bx}$  и входной емкости приемника сигнала, то есть

$$Z_{k1} = X_{c1} \parallel R_{k1},$$

где  $X_{c1}$  – импеданс паразитной емкости  $C_{n11}$ ;

$$C_{k1} = C_{n11} + C_{bx1} + C_{n12}; \quad R_{k1} = R_{bx1} R_{c1} / (R_{bx1} + R_{c1}).$$

Здесь  $R_{k1}$  и  $C_{k1}$  – входное сопротивление и собственная емкость первого канала.

При гармоническом сигнале во втором канале амплитуда помехи в первом канале определяется по выражению

$$U_{i12} = \frac{U_{c2} \cdot T_{i12} \cdot \omega_{c2}}{\sqrt{1 + T_{e1}^2 \omega_{n2}^2}}, \quad (2.2)$$

где  $T_{k1} = R_{k1} C_{k1}$  – постоянная времени первого канала связи;  $T_{n12} = R_{k1} C_{n12}$  – постоянная времени цепи паразитной связи первого канала со вторым;  $c2$  – частота гармонического сигнала во втором канале.

Передаточная функция канала емкостной параллельной паразитной связи

$$W_{i12}(p) = \frac{p C_{i12} \cdot R_{e1}}{(p R_{e1} \cdot \tilde{N}_{e1} + 1)} = \frac{T_{i12} p}{(T_{e1} p + 1)}, \quad (2.3)$$

а в соответствии с передаточной функцией определяется амплитудно-частотная характеристика

$$\dot{A}_{i12}(\omega) = \frac{T_{i12} \cdot \omega_{c2}}{\sqrt{1 + T_{e1}^2 \omega_{n2}^2}}. \quad (2.4)$$

Для случая внешней резистивной параллельной паразитной связи, представленной на рис. 2.2, передаточная функция определяется выражением

$$W_{i12}(p) = \frac{R_{e1}}{R_{i12}} \cdot \frac{1}{\tilde{O}_{e1} + 1}. \quad (2.5)$$

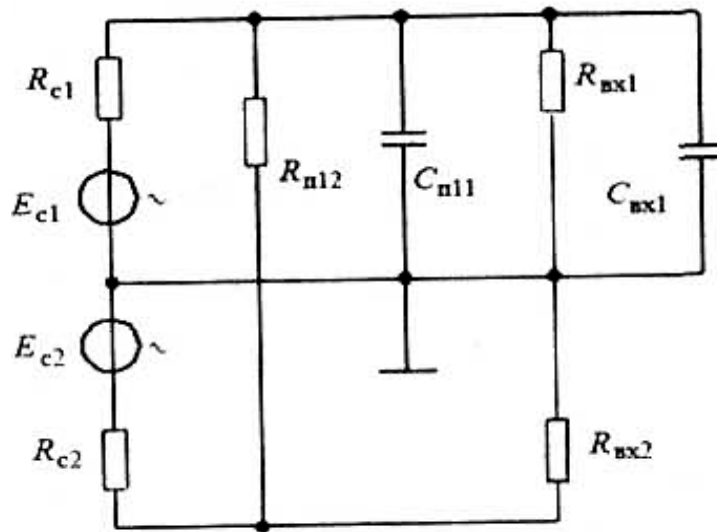


Рис. 3.2 – Эквивалентная схема внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами

При гармоническом сигнале  $E_{c2}$  в соответствии с (5) амплитуда помехи (наводки) равна

$$U_{i.12} = \frac{U_{c2} \cdot R_{e1}}{(R_{i12} \cdot \sqrt{1 + T_{e1}^2 \omega_{n2}^2})} \quad (2.6)$$

### 3.2. 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

$$U_{т.н12} = E_{c2} \omega_{c2} M_{н12} / (R_{вх2} + R_{c2}). \quad (2.7)$$

В формуле (2.7)  $R_{вх2}$  и  $R_{c2}$  рассчитываются по методике, рассмотренной в предыдущем вопросе.

В случае импульсных сигналов величина токовой наводки в первом канале связи определяется крутизной фронтов  $t_{\phi}$  импульса во втором канале:

$$U_{т.н12} = M_{н12} \frac{di_2}{dt} = \frac{E_{c2}}{t_{\phi}} \cdot \frac{M_{н12}}{R_{c2} + R_{вх2}}. \quad (2.8)$$

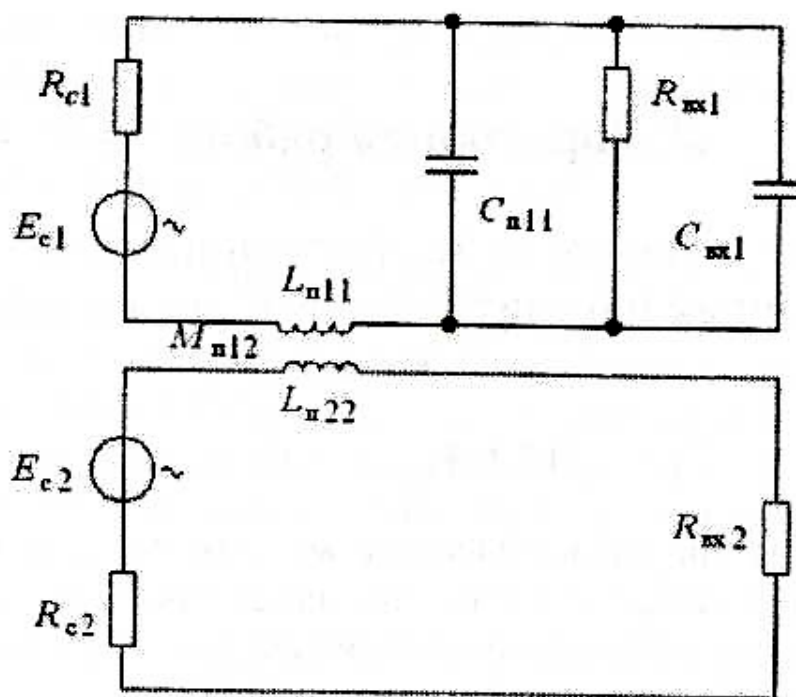


Рис. 2.3 – Эквивалентная схема последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индукцию

Таким образом, паразитные связи могут проявляться и при отсутствии гальванического соединения источника и приемника наводки.

### Содержание практической работы, выполняемой студентами

#### 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

Исходные данные для моделирования и исследований приведены в таблице 2.1.

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

#### 4. Порядок выполнения работы

**4.1. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами.**

4.1.1. Запустить моделирующую программу «Electronics Workbench – 5.12». Собрать схему по рис. 2.4 с указанными на схеме параметрами.

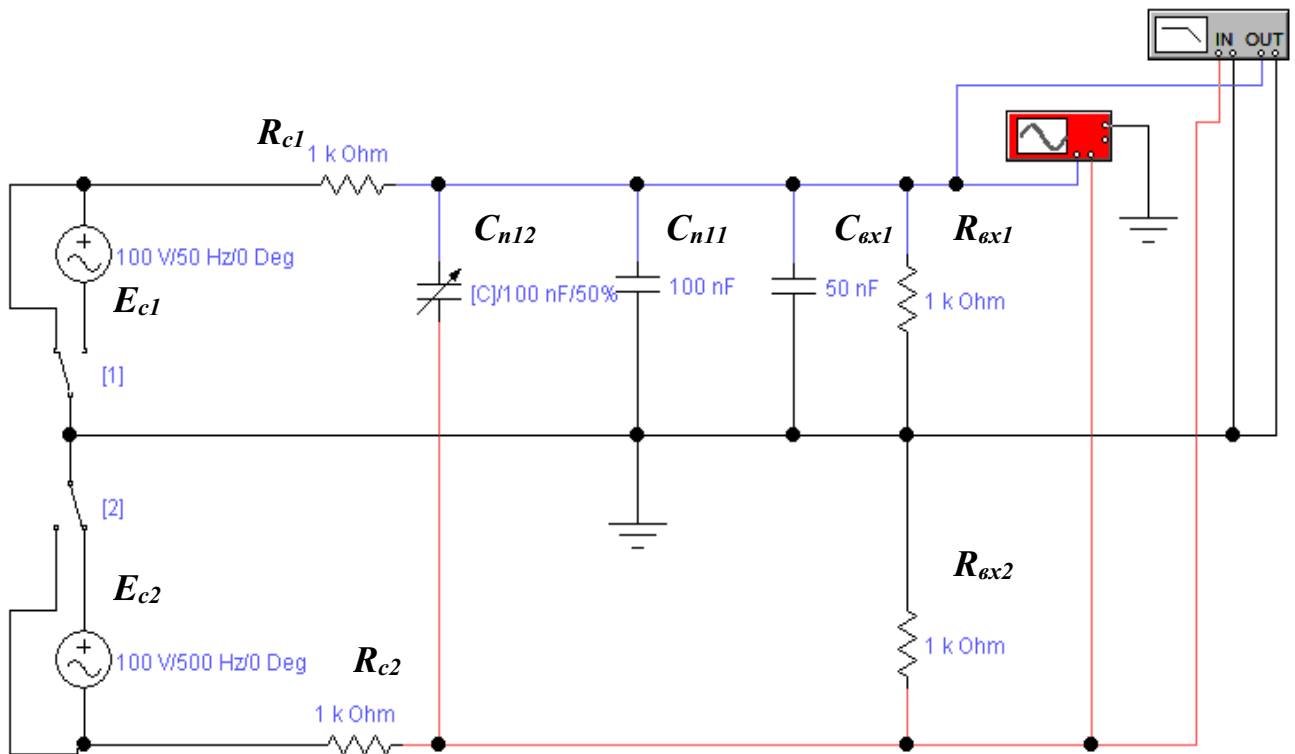


Рис. 2.4 – Моделируемая эквивалентная схема внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами

4.1.2. Провести расчет наводок в первом канале от влияния второго канала по приведенным выше расчетным соотношениям (2.2) и (2.4), 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. 2.5.

$$E_{c1} := 100 \quad E_{c2} := 100 \quad f_1 := 50 \quad f_2 := 500$$

$$R_{c1} := 1000 \quad R_{c2} := 1000 \quad R_{ex1} := 1000 \quad R_{ex2} := 1000$$

$$C_{ex1} := 50 \cdot 10^{-9} \quad C_{n11} := 100 \cdot 10^{-9} \quad C_{n12} := 50 \cdot 10^{-9}$$

$$\omega_1 := 2 \cdot \pi \cdot f_1 \quad \omega_2 := 2 \cdot \pi \cdot f_2$$

$$U_{c2} := \frac{E_{c2} \cdot R_{ex2}}{R_{c2} + R_{ex2}}$$

$$C_{k1} := C_{n11} + C_{ex1} + C_{n12}$$

$$R_{k1} := \frac{R_{ex1} \cdot R_{c1}}{R_{ex1} + R_{c1}} \quad T_{k1} := R_{k1} \cdot C_{k1} \quad T_{n12} := R_{k1} \cdot C_{n12}$$

```

Un12 :=  $\frac{U_{c2} \cdot T_{n12} \cdot w2}{\sqrt{1 + T_{k1}^2 \cdot w2^2}}$ 

i := 0..10000      F(i) := i*100
W(i) := 2*pi*F(i)

A(i) :=  $\frac{T_{n12} \cdot W(i)}{\sqrt{1 + T_{k1}^2 \cdot W(i)^2}}$ 

```

Рис. 2.5 – Листинг программы «Расчет наводок при внешней емкостной параллельной связи»

4.1.3. 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 рассчитанной. 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 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  $C_{n12}$ .

4.1.4. Сделать выводы о взаимном влиянии каналов связи друг на друга при наличии емкостной параллельной паразитной связи.

**4.2. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами**

4.2.1. Запустить моделирующую программу «Electronics Workbench – 5.12». Собрать схему по рис. 2.6 с указанными на схеме параметрами.

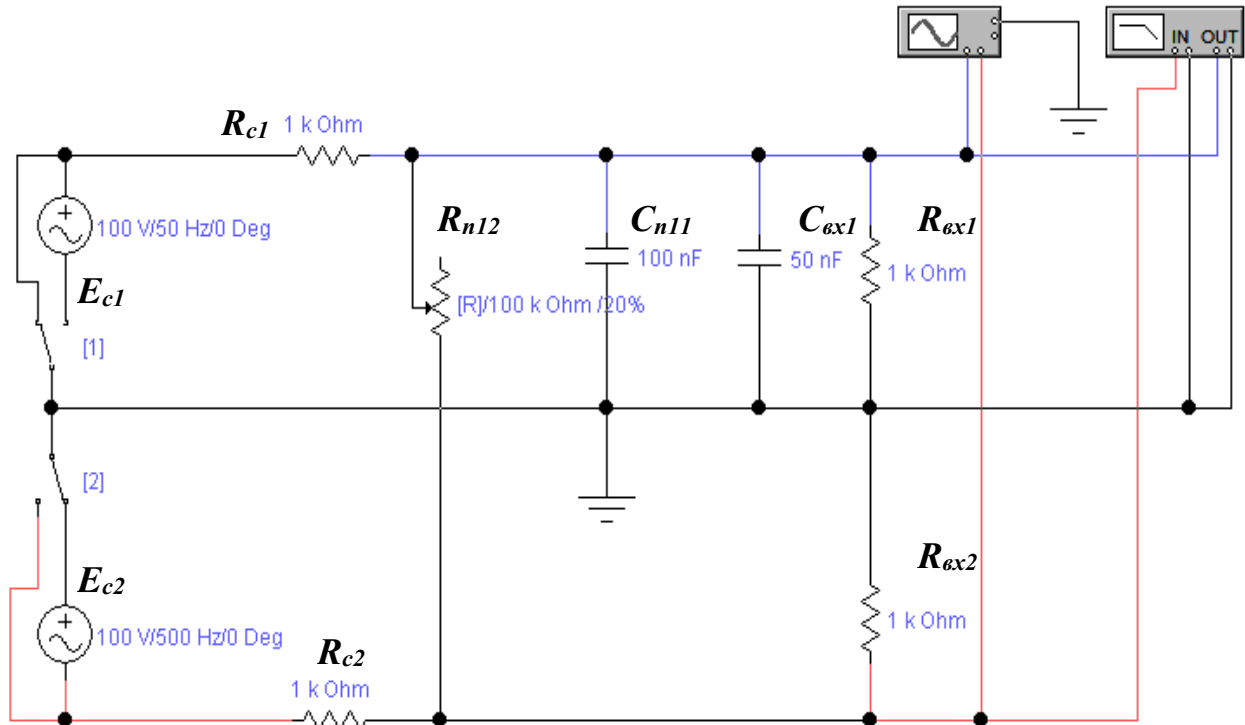


Рис. 2.6 – Моделируемая эквивалентная схема внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами

4.2.1. 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.

$$\begin{aligned}
 E_{c1} &:= 100 & E_{c2} &:= 100 & f_1 &:= 50 & f_2 &:= 500 \\
 R_{c1} &:= 1000 & R_{c2} &:= 1000 & R_{6x1} &:= 1000 & R_{6x2} &:= 1000 \\
 C_{6x1} &:= 50 \cdot 10^{-9} & C_{n11} &:= 100 \cdot 10^{-9} & R_{n12} &:= 20000 \\
 w_1 &:= 2 \cdot \pi \cdot f_1 & w_2 &:= 2 \cdot \pi \cdot f_2 \\
 U_{c2} &:= \frac{E_{c2} \cdot R_{6x2}}{R_{c2} + R_{6x2}} & C_{k1} &:= C_{n11} + C_{6x1} & R_{k1} &:= \frac{R_{6x1} \cdot R_{c1}}{R_{6x1} + R_{c1}} \\
 T_{k1} &:= R_{k1} \cdot C_{k1} \\
 U_{n12} &:= \frac{U_{c2} \cdot R_{k1}}{R_{n12} \cdot \sqrt{1 + T_{k1}^2 \cdot w_2^2}}
 \end{aligned}$$

```

Un12 := 
$$\frac{U_{c2} \cdot R_{k1}}{R_{n12} \cdot \sqrt{1 + T_{k1}^2 \cdot w^2}}$$


i := 0..10000      F(i) := i*100
W(i) := 2*pi*F(i)

A(i) := 
$$\frac{R_{k1}}{R_{n12} \cdot \sqrt{1 + T_{k1}^2 \cdot W(i)^2}}$$

+

```

Рис. 2.7 – Листинг программы «Расчет наводок при внешней резистивной параллельной связи»

4.2.3. 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 рассчитанной. 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  $R_{n12}$ .

4.2.4. 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. 2.8 с указанными на схеме параметрами.

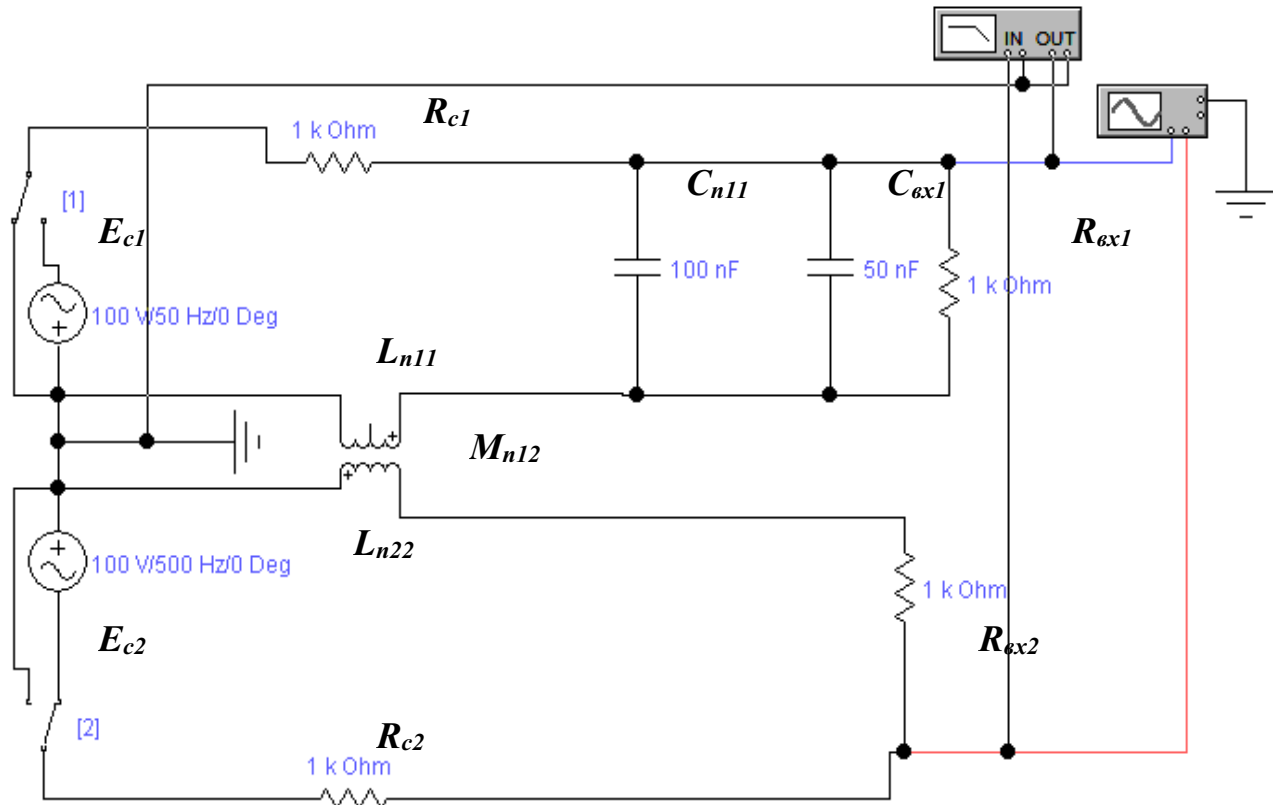


Рис. 2.8 – Моделируемая эквивалентная схема последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индукцию

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).

4.3.2. 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  $M_{n12} = 0,001$  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    Мп12 := 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

Uп12 :=  $\frac{Uc2 \cdot Мп12 \cdot w2}{Rbx2 + Rc2}$ 

```

Рис. 2.9 – Листинг программы «Расчет наводок при внешней последовательной индуктивной связи».

4.3.3. 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.

6) 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  $M_{n12}$ .

4.3.4. Сделать выводы о взаимном влиянии каналов связи друг на друга при наличии резистивной параллельной паразитной связи.

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

В отчете привести:

- задание на выполнение работы;
- порядок проведения работы;
- исследуемые принципиальные эквивалентные схемы замещения;
- составленные листинги программ расчетов;
- результаты расчетов;
- результаты исследований – эпюры напряжений (осциллограммы) сигналов и наводок для каждой исследуемой схемы по каждому каналу, графики АЧХ, графики зависимостей напряжений наводок в каналах от заданных параметров;
- сравнение расчетных результатов с экспериментами.
- выводы о проделанной работе, с разъяснением физического смысла полученных результатов.

### **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 смоделированной схеме.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

- 16) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.
- 17) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.
- 18) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ

**Время – 10 часов.**

### **УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

1. Исследование принципов экранирования полей и паразитных связей.

### **СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

#### **ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ**

### **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:

$$K_E = 20 \lg \frac{E_0}{E_1}, dB \quad K_E = 20 \lg \frac{H_0}{H_1}, dB \quad (3.1)$$

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, магнитостатическое 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. 3.1.

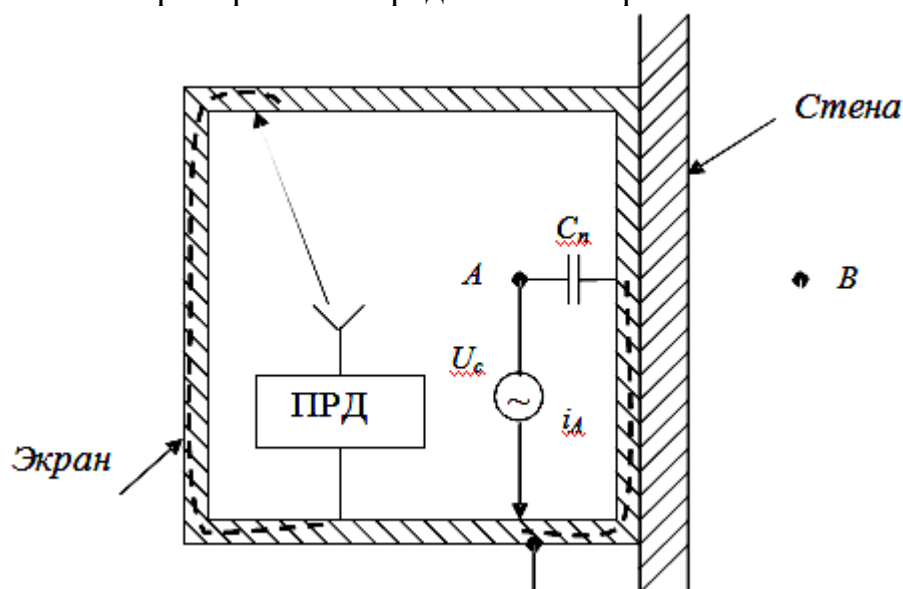


Рис. 3.1 – Принцип действия экранирования источника ЭМИ

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: магнитоэлектрическое и динамическое.**

**Магнитоэлектрическое 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. 3.2, 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.

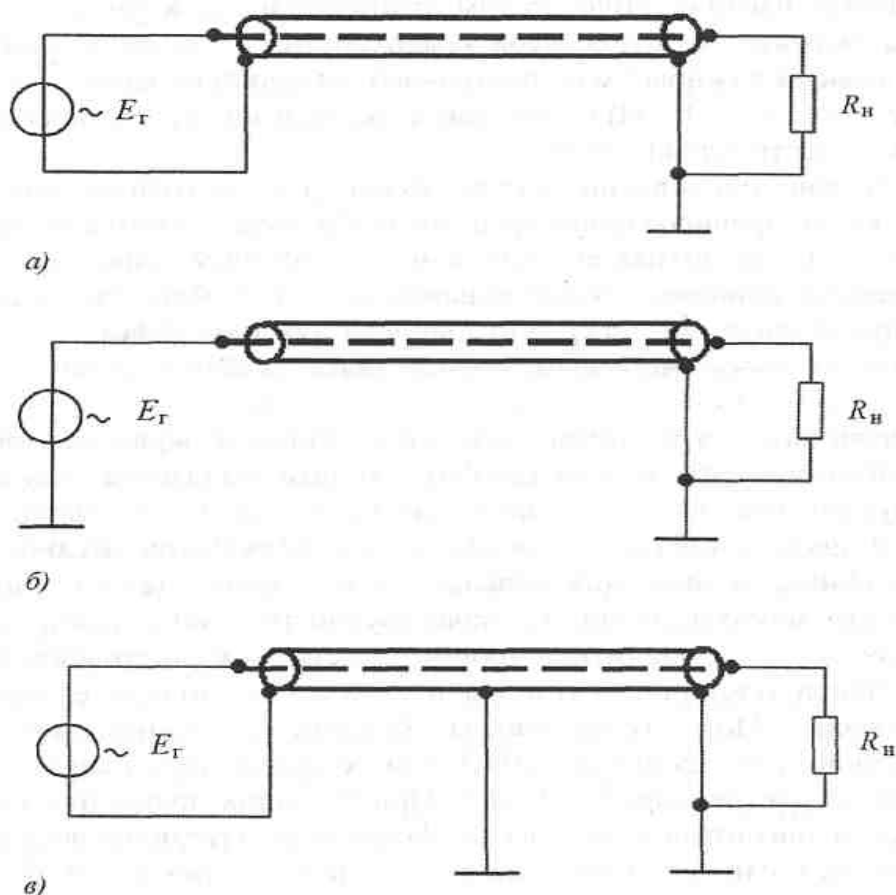


Рис. 3.2 – Полное экранирование провода от электрических и магнитных полей (а), экранирование провода от электрических полей (б), экранирование и замыкание части экрана провода на корпус (в)

При подключении общего провода генератора к корпусу, а не к экрану (рис. 3.2, 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. 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

Исходные данные для моделирования и исследований приведены в таблице 3.1.

## 3. Задание для работы

5) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.

6) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.

7) Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.

8) Составить отчет о проделанной работе по третьему вопросу в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

## 4. Порядок выполнения работы

**4.1. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.**

4.1.1. Собрать и отладить схему замещения, представленную на рис. 3.3, с указанными на схеме параметрами. Данной схемой моделируется электромагнитное излучение, создаваемое источником, помещенным в экран в соответствии с рис. 3.1, 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.

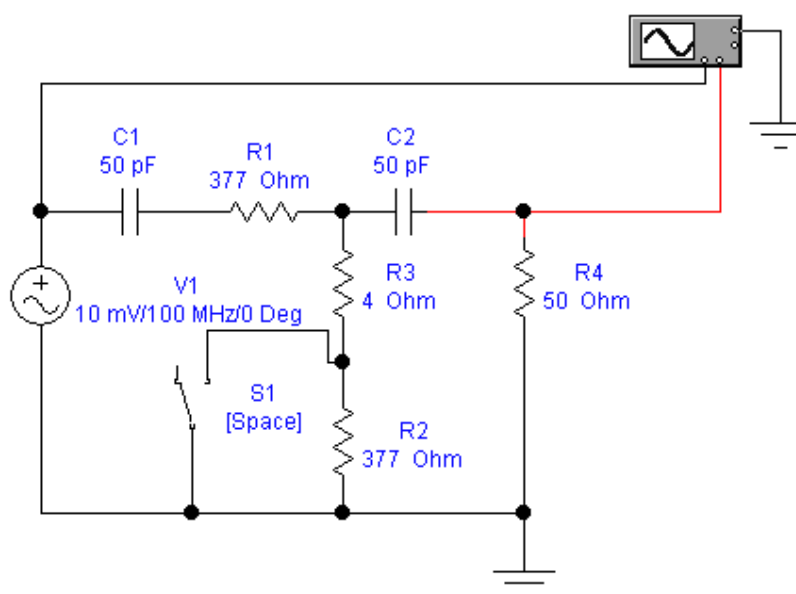


Рис. 3.3 – Моделируемая эквивалентная схема экранирования источника электромагнитного излучения

4.1.2. 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.

#### **4.2. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.**

4.2.1. Собрать и отладить схему замещения, представленную на рис. 3.4, с указанными на схеме параметрами. Данной схемой моделируется пример экранирования кабеля, представленный на рис. 3.2, б), то есть осуществляется экранирование только электрического поля. В этом случае между проводом и экраном возникает паразитная индуктивная связь, которая смоделирована за счет трансформатора T1. В трансформаторе T1 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.

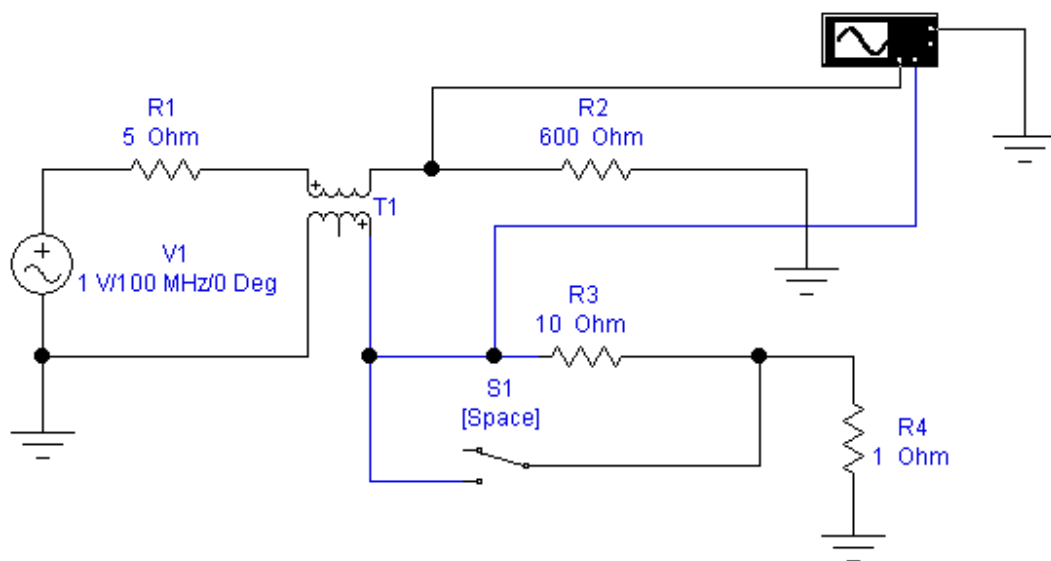


Рис. 3.4 – Моделируемая эквивалентная схема электрического экранирования провода

4.2.2. 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.

**4.3. Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.**

4.3.1. Собрать и отладить схему замещения, представленную на рис. 3.5, с указанными на схеме параметрами. Данной схемой моделируется пример экранирования кабеля, представленный на рис. 3.2, 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.

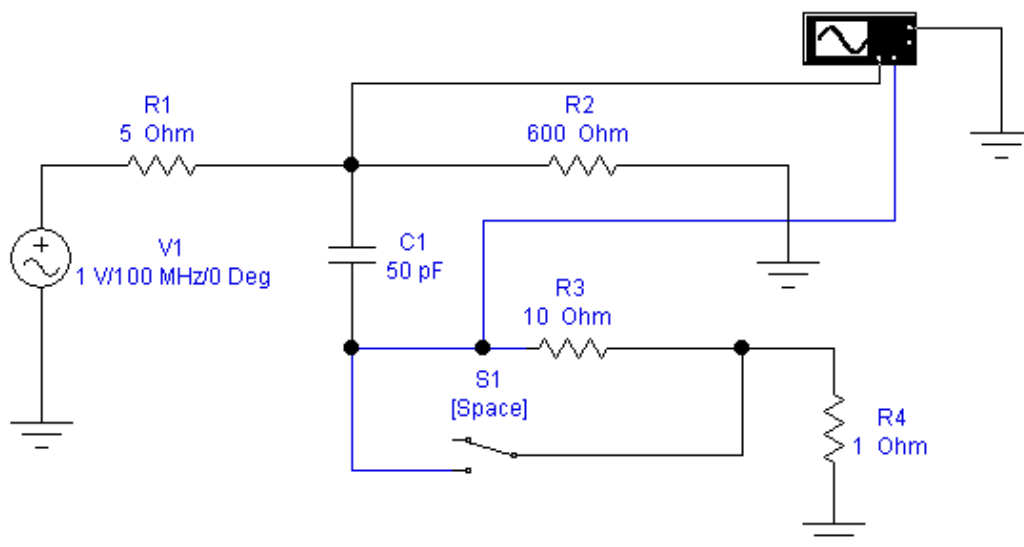


Рис. 3.5 – Моделируемая эквивалентная схема магнитного экранирования провода

4.3.2. 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.

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

В отчете привести:

- задание на выполнение работы;
- порядок проведения работы;
- исследуемые принципиальные эквивалентные схемы замещения;
- результаты расчетов;
- результаты исследований – эпюры напряжений (осциллограммы) для каждой исследуемой схемы по каждому каналу;
- сравнение полученных результатов с теорией.
- выводы о проделанной работе, с разъяснением физического смысла полученных результатов.

## **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 смоделированной схеме.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

19) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

20) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

21) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ

Время – 10 часов.

### УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

#### 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  $\omega_2$  (рис. 5.1, а);
- фильтры верхних частот (высокочастотные) – ФВЧ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от  $\omega_1$  до  $\omega_2 = \infty$  (рис. 5.1, б);
- полосовые (полосно-пропускающие) ПФ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от  $\omega_1$  до  $\omega_2$  (рис. 5.1, в);
- заграждающие или режекторные (полосно-задерживающие) ЗФ, пропускающие сигналы в диапазоне частот от 0 до  $\omega_1$  и от  $\omega_2$  до  $\infty$  (рис. 5.1, 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.

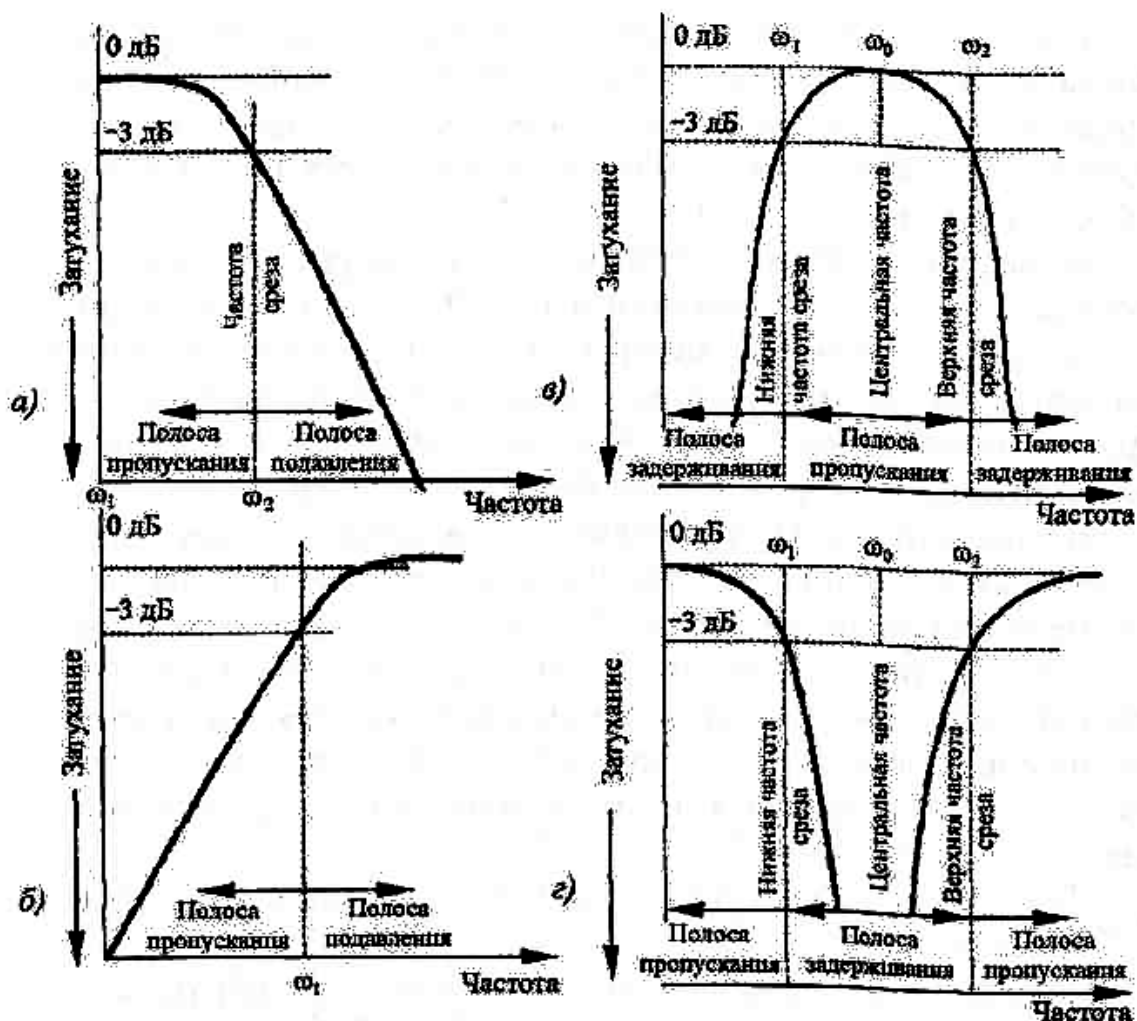


Рис. 5.1 – АЧХ помехоподавляющих фильтров

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. 5.2 и 5.3). 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 изменении частоты). Например, если емкостное реактивное сопротивление снижается при увеличении частоты, то индуктивное реактивное сопротивление увеличивается на соответствующую величину.

На рис. 5.2 и 5.3 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.

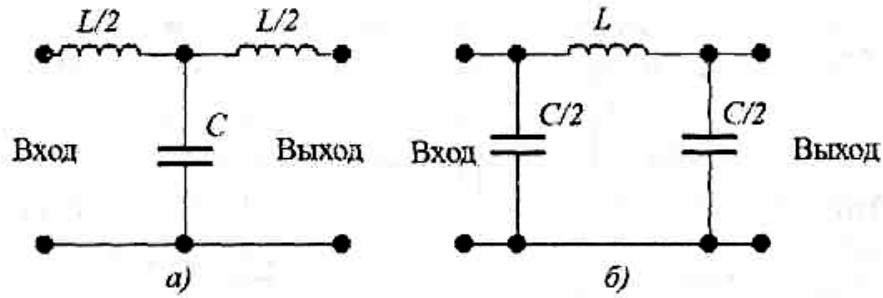


Рис. 5.2 – Симметричные фильтры нижних частот:  
а) - Т-образный, б) - П-образный

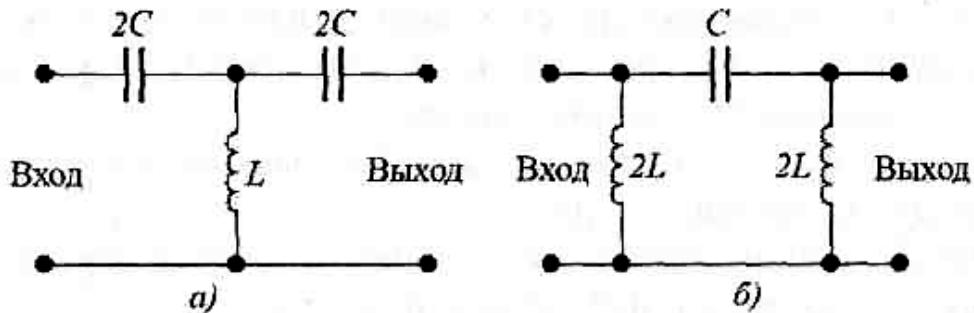


Рис. 5.3 – Симметричные фильтры высоких частот:  
а) - Т-образный, б) - П-образный

В НЧ фильтрах значения параметров выбираются по следующим выражениям:

$$L \approx \frac{2R}{\omega_2}; \quad \omega_2 \approx \frac{2}{\sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{2}{\omega_2 R}; \quad R \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5.1)$$

где  $R$  – активное или комплексное сопротивление нагрузки фильтра;  $\omega_2 = 2\pi F_o$  – круговая частота среза фильтра;  $F_2$  – линейная частота среза.

Формулы (5.1) могут быть выражены через линейную частоту среза:

$$L \approx \frac{R}{3,14 F_2}; \quad F_2 \approx \frac{1}{3,14 \sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{1}{3,14 F_2 R}, \quad (5.2)$$

Суммарная индуктивность Т-образного фильтра распределяется поровну между катушками (рис. 5.2, а) и суммарная емкость П-образного фильтра распределяется поровну между конденсаторами фильтра (рис. 5.2, б).

Расчетные уравнения для ВЧ фильтра:

$$L \approx \frac{R}{2\omega_1}; \quad \omega_1 = 2\pi F_1; \quad F_1 \approx \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{1}{4\omega_1 R}; \quad R \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5.3)$$

Формулы (5.3) могут быть выражены через линейную частоту среза:

$$L \approx \frac{R}{4\pi F_1}; \quad F_1 \approx \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}; \quad C \approx \frac{1}{8\pi F_1 R}; \quad R \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5.4)$$

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. 5.4 приведены схемы типовых полосно-заграждающих LC-фильтров Т-образной и П-образной структур.

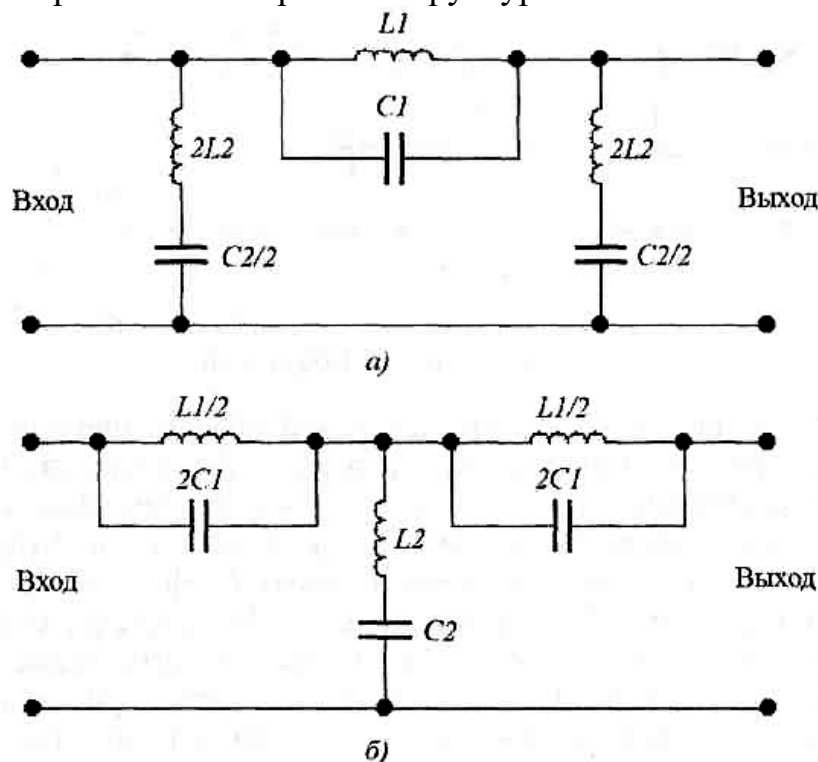


Рис. 5.4 – Схемы полосно-заграждающих фильтров:  
а) - П-образная; б) - Т-образная

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. 5.5 приведены схемы типовых полосно-пропускающих LC-фильтров Т-образной и П-образной структур.

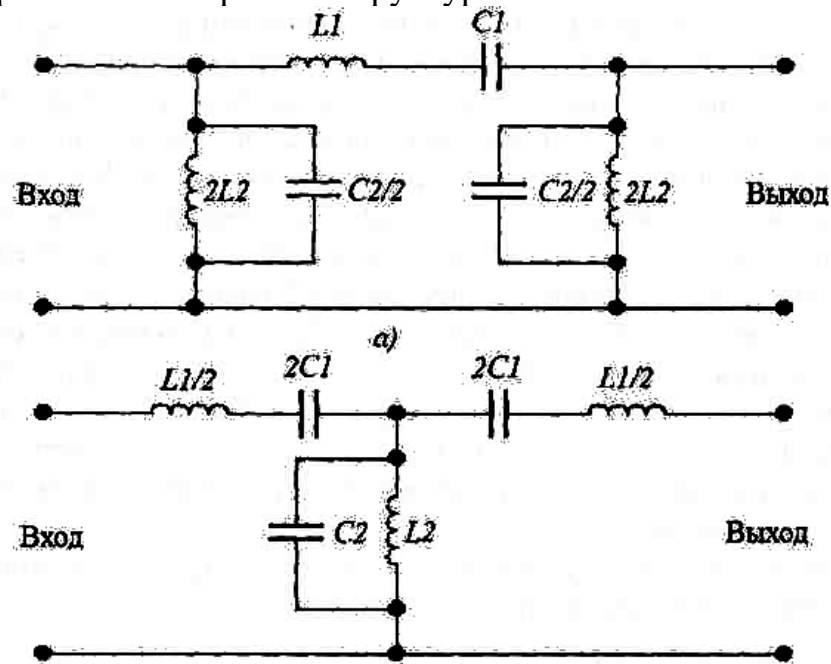


Рис. 5.5 – Схемы полосно-пропускающих фильтров:  
а) - П-образная; б) - Т-образная

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:

$$L_1 \approx \left( \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} \right) \cdot \frac{4\pi R}{\omega_1 \omega_2} \approx \frac{(F_2 - F_1)R}{\pi F_1 F_2}; \quad L_2 \approx \frac{R}{2(\omega_2 - \omega_1)} \approx \frac{R}{4\pi(F_2 - F_1)}; \quad (5.5)$$

$$C_1 \approx \frac{1}{2(\omega_2 - \omega_1)R} \approx \frac{1}{4\pi R(F_2 - F_1)}; \quad C_2 \approx \frac{2(\omega_2 - \omega_1)}{R\omega_1 \omega_2} \approx \frac{F_2 - F_1}{\pi R F_1 F_2}; \quad (5.6)$$

$$F_{\delta\alpha\zeta}(\hat{e}\tilde{A}\ddot{o}) \approx \frac{159}{\sqrt{L(\hat{i}\hat{e}\tilde{A}\hat{i}) \cdot C(\hat{i}\hat{e}\hat{O})}}; \quad (5.7)$$

Для расчета параметров полосовых фильтров обеих структур можно воспользоваться следующими формулами:

$$L_1 \approx \frac{2R}{\omega_2 - \omega_1} \approx \frac{R}{\pi(F_2 - F_1)}; \quad L_2 \approx \frac{(\omega_2 - \omega_1)R}{2\omega_1 \omega_2} \approx \frac{(F_2 - F_1)R}{4\pi F_1 F_2}; \quad (5.8)$$

$$C_1 \approx \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{2\omega_1 \omega_2 R} \approx \frac{F_2 - F_1}{4\pi F_1 F_2 R}; \quad C_2 \approx \frac{2}{(\omega_2 - \omega_1)R} \approx \frac{1}{\pi R(F_2 - F_1)}; \quad (5.9)$$

$$F_{\delta\alpha\zeta}(\hat{e}\tilde{A}\ddot{o}) \approx \frac{159}{\sqrt{L(\hat{i}\hat{e}\tilde{A}\hat{i}) \cdot C(\hat{i}\hat{e}\hat{O})}}; \quad (5.10)$$

## Содержание практической работы, выполняемой студентами

### 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

Исходные данные для моделирования и исследований приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для моделирования

| № вар. | F <sub>2</sub> , кГц | F <sub>1</sub> , кГц | R, Ом | № вар. | F <sub>2</sub> , кГц | F <sub>1</sub> , 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  |

### 3. Задание для работы

- 9) Смоделировать и исследовать пассивный фильтр низких частот.
- 10) Смоделировать и исследовать пассивный фильтр высоких частот.

11) Смоделировать и исследовать пассивный полосно-пропускающий фильтр.

12) Смоделировать и исследовать пассивный полосно-заграждающий фильтр.

13) Составить отчет о проделанной работе по этому вопросу в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

#### 4. Порядок выполнения работы

##### 4.1. Смоделировать и исследовать пассивный фильтр низких частот.

4.1.1. 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 (5.2), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушки индуктивности  $L$ , затем емкости  $C$ .

4.1.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного фильтра нижних частот согласно схеме, приведенной на рис. 5.6.

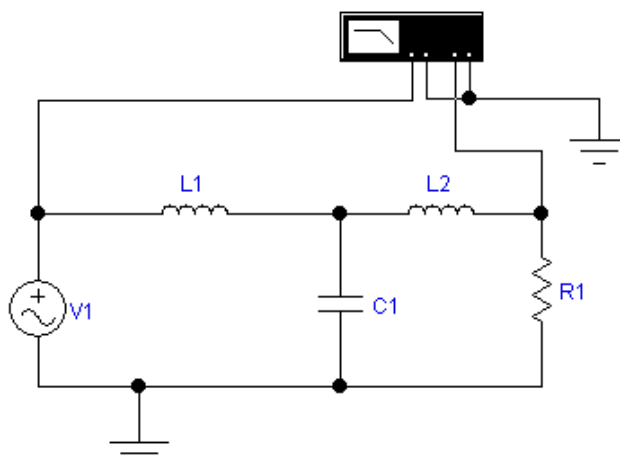


Рис. 5.6 – Моделируемая схема Т-образного НЧ фильтра

4.1.3. 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.

4.1.4. 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.

4.1.5. 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.

4.1.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного фильтра нижних частот согласно схеме, приведенной на рис. 5.7.

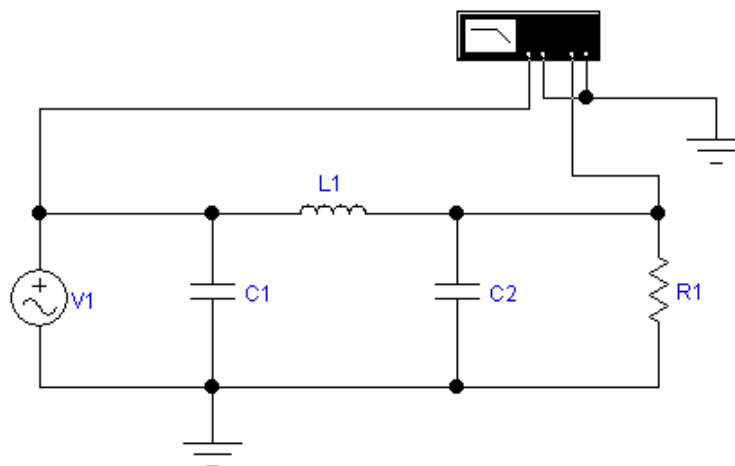


Рис. 5.7 – Моделируемая схема П-образного НЧ фильтра

4.1.7. 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.

4.1.8. 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.

4.1.9. 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.

4.1.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных НЧ фильтров.

#### ***4.2. Смоделировать и исследовать пассивный фильтр высоких частот.***

4.2.1. 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 (5.4), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушки индуктивности  $L$ , затем емкости  $C$ .

4.2.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного фильтра высоких частот согласно схеме, приведенной на рис. 5.8.

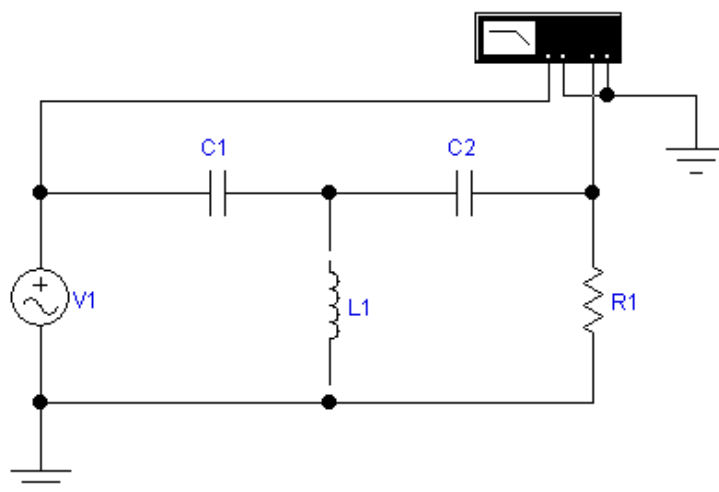


Рис. 5.8 – Моделируемая схема Т-образного ВЧ фильтра

4.2.3. 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.

4.2.4. 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.

4.2.5. 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.

4.2.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного фильтра высоких частот согласно схеме, приведенной на рис. 5.9.

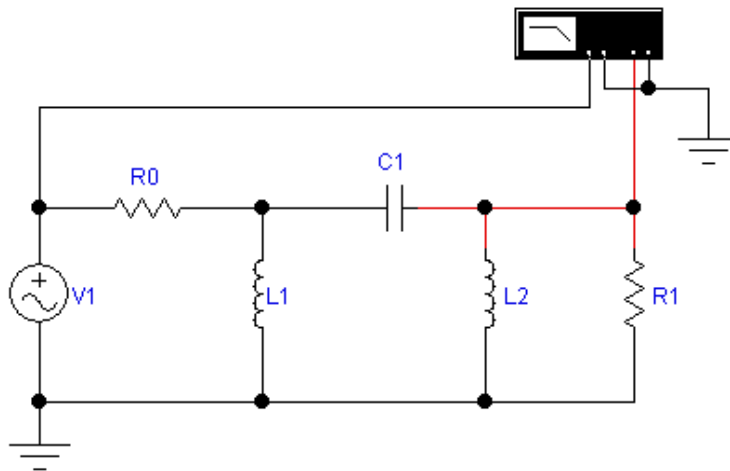


Рис. 5.9 – Моделируемая схема П-образного ВЧ фильтра

4.2.7. 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.

4.2.8. 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.

4.2.9. 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.

4.2.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных ВЧ фильтров.

### **4.3. Смоделировать и исследовать пассивный полосно-пропускающий фильтр.**

4.3.1. 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 (5.8) и (5.9), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушек индуктивности  $L$ , затем емкостей  $C$ .

4.3.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного полосно-пропускающего фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 5.10.

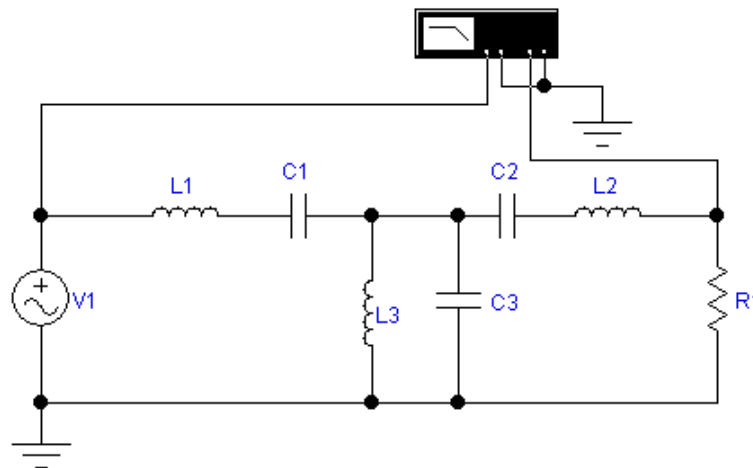


Рис. 5.10 – Моделируемая схема Т-образного полосового фильтра

4.3.3. 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  $L1$  и  $L2$ . Установить в источнике  $V1$  напряжение, равное 1 В, а частоту – 1 КГц.

4.3.4. 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.

4.3.5. 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. 5.11.

4.3.7. 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  $L1$  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.

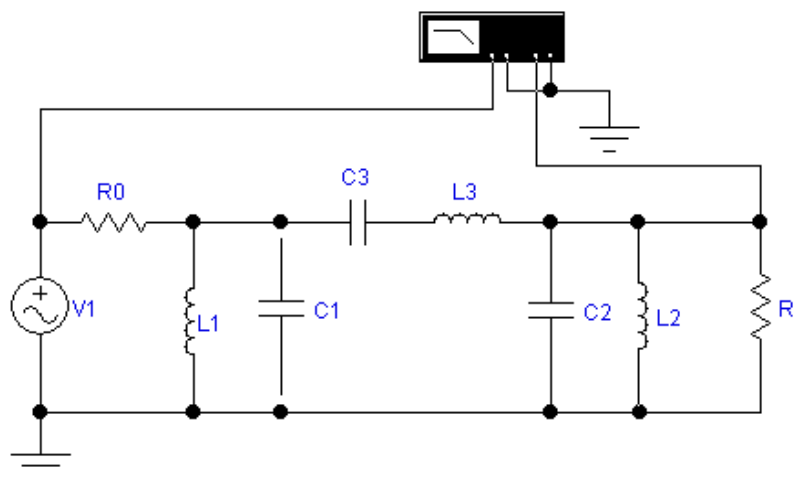


Рис. 5.11 – Моделируемая схема П-образного полосового фильтра

4.3.8. 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.

4.3.9. 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.

4.3.10. Сделать сравнительные выводы по результатам исследований пассивных полосовых фильтров.

#### **4.4. Смоделировать и исследовать пассивный полосно-заграждающий фильтр.**

4.4.1. 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 (5.5) и (5.6), в системе компьютерной математики «Mathcad – 14» рассчитать сначала величину катушек индуктивности  $L$ , затем емкостей  $C$ .

4.4.2. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель Т-образного заграждающего фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 5.12.

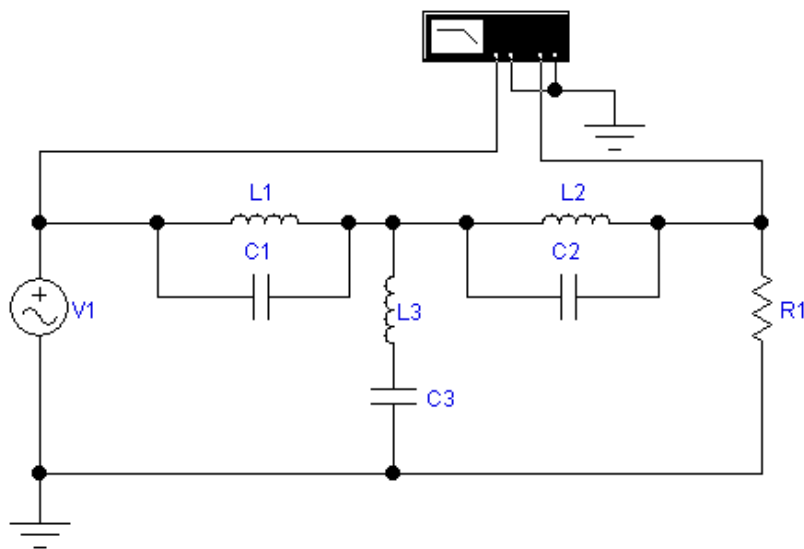


Рис. 5.12 – Моделируемая схема Т-образного заграждающего фильтра

4.4.3. 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.

4.4.4. 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.

4.4.5. 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.

4.4.6. В симуляторе электронных схем «Electronics Workbench» собрать модель П-образного заграждающего фильтра согласно схеме, приведенной на рис. 5.13.

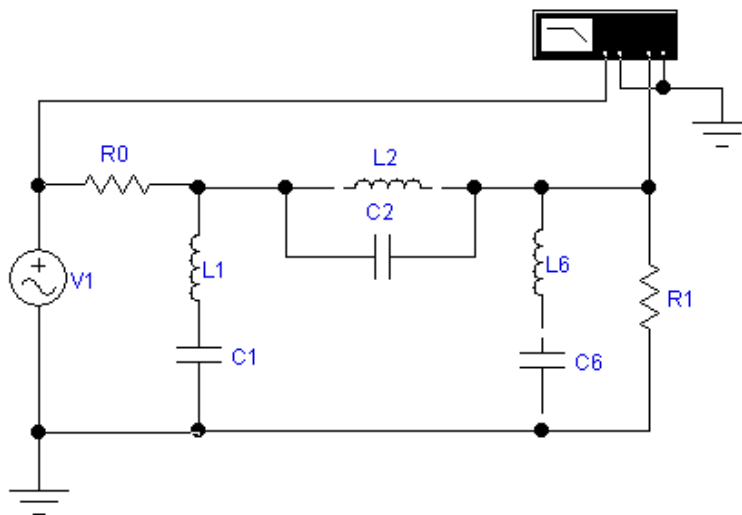


Рис. 5.13 – Моделируемая схема П-образного заграждающего фильтра

4.4.7. 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 конденсатор имеет емкость, равную удвоенному расчетному значению. Установить в источнике  $V1$  напряжение, равное 1 В с частотой – 1 КГц, а также

величину внутреннего сопротивления источника –  $R_0=1\text{ Ом}$ .

4.4.8. 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.

4.4.9. 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.

**4.5. Составить отчет о проделанной работе по пятому вопросу в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.**

В отчете привести:

- задание на выполнение работы,
- порядок проведения работы,
- принципиальные схемы фильтров,
- результаты расчетов параметров элементов фильтров и характеристик;
- результаты измерений амплитудно-частотных характеристик для каждой исследуемой схемы фильтра;
- эпюры напряжений (осциллограммы) для каждого исследуемого

фильтра;

- сравнение расчетных результатов с экспериментами;
- выводы о проделанной работе, с разъяснением физического смысла полученных результатов.

### **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 смоделированной схеме.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

22) Харченко Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие. – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

23) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

24) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 – 16.  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ**

**Время – 4 часа.**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование и исследование звуковых волн и речеподобных акустических сигналов.**

**СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Передача информации по системам вещания, телефонной связи, звукозаписи и воспроизведения звука предназначена для человека. Поэтому для правильного проектирования и эксплуатации этих систем необходимо знать свойства слуха человека.

Орган слуха человека является своеобразным приемником звука, резко отличающимся от приемников звука, создаваемых человеком. Ухо человека обладает свойствами частотного анализатора, дискретным восприятием по частотному и динамическому диапазонам. Так аналоговый звуковой сигнал превращается в последовательность электрических импульсов двоичного типа. Все эти операции осуществляются во внутреннем ухе, в улитке. В улитке находится базилярная мембрана, состоящая из большого числа волокон, слабо связанных между собой. Вдоль основной мембраны расположены нервные окончания, каждое из которых возбуждается от прикосновения к ним волокон основной мембраны, посылая в слуховой центр мозга электрические импульсы.

Там эти импульсы подвергаются сложному анализу, в результате которого человек определяет передаваемое сообщение. Воспринимаемый слухом частотный диапазон ограничен снизу частотой 16...20 Гц, а сверху - частотой 20000Гц.

## УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ

### Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

#### 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА СЛЫШИМОСТИ

Если волокно основной мембраны при своих колебаниях не достигает до ближайшего к нему нервного окончания, то человек такой звук не слышит. Но как только при увеличении амплитуды колебаний волокна оно коснется нервного окончания, произойдет это раздражение. Нервное окончание сразу же начнет посылать электрические импульсы в слуховой центр мозга, и звук будет услышан. *Этот скачкообразный переход из слышимого состояния в неслышимое и обратно называют порогом слышимости.* Абсолютное значение слухового ощущения на пороге слышимости мало, но все же имеет вполне конечное значение. Порог слышимости зависит от частоты. На рисунке 1 приведены эти зависимости, причем по оси ординат отложены уровни звукового давления.

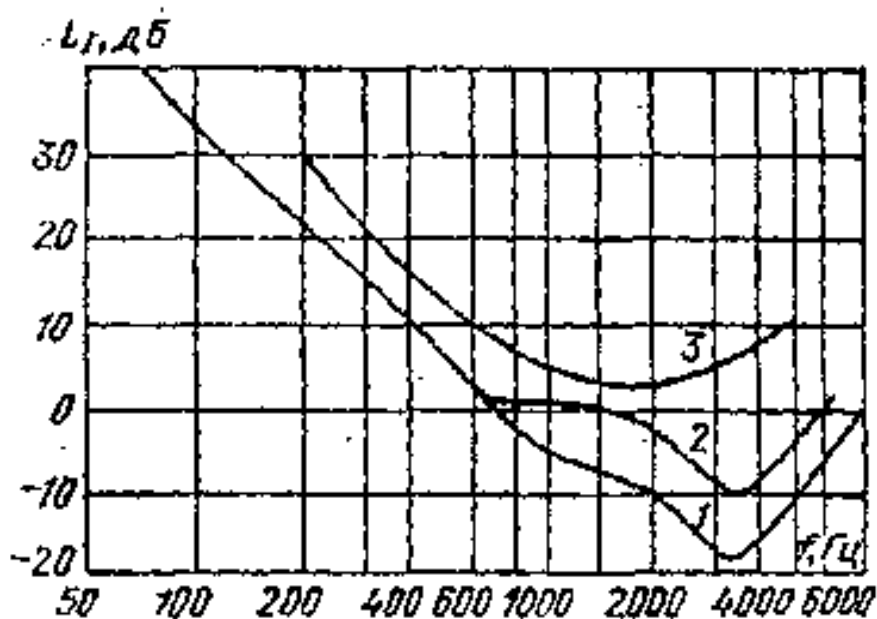


Рис. 1 – Частотная зависимость уровней порога слышимости

Кривая 1 на рис. 1 соответствует диффузному бинауральному слушанию (обоими ушами), когда давление создается множеством источников звука, беспорядочно расположенных в горизонтальной плоскости вокруг головы (диффузный порог). Кривая 2 соответствует фронтальному бинауральному слушанию, когда давление создается источником звука, расположенным на некотором расстоянии перед слушателем (фронтальный порог). Кривая 3 соответствует моноуральному слушанию (одним ухом), когда давление в ушной раковине создается с помощью телефона (порог по давлению).

Таким образом, различия в зависимостях порога слышимости от частоты

обусловлены разными условиями измерений порога.

### **Краткие сведения об акустических шумах**

**Шум** – это беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. В быту под шумом понимают разного рода нежелательные акустические помехи при восприятии речи, музыки, а также любые звуки, мешающие отдыху, работе.

Источниками акустически слышимого и неслышимого шумов могут служить любые колебания в твёрдых, жидких и газообразных средах; в технике основные источники шумов – различные двигатели и механизмы.

Качественные особенности ощущения при восприятии акустического шума органами слуха и организма в целом зависят от его интенсивности (громкости звука) и спектрального состава. Под влиянием шума нарушается точность координации движений, снижается производительность труда. В связи с единой этиологией клинических нарушений в медицинской литературе появился термин "шумовая болезнь".

Исходя из аналогий физической природы происхождения шумов и их параметрами распределения случайного процесса (спектральной плотности) некоторым видам шумовых сигналов приписывают определённые цвета. Эта абстракция широко используется в отраслях техники, имеющих дело с шумом (акустика, электроника, физика и т.д.).

В данных отраслях техники принято выделять следующие цвета шумов: белый шум, розовый шум, броуновский (красный) шум, синий (голубой) шум, фиолетовый шум и серый шум.

**Белый шум** – это сигнал с равномерной спектральной плотностью на всех частотах и дисперсией, равной бесконечности. Является стационарным случайным процессом. **Спектр белого шума** (см. рис. 4) имеет одинаковую мощность (спектральную плотность) в любой полосе частот. К примеру, полоса сигнала в 20 герц между 40 и 60 герц имеет такую же мощность, что и полоса между 4000 и 4020 герц. Неограниченный по частоте белый шум возможен только в теории, так как в этом случае его мощность бесконечна. На практике сигнал может быть белым шумом только в ограниченной полосе частот.

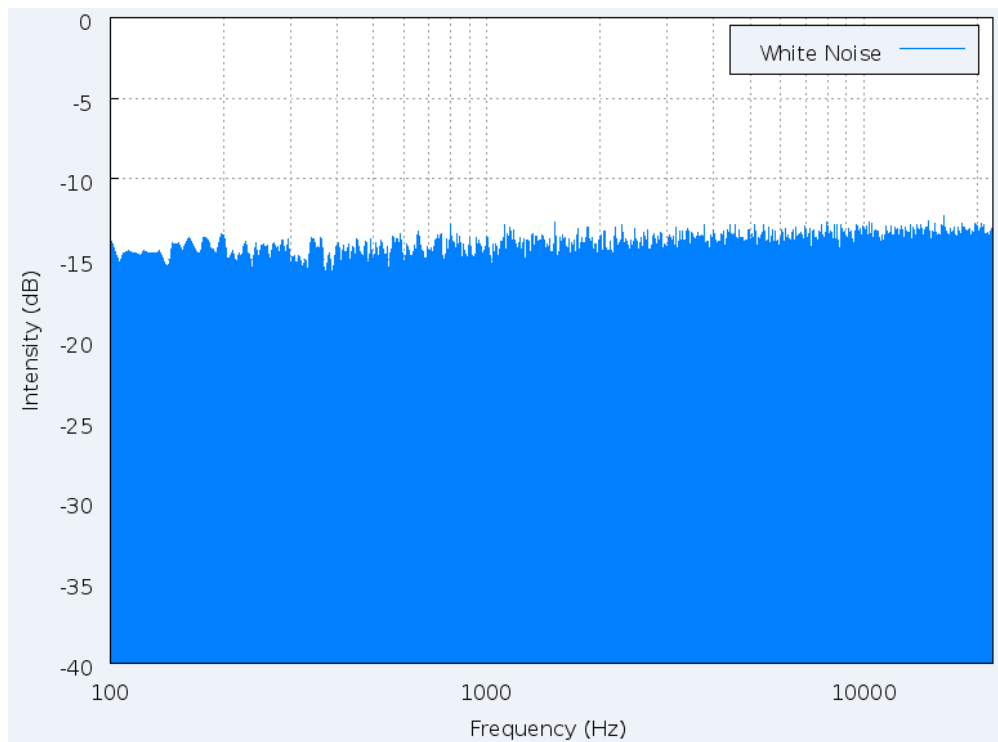


Рис. 4 – Спектр белого шума

**Спектральная плотность розового шума** обратно пропорциональна частоте, то есть определяется формулой  $\sim 1/f$ , следовательно. Спектр розового шума (см. рис. 5) является равномерным в логарифмической шкале частот. Например, мощность сигнала в полосе частот между 40 и 60 герц равна мощности в полосе между 4000 и 6000 герц. Спектральная плотность такого сигнала по сравнению с белым шумом затухает на 3 децибела на каждую октаву. Пример розового шума – звук пролетающего вертолѐта. Розовый шум обнаруживается, например, в сердечных ритмах, в графиках электрической активности мозга, в электромагнитном излучении космических тел. Иногда розовым шумом называют любой шум, спектральная плотность которого уменьшается с увеличением частоты.

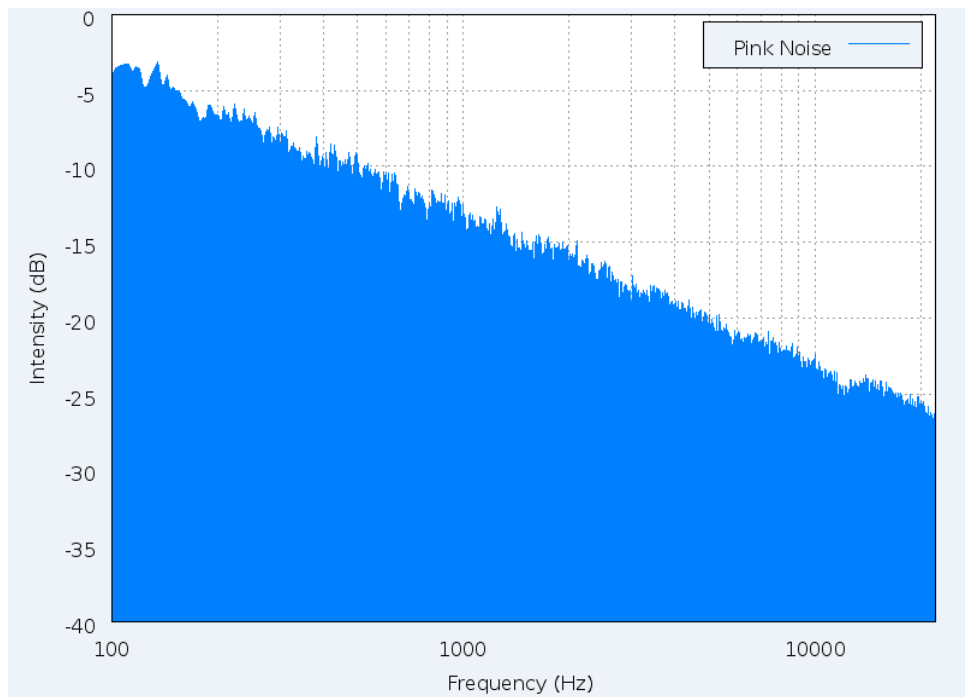


Рис. 5 – Спектр розового шума

**Спектральная плотность красного (броуновского) шума** пропорциональна  $1/f^2$ , где  $f$  — частота. Это означает, что на низких частотах шум имеет больше энергии, даже больше, чем розовый шум. Энергия шума падает на 6 децибел на октаву. Акустический красный шум слышится как приглушённый, в сравнении с белым или розовым шумом. Может быть получен, если проинтегрировать белый шум, или с помощью алгоритма, симулирующего броуновское движение. Спектр красного шума (см. рис. 6) в логарифмической шкале зеркально противоположен спектру фиолетового шума. На слух броуновский шум воспринимается более «тёплым», чем белый. Иногда (обычно в текстах, переведенных с английского языка) этот шум называют также коричневым, слепо переводя фамилию Роберта Броуна (Brown) на русский — причем с английского, хотя Броун был шотландцем. Впрочем, коричневый и красный цвета спектрально весьма близки.

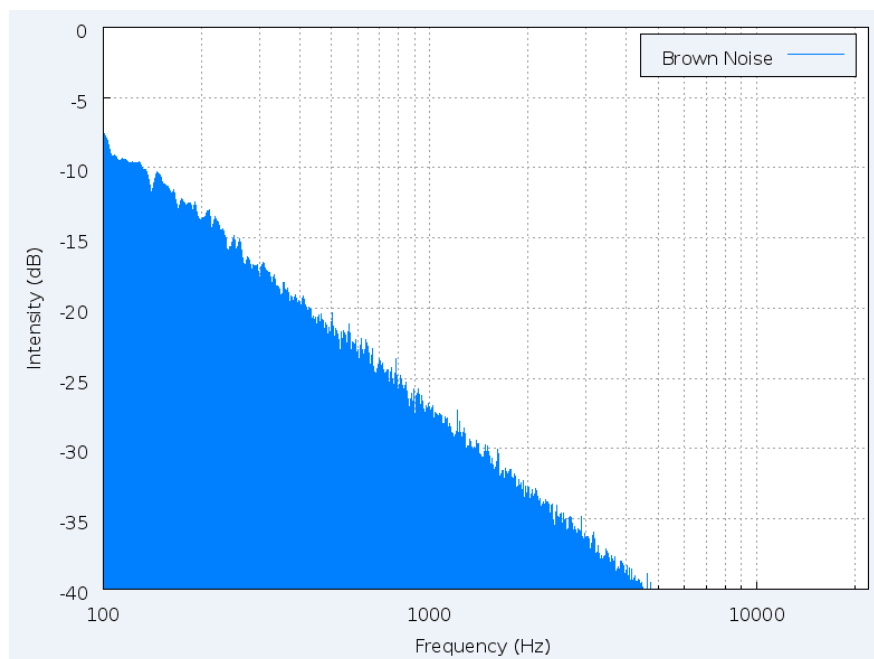


Рис. 6 – Спектр красного (броуновского) шума

**Синий (голубой) шум** – вид шумоподобного сигнала, чья спектральная плотность увеличивается на 3 дБ на октаву (см. рис.7). То есть его спектральная плотность пропорциональна частоте и, аналогично белому шуму, на практике он должен быть ограничен по частоте. На слух синий шум воспринимается более резким, нежели белый. Синий шум получается, если продифференцировать розовый шум; их спектры зеркальны.

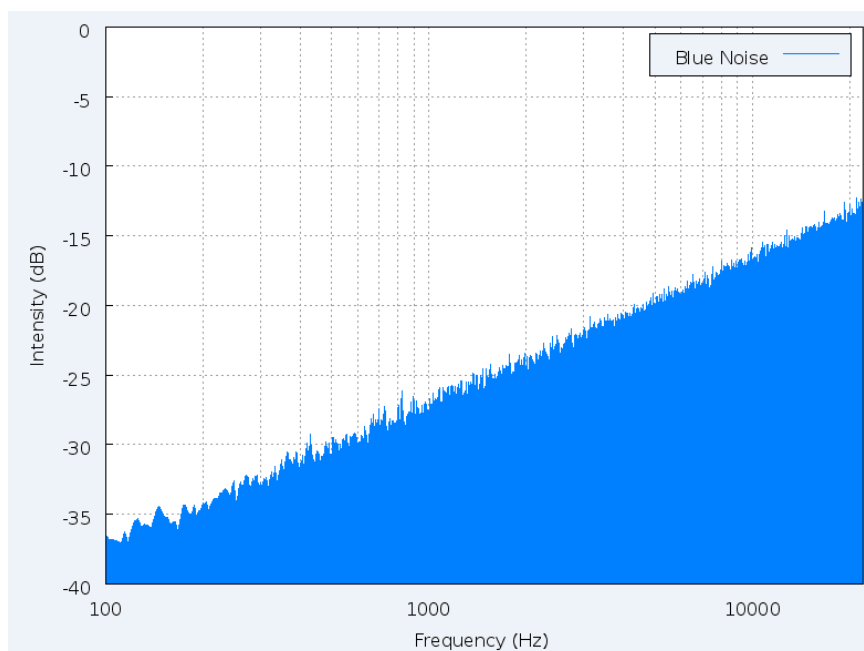


Рис. 7 – Спектр синего (голубого) шума

**Фиолетовый шум** – вид шумоподобного сигнала, чья спектральная плотность увеличивается на 6 дБ на октаву (см. рис. 8). То есть его спектральная плотность пропорциональна квадрату частоты и, аналогично белому шуму, на

практике он должен быть ограничен по частоте. Фиолетовый шум получается, если продифференцировать белый шум. Спектр фиолетового шума зеркально противоположен спектру красного шума.

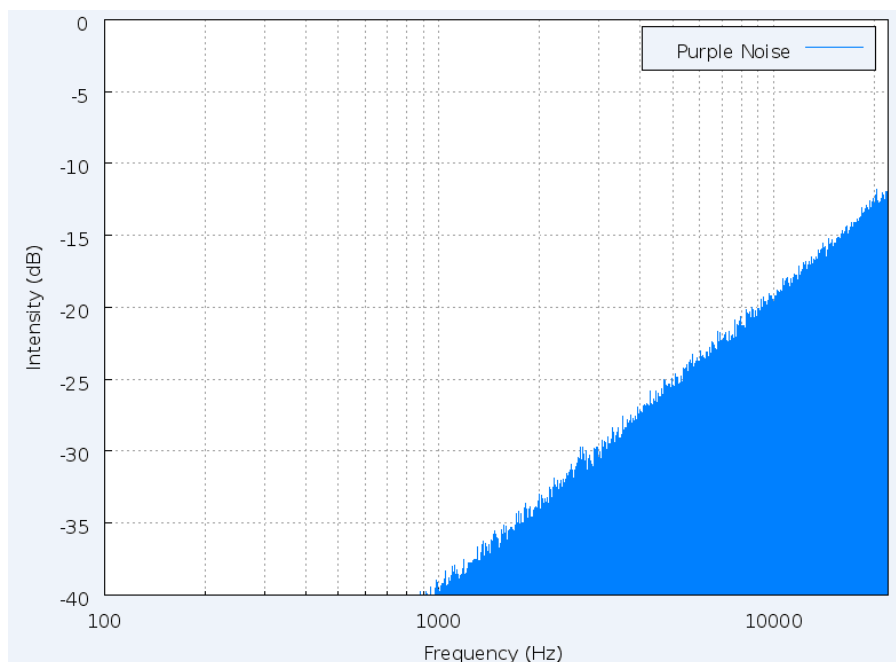


Рис. 8 – Спектр фиолетового шума

*Термин серый шум относится к шумовому сигналу, который имеет одинаковую громкость для человеческого уха на всём диапазоне частот. Спектр серого шума (см. рис. 9) получается, если сложить спектры броуновского и фиолетового шумов. В спектре серого шума виден большой «провал» на средних частотах, однако человеческое ухо воспринимает серый шум точно так же, как и белый.*

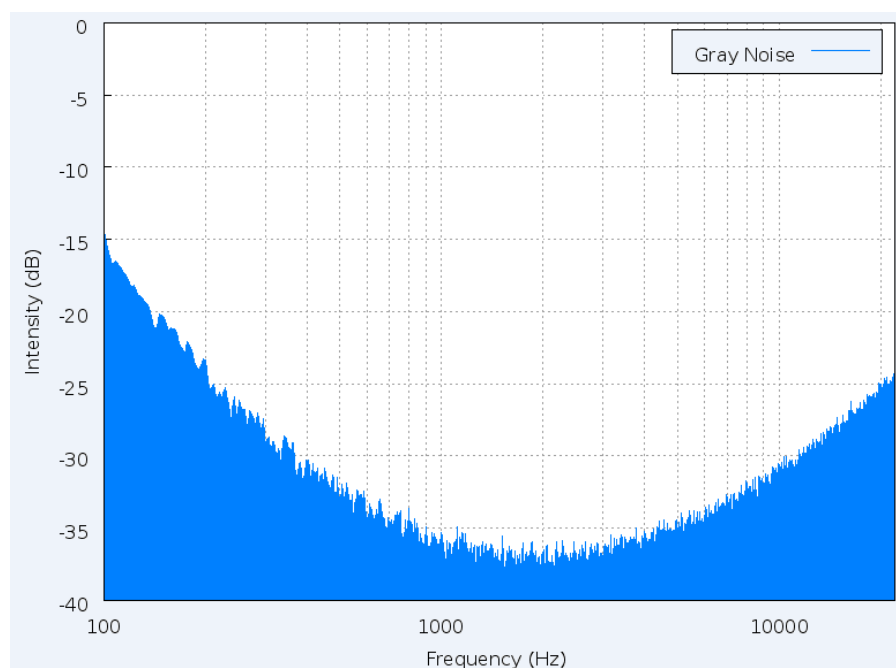


Рис. 9 – Спектр серого шума

## Содержание практической работы, выполняемой студентами

### 1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с проигрывателем «Windows Media» и программным редактором «Sine Wave Generator».
- Лабораторная установка (рис. 10).

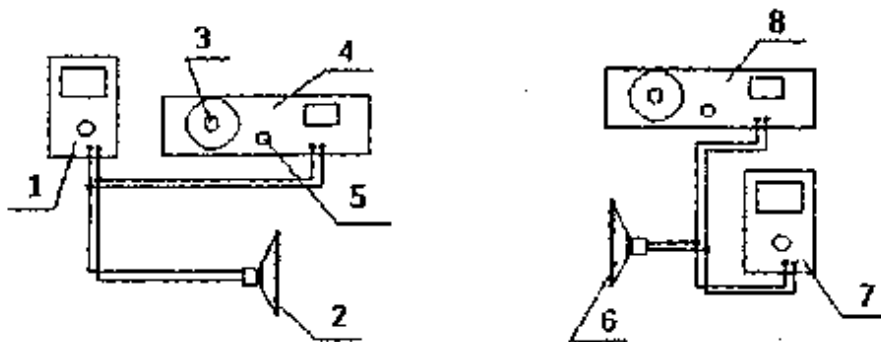


Рисунок 10 – Схема лабораторной установки

В состав лабораторной установки входит:

- 1 – Измеритель уровня интенсивности звука или уровня звукового давления.
- 2 – Динамик, излучающий тональные звуковые сигналы.
- 3 – Ручка регулирования частоты тонального генератора.
- 4 – Тональный генератор.
- 5 – Ручка регулирования амплитуды тонального сигнала.
- 6 – Динамик, излучающий маскирующие тональные сигналы и акустические шумы.
- 7 – Измеритель уровня интенсивности маскирующего тона.
- 8 – Второй тональный генератор или шумовой генератор.

Программно тональный генератор реализован с помощью редактора «Sine Wave Generator» (рис. 11).

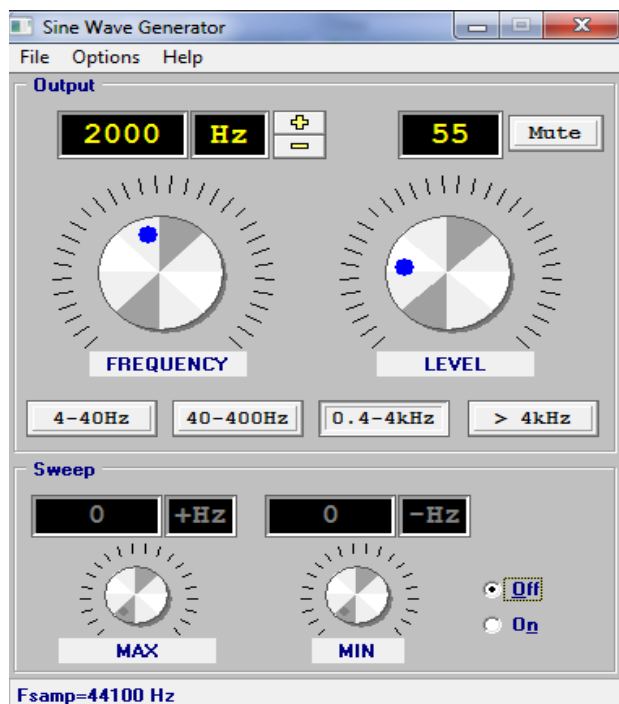


Рис. 11 – Программный тональный генератор «Sine Wave Generator»

Генератор шума реализован с помощью проигрывателя «Windows Media», в список воспроизведения которого занесены звуки акустических шумов (см. рис. 12).

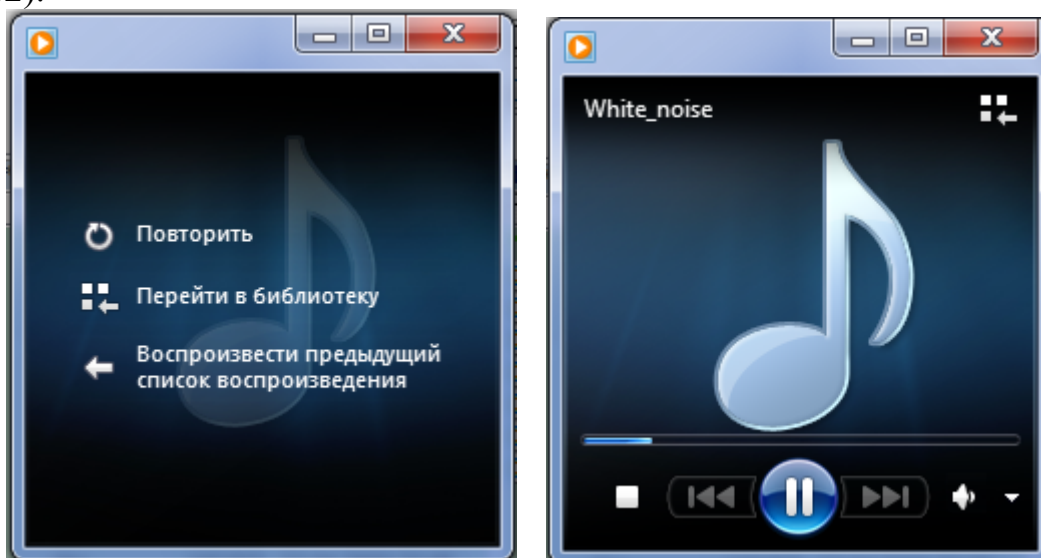


Рис. 12 – Программный генератор шума на основе проигрывателя «Windows Media»

### 3. Задание для работы

- 14) Измерить и построить зависимость порога слышимости от частоты.
- 15) Исследовать эффективность маскировки звуков при воздействии тонального маскирующего звука и различных видов шумов.
- 16) Составить отчет о проделанной работе в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

### 4. Порядок выполнения работы

#### 4.1. Порядок выполнения работы на лабораторной установке

4.1.1. Включить тональный генератор. Установить частоту основного тона  $f_0=100$  Гц.

4.1.2. Плавно изменяя амплитуду звукового давления до порога слышимости, снять показания в дБ измерителя уровня интенсивности или показания измерителя звукового давления. Зафиксировать порог слышимости.

4.1.3. Изменить частоту тона и повторить предыдущий пункт до частоты  $f_0=4000$  Гц с шагом 200 Гц от 100 Гц до 2000 Гц и с шагом 400 Гц от 2000 Гц до 4000 Гц.

4.1.4. Построить кривую порога слышимости.

4.1.5. Включить второй тональный генератор. Установить частоту маскирующего тона  $f_m=400$  Гц, уровень 80 дБ. Повторяя предыдущие пункты снять зависимость порога слышимости основного тона при воздействии данного маскирующего тона, находя минимальный уровень основного тона, который может быть услышан на фоне мешающего (маскирующего) тона.

4.1.6. Установить частоту маскирующего тона  $f_m=1200$  Гц, уровень 80 дБ. Снять зависимость порога слышимости основного тона при воздействии данного

маскирующего тона, находя минимальный уровень основного тона, который может быть услышан на фоне мешающего (маскирующего) тона.

4.1.7. Установить частоту маскирующего тона  $f_m=2400$  Гц, уровень 80 дБ. Снять зависимость порога слышимости основного тона при воздействии данного маскирующего тона, находя минимальный уровень основного тона, который может быть услышан на фоне мешающего (маскирующего) тона.

#### **4.2. Порядок выполнения работы на ПЭВМ**

4.2.1. Запустить программу «Sine.exe», на экране монитора высветится интерфейс программного генератора «Sine Wave Generator». Отключить свипер (Sweep – off), то есть блок звуковых эффектов, при этом ручки «Min» и «Max» установить в нулевое положение. Включить программный тональный генератор, нажав кнопку «Mute».

4.2.2. Включить диапазон частот «0,4 – 4 кГц», ручкой «FREQUENCY» установить частоту основного тона, равную 400 Гц. Плавно и очень медленно вращая ручку «LEVEL» уровня звука, на слух измерить порог слышимости.

4.2.3. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата.

4.2.4. Пересчитать уровень звука из абсолютных единиц в относительные единицы децибелы. Построить график зависимости порога слышимости в децибелах от частоты звука.

4.2.5. Включить второй программный генератор «Sine Wave Generator», на котором установить частоту маскирующего тона 1000 кГц, включив основной тональный генератор и медленно вращая ручку «FREQUENCY» прослушать суммарный звук, представляющий собой биения двух тональных сигналов, во всем диапазоне частот «0,4 – 4 кГц». Сделать выводы о разборчивости исходного тонального сигнала.

4.2.6. Повторить пункт 4.2.5 для частоты маскирующего тона 3000 кГц. Сравнить эффективность маскирования основного тона маскирующими сигналами с частотами 1000 и 3000 Гц.

4.2.7. Запустить файл «White\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке белым шумом.

4.2.8. Запустить файл «Pink\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук розового шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке розовым шумом.

4.2.9. Запустить файл «Brown\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук коричневого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке красным шумом.

4.2.10. Запустить файл «Blue\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке голубым шумом.

4.2.11. Запустить файл «Purple\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке фиолетовым шумом.

4.2.12. Запустить файл «Gray\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке серым шумом.

4.2.12. Сделать выводы об эффективности маскировки звуков шумами различных видов.

4.3. Оформить отчет о проделанной работе.

## 5. Требования к отчету о проделанной лабораторной работе.

В отчете привести:

- задание на выполнение работы,
- схему лабораторной установки,
- порядок проведения работы,
- таблицы результатов измерений и графики зависимости порога слышимости в тишине и при маскировке различными видами шумов,
- сравнение расчетных теоретических результатов с экспериментами;
- выводы о проделанной работе.

Образец оформления таблиц результатов измерений:

| Частота,<br>Гц | Уровень порога слышимости в условиях тишины в абс. ед. | Уровень порога слышимости в условиях тишины в дБ | Уровень порога слышимости в дБ при маскировке белым шумом | Уровень маскировки в дБ |
|----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 400            | 7                                                      | 17                                               | 37                                                        | 20                      |
| 600            | 4                                                      | 12                                               | 32                                                        | 20                      |
| ...            |                                                        |                                                  |                                                           |                         |
| 1800           | 3                                                      | 9,5                                              | 32,5                                                      | 23                      |
| 2000           | 2                                                      |                                                  |                                                           |                         |
| 2400           | 3                                                      | 9,5                                              | 32,5                                                      | 23                      |
| ...            |                                                        |                                                  |                                                           |                         |
| 4000           | 5                                                      | 14                                               | 40                                                        | 26                      |

## 6. Контрольные вопросы для подготовки к защите отчета:

- 1) Сущность порога слышимости.
- 2) Виды порогов слышимости, их условия измерений.
- 3) Характеристика порога слышимости.

- 4) Определение маскировки, порядок ее расчета.
- 5) Сущность и особенности маскировки тональным маскером.
- 6) Характеристика белого шума.
- 7) Характеристика розового шума.
- 8) Характеристика красного (броуновского) шума.
- 9) Характеристика голубого (броуновского) шума.
- 10) Характеристика фиолетового (броуновского) шума.
- 11) Характеристика серого шума.
- 12) Эффективность маскировки белым шумом.
- 13) Эффективность маскировки розовым шумом.
- 14) Характеристика лабораторной установки.
- 15) Характеристика программного генератора «Sine Wave Generator», порядок работы с ним.
- 16) Порядок выполнения работы на лабораторной установке.
- 17) Порядок выполнения работы на ПЭВМ с помощью программных редакторов.
- 18) Порядок измерения уровня порога слышимости.
- 19) Порядок измерения уровня маскировки.
- 20) Сравнительная характеристика эффективности маскировки при различных видах шумов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

- 25) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.
- 26) Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.
- 27) Лепешкин О.М. Физические основы математические и информационные модели защиты информации: Электронное учебное пособие. – Ставрополь: СГУ, 2005.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 – 16.  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ**

**Время – 4 часа.**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование и исследование акустических свойств помещений.**

**СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Передача информации по системам вещания, телефонной связи, звукозаписи и воспроизведения звука предназначена для человека. Поэтому для правильного проектирования и эксплуатации этих систем необходимо знать свойства слуха человека.

Орган слуха человека является своеобразным приемником звука, резко отличающимся от приемников звука, создаваемых человеком. Ухо человека обладает свойствами частотного анализатора, дискретным восприятием по частотному и динамическому диапазонам. Так аналоговый звуковой сигнал превращается в последовательность электрических импульсов двоичного типа. Все эти операции осуществляются во внутреннем ухе, в улитке. В улитке находится базилярная мембрана, состоящая из большого числа волокон, слабо связанных между собой. Вдоль основной мембраны расположены нервные окончания, каждое из которых возбуждается от прикосновения к ним волокон основной мембраны, посылая в слуховой центр мозга электрические импульсы.

Там эти импульсы подвергаются сложному анализу, в результате которого человек определяет передаваемое сообщение. Воспринимаемый слухом частотный диапазон ограничен снизу частотой 16...20 Гц, а сверху - частотой 20000Гц.

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ**

**Краткие теоретические или справочно-информационные материалы**

**1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА МАСКИРОВКИ ЗВУКА**

В условиях шума и помех можно не услышать даже громкий разговор, то есть в условиях шума и помех порог слышимости для приема слабого звука возрастает. *Это повышение порога слышимости называют маскировкой.*

Величина маскировки определяется величиной повышения порога слышимости для принимаемого звукового сигнала

$$M = L_{i \cdot \tilde{n} \cdot \theta} - L_{i \cdot \tilde{n} \cdot \delta}, \quad L_{i \cdot \tilde{n} \cdot \theta} = 10 \lg \frac{I_{\theta}}{I_0}; \quad L_{i \cdot \tilde{n} \cdot \delta} = 10 \lg \frac{I_T}{I_0}.$$

где  $I_0 = 10^{-12} \text{ В}^{\text{о} / \text{т}^2}$ ;  $L_{i \cdot \tilde{n} \cdot \theta}$ ,  $L_{i \cdot \tilde{n} \cdot \delta}$  - уровни порога слышимости в тишине и при помехах.

Низкочастотные тона сильнее маскируют высокочастотные, чем наоборот.

На рис. 2 приведены кривые маскировки для ряда частот и уровней тонов. По оси абсцисс отложена частота маскируемого тона, по оси ординат – величина маскировки (параметр кривых – уровень ощущения маскирующего тона; вверху каждого графика указана частота маскирующего тона).

При разности частот около нескольких десятков герц величина маскировки начинает уменьшаться из-за биений, и при равенстве частот она имеет локальный минимум. Точно такие же локальные минимумы наблюдаются и на частотах, кратных частоте маскирующего тона.

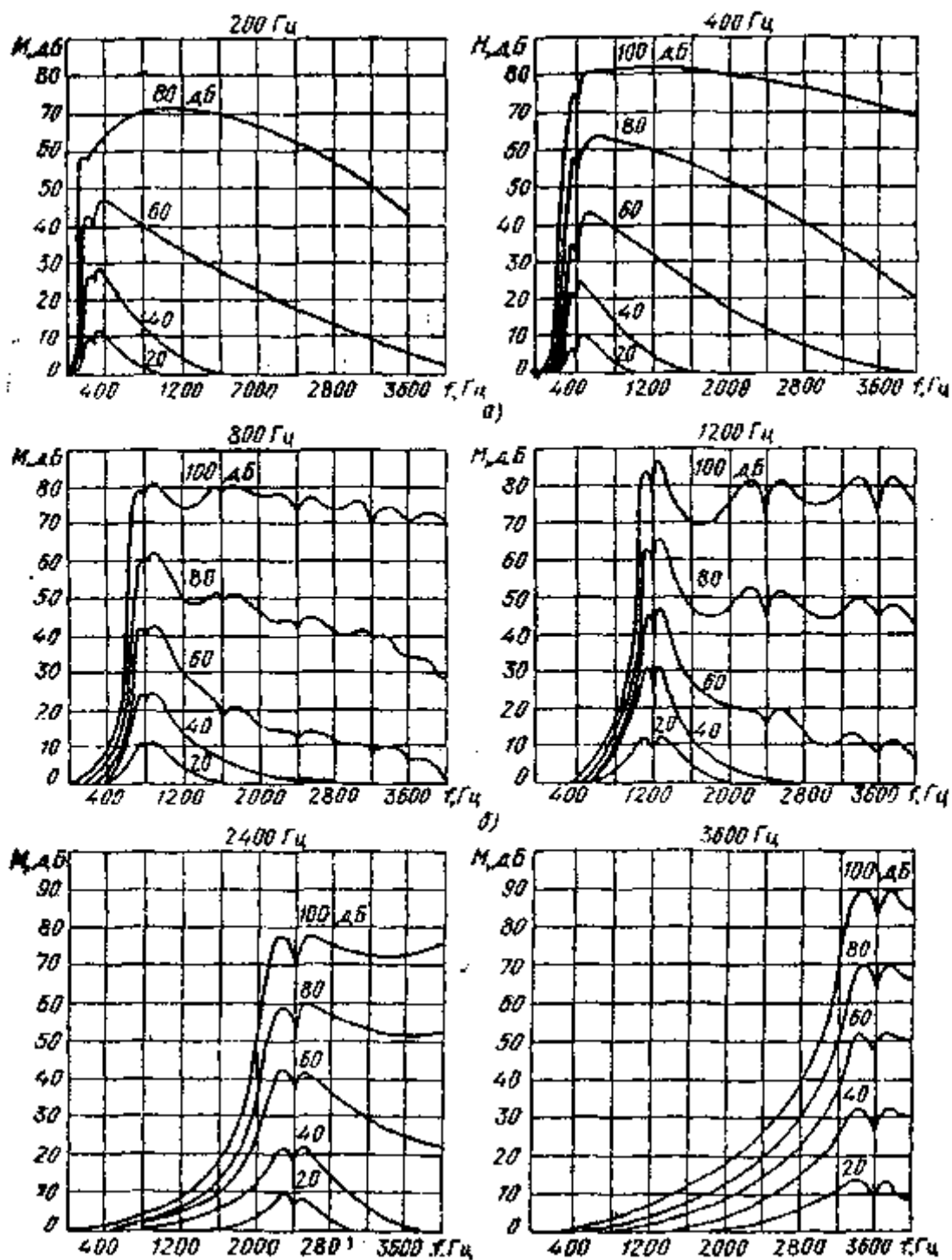


Рис. 2 – Кривые маскировки для ряда тональных частот и их уровней

*Кривые порога слышимости при маскировке белым шумом* приведены на рис. 3.

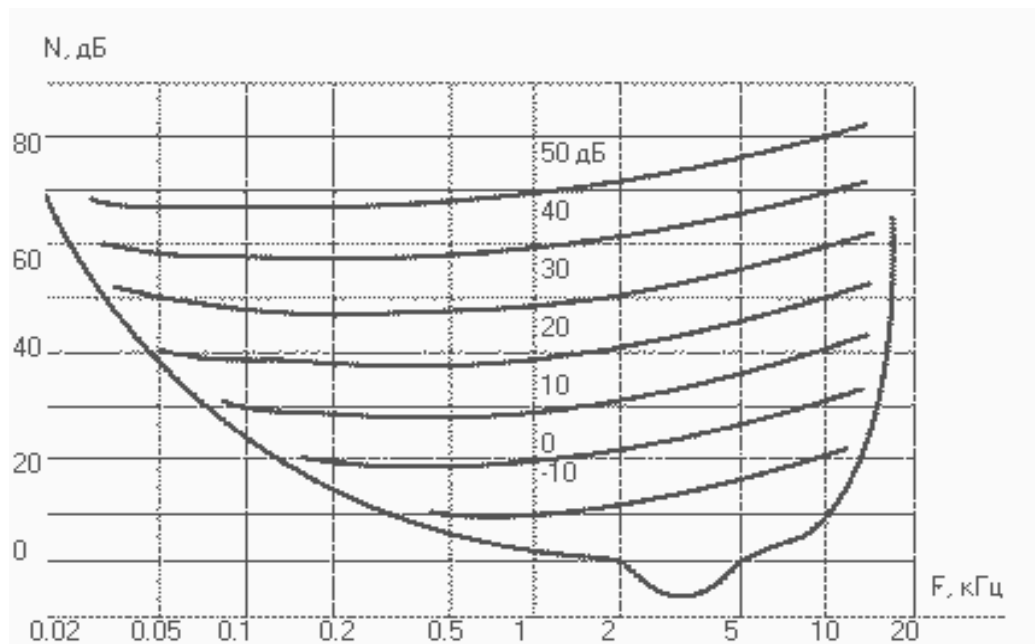


Рис. 3 – Кривые порога слышимости при маскировке белым шумом

Как видно из графика, **степень маскировки зависит от уровня интенсивности шума маскира почти пропорционально**: увеличение интенсивности шума на 10 дБ вызывает увеличение порога слышимости (т.е. степени маскировки) тоже на 10 дБ. Эти соотношения соблюдаются и для узкополосных шумовых и тональных сигналов, однако исследования последних лет показали, что на частотах ниже и выше маскира имеет место отклонение от линейного закона.

Кроме того, как следует из рисунка 3, белый шум неодинаково эффективен для маскировки разных частот: на низких частотах кривые (то есть степень маскировки) практически не зависят от частоты (примерно до 500 Гц). Но при дальнейшем увеличении частоты наблюдается четкая зависимость: при каждом удвоении частоты уровень порога слышимости повышается на 3 дБ. Причина этого заключается в наличии "критических полос слуха". С увеличением средней частоты происходит пропорциональное расширение ширины критических полос. При этом расширяется полоса белого шума, участвующего в маскировке, то есть возрастает его общая интенсивность, то и степень маскировки соответственно увеличивается. Причем если средняя частота увеличивается вдвое, то степень маскировки увеличивается в двое или на 3 дБ.

#### Краткие сведения об акустических шумах

**Шум – это беспорядочные колебания различной физической природы**, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. В быту под шумом понимают разного рода нежелательные акустические помехи при восприятии речи, музыки, а также любые звуки, мешающие отдыху, работе.

Источниками акустически слышимого и неслышимого шумов могут служить любые колебания в твёрдых, жидких и газообразных средах; в технике основные источники шумов – различные двигатели и механизмы.

Качественные особенности ощущения при восприятии акустического

шума органами слуха и организма в целом зависят от его интенсивности (громкости звука) и спектрального состава. Под влиянием шума нарушается точность координации движений, снижается производительность труда. В связи с единой этиологией клинических нарушений в медицинской литературе появился термин "шумовая болезнь".

Исходя из аналогий физической природы происхождения шумов и их параметрами распределения случайного процесса (спектральной плотности) некоторым видам шумовых сигналов приписывают определённые цвета. Эта абстракция широко используется в отраслях техники, имеющих дело с шумом (акустика, электроника, физика и т.д.).

В данных отраслях техники принято выделять следующие цвета шумов: белый шум, розовый шум, броуновский (красный) шум, синий (голубой) шум, фиолетовый шум и серый шум.

**Белый шум** – это сигнал с равномерной спектральной плотностью на всех частотах и дисперсией, равной бесконечности. Является стационарным случайным процессом. **Спектр белого шума** (см. рис. 4) имеет одинаковую мощность (спектральную плотность) в любой полосе частот. К примеру, полоса сигнала в 20 герц между 40 и 60 герц имеет такую же мощность, что и полоса между 4000 и 4020 герц. Неограниченный по частоте белый шум возможен только в теории, так как в этом случае его мощность бесконечна. На практике сигнал может быть белым шумом только в ограниченной полосе частот.

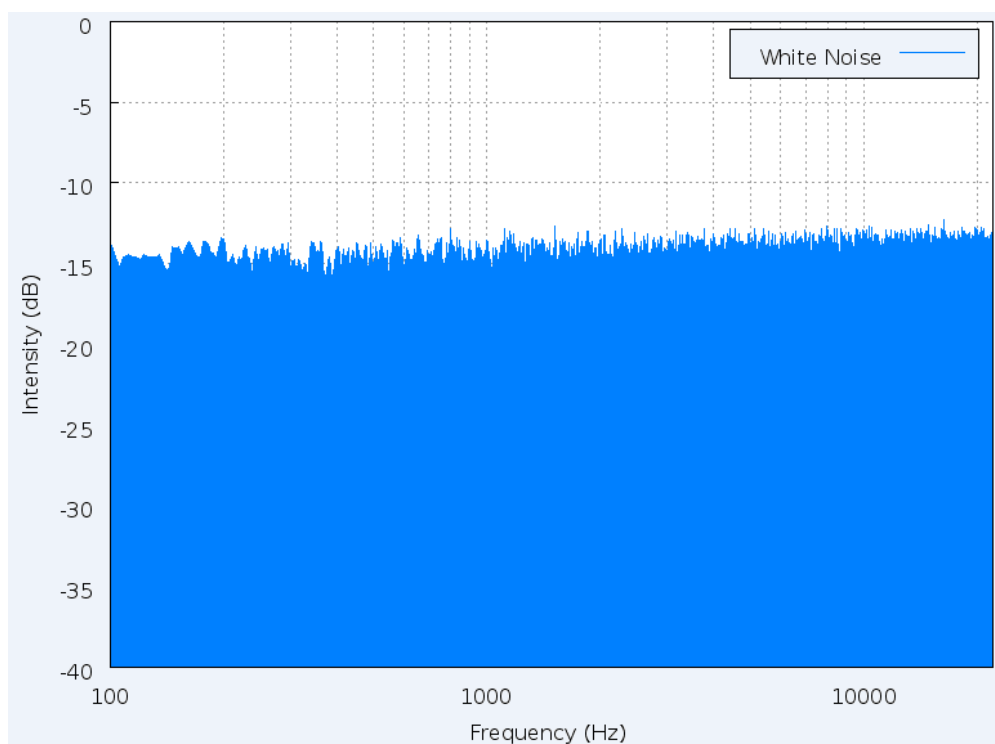


Рис. 4 – Спектр белого шума

**Спектральная плотность розового шума** обратно пропорциональна частоте, то есть определяется формулой  $\sim 1/f$ , следовательно. Спектр розового шума (см. рис. 5) является равномерным в логарифмической шкале частот. Например, мощность сигнала в полосе частот между 40 и 60 герц равна

мощности в полосе между 4000 и 6000 герц. Спектральная плотность такого сигнала по сравнению с белым шумом затухает на 3 децибела на каждую октаву. Пример розового шума – звук пролетающего вертолёта. Розовый шум обнаруживается, например, в сердечных ритмах, в графиках электрической активности мозга, в электромагнитном излучении космических тел. Иногда розовым шумом называют любой шум, спектральная плотность которого уменьшается с увеличением частоты.

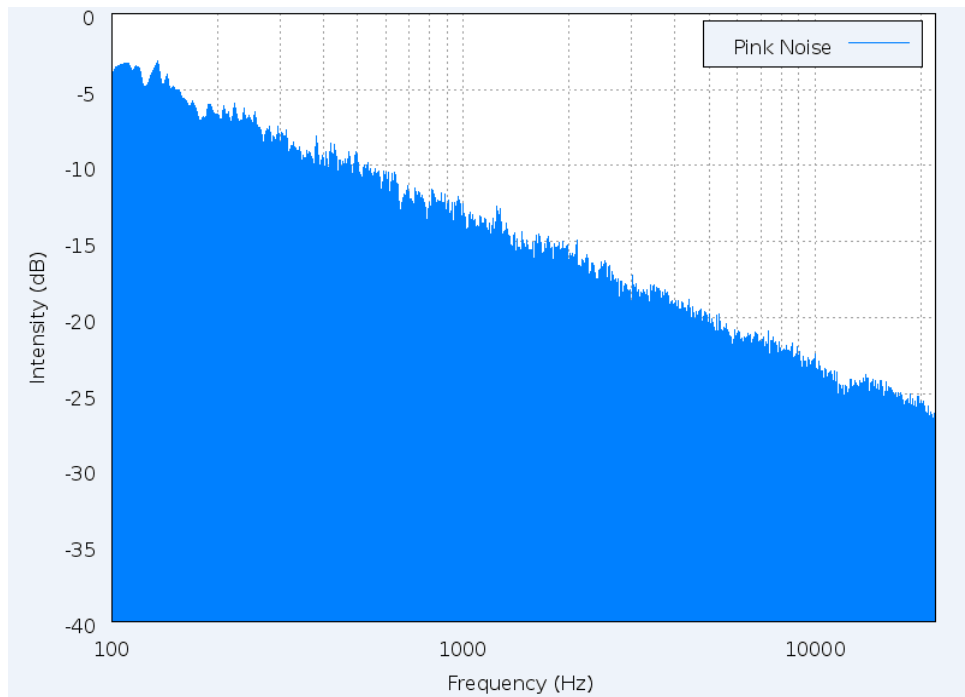


Рис. 5 – Спектр розового шума

**Спектральная плотность красного (броуновского) шума** пропорциональна  $1/f^2$ , где  $f$  — частота. Это означает, что на низких частотах шум имеет больше энергии, даже больше, чем розовый шум. Энергия шума падает на 6 децибел на октаву. Акустический красный шум слышится как приглушённый, в сравнении с белым или розовым шумом. Может быть получен, если проинтегрировать белый шум, или с помощью алгоритма, симулирующего броуновское движение. Спектр красного шума (см. рис. 6) в логарифмической шкале зеркально противоположен спектру фиолетового шума. На слух броуновский шум воспринимается более «тёплым», чем белый. Иногда (обычно в текстах, переведенных с английского языка) этот шум называют также коричневым, слепо переводя фамилию Роберта Броуна (Brown) на русский – причем с английского, хотя Броун был шотландцем. Впрочем, коричневый и красный цвета спектрально весьма близки.

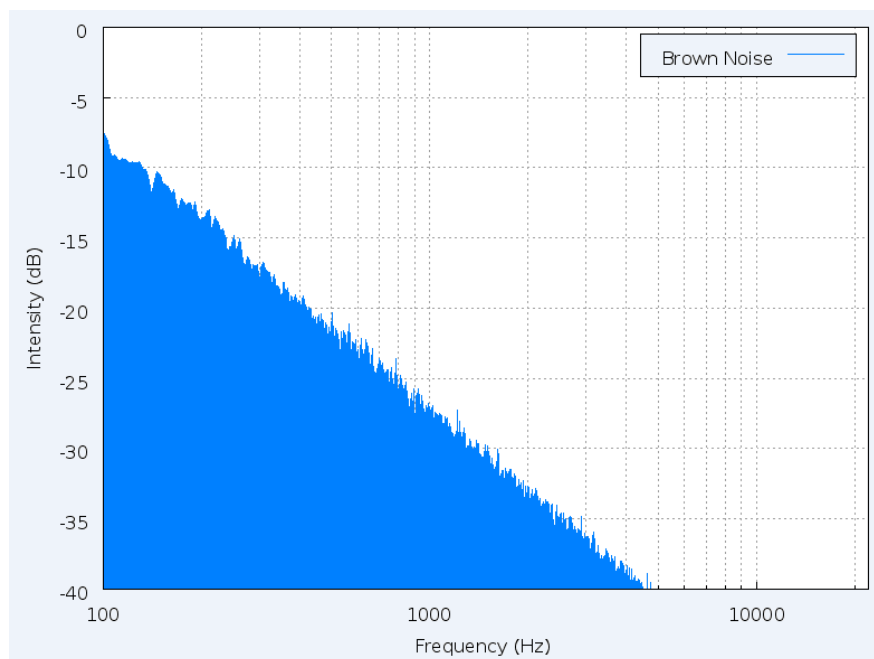


Рис. 6 – Спектр красного (броуновского) шума

**Синий (голубой) шум** – вид шумоподобного сигнала, чья спектральная плотность увеличивается на 3 дБ на октаву (см. рис.7). То есть его спектральная плотность пропорциональна частоте и, аналогично белому шуму, на практике он должен быть ограничен по частоте. На слух синий шум воспринимается более резким, нежели белый. Синий шум получается, если продифференцировать розовый шум; их спектры зеркальны.

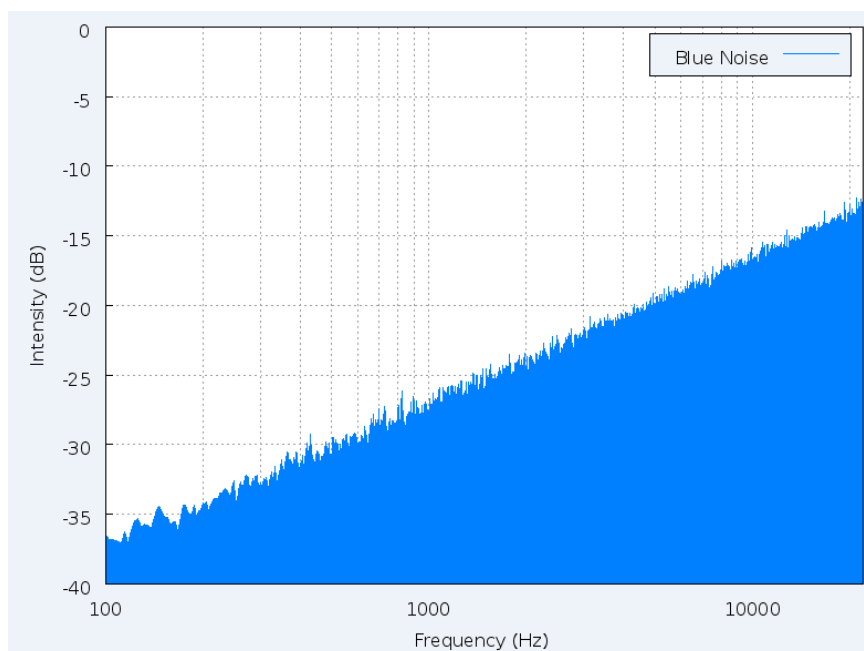


Рис. 7 – Спектр синего (голубого) шума

**Фиолетовый шум** – вид шумоподобного сигнала, чья спектральная плотность увеличивается на 6 дБ на октаву (см. рис. 8). То есть его спектральная плотность пропорциональна квадрату частоты и, аналогично белому шуму, на

практике он должен быть ограничен по частоте. Фиолетовый шум получается, если продифференцировать белый шум. Спектр фиолетового шума зеркально противоположен спектру красного шума.

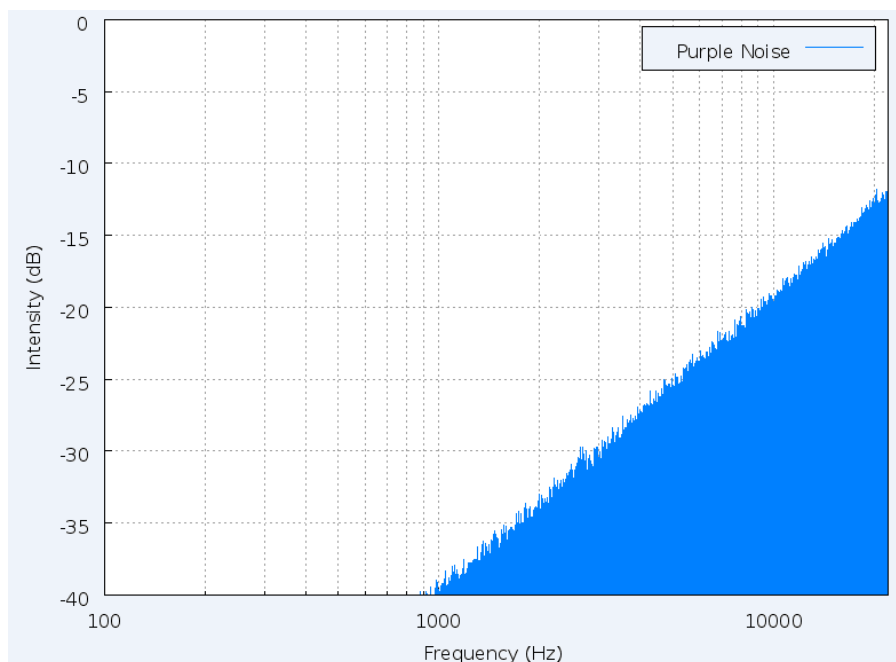


Рис. 8 – Спектр фиолетового шума

*Термин серый шум относится к шумовому сигналу, который имеет одинаковую громкость для человеческого уха на всём диапазоне частот. Спектр серого шума (см. рис. 9) получается, если сложить спектры броуновского и фиолетового шумов. В спектре серого шума виден большой «провал» на средних частотах, однако человеческое ухо воспринимает серый шум точно так же, как и белый.*

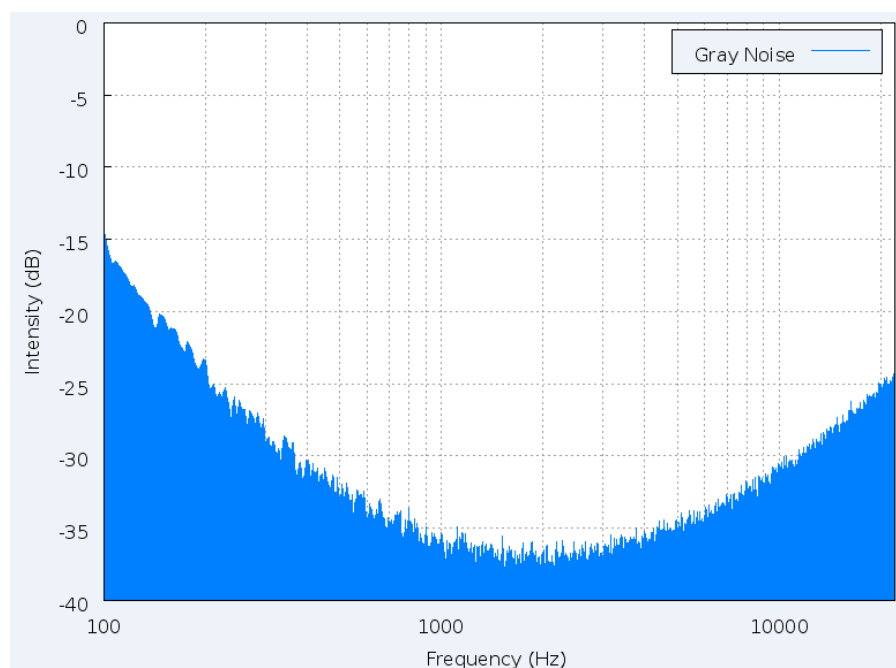


Рис. 9 – Спектр серого шума

## Содержание практической работы, выполняемой студентами

### 1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с проигрывателем «Windows Media» и программным редактором «Sine Wave Generator».
- Лабораторная установка (рис. 10).

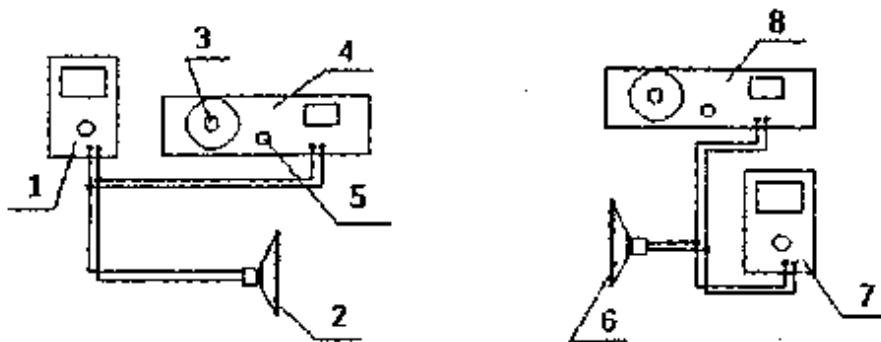


Рисунок 10 – Схема лабораторной установки

В состав лабораторной установки входит:

- 1 – Измеритель уровня интенсивности звука или уровня звукового давления.
- 2 – Динамик, излучающий тональные звуковые сигналы.
- 3 – Ручка регулирования частоты тонального генератора.
- 4 – Тональный генератор.
- 5 – Ручка регулирования амплитуды тонального сигнала.
- 6 – Динамик, излучающий маскирующие тональные сигналы и акустические шумы.
- 7 – Измеритель уровня интенсивности маскирующего тона.
- 8 – Второй тональный генератор или шумовой генератор.

Программно тональный генератор реализован с помощью редактора «Sine Wave Generator» (рис. 11).

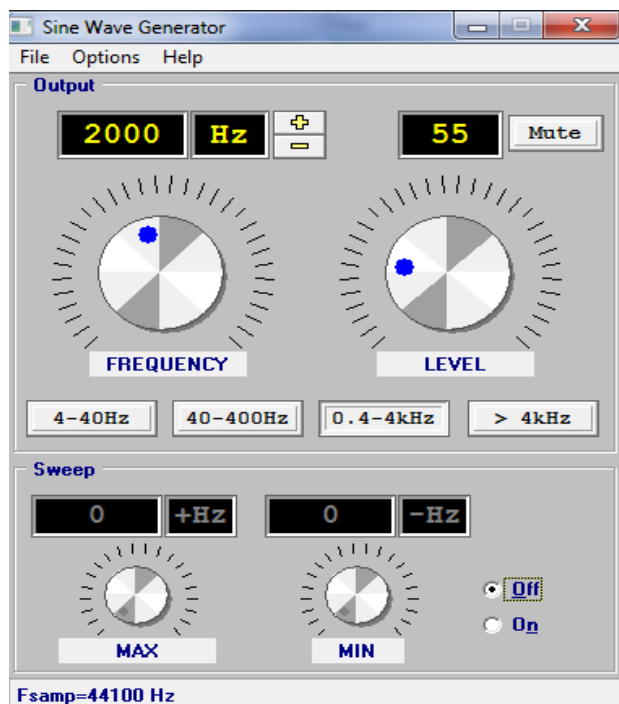


Рис. 11 – Программный тональный генератор «Sine Wave Generator»

Генератор шума реализован с помощью проигрывателя «Windows Media», в список воспроизведения которого занесены звуки акустических шумов (см. рис. 12).

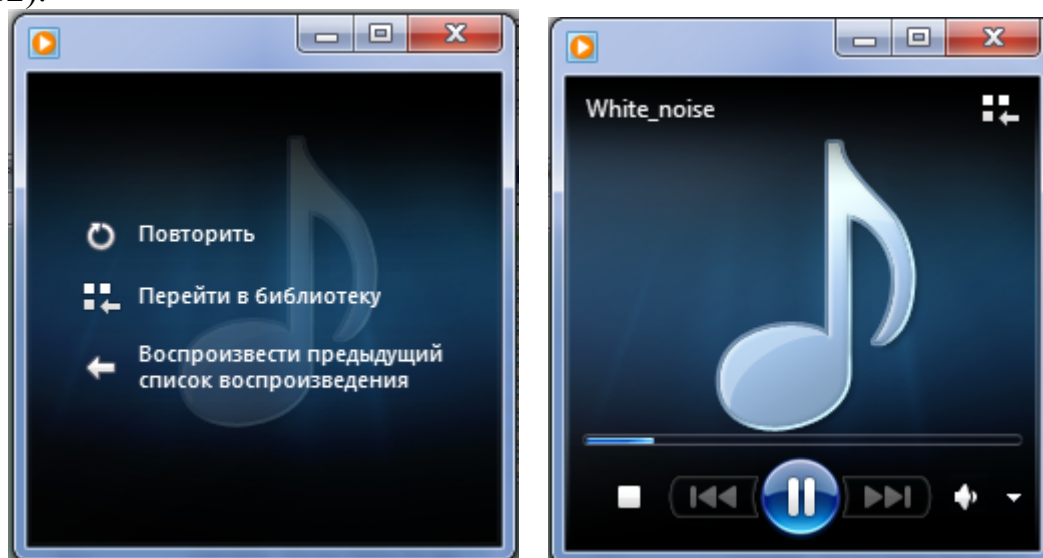


Рис. 12 – Программный генератор шума на основе проигрывателя «Windows Media»

### 5. Требования к отчету о проделанной лабораторной работе.

В отчете привести:

- задание на выполнение работы,
- схему лабораторной установки,
- порядок проведения работы,
- таблицы результатов измерений и графики зависимости порога слышимости в тишине и при маскировке различными видами шумов,
- сравнение расчетных теоретических результатов с экспериментами;
- выводы о проделанной работе.

Образец оформления таблиц результатов измерений:

| Частота, Гц | Уровень порога слышимости в условиях тишины в абс. ед. | Уровень порога слышимости в условиях тишины в дБ | Уровень порога слышимости в дБ при маскировке белым шумом | Уровень маскировки в дБ |
|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 400         | 7                                                      | 17                                               | 37                                                        | 20                      |
| 600         | 4                                                      | 12                                               | 32                                                        | 20                      |
| ...         |                                                        |                                                  |                                                           |                         |
| 1800        | 3                                                      | 9,5                                              | 32,5                                                      | 23                      |
| 2000        | 2                                                      |                                                  |                                                           |                         |
| 2400        | 3                                                      | 9,5                                              | 32,5                                                      | 23                      |
| ...         |                                                        |                                                  |                                                           |                         |
| 4000        | 5                                                      | 14                                               | 40                                                        | 26                      |

### 6. Контрольные вопросы для подготовки к защите отчета:

- 21) Сущность порога слышимости.

- 22) Виды порогов слышимости, их условия измерений.
- 23) Характеристика порога слышимости.
- 24) Определение маскировки, порядок ее расчета.
- 25) Сущность и особенности маскировки тональным маскером.
- 26) Характеристика белого шума.
- 27) Характеристика розового шума.
- 28) Характеристика красного (броуновского) шума.
- 29) Характеристика голубого (броуновского) шума.
- 30) Характеристика фиолетового (броуновского) шума.
- 31) Характеристика серого шума.
- 32) Эффективность маскировки белым шумом.
- 33) Эффективность маскировки розовым шумом.
- 34) Характеристика лабораторной установки.
- 35) Характеристика программного генератора «Sine Wave Generator», порядок работы с ним.
- 36) Порядок выполнения работы на лабораторной установке.
- 37) Порядок выполнения работы на ПЭВМ с помощью программных редакторов.
- 38) Порядок измерения уровня порога слышимости.
- 39) Порядок измерения уровня маскировки.
- 40) Сравнительная характеристика эффективности маскировки при различных видах шумов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

- 28) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.
- 29) Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.
- 30) Лепешкин О.М. Физические основы математические и информационные модели защиты информации: Электронное учебное пособие. – Ставрополь: СГУ, 2005.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16-18**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

**Время – 4 часа.**

### **УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование и исследование звуковых волн и речеподобных акустических сигналов.**
- 2. Моделирование и исследование акустических свойств помещений.**
- 3. Моделирование и исследование эффекта маскировки акустических сигналов.**

## **СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

### **ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Передача информации по системам вещания, телефонной связи, звукозаписи и воспроизведения звука предназначена для человека. Поэтому для правильного проектирования и эксплуатации этих систем необходимо знать свойства слуха человека.

Орган слуха человека является своеобразным приемником звука, резко отличающимся от приемников звука, создаваемых человеком. Ухо человека обладает свойствами частотного анализатора, дискретным восприятием по частотному и динамическому диапазонам. Так аналоговый звуковой сигнал превращается в последовательность электрических импульсов двоичного типа. Все эти операции осуществляются во внутреннем ухе, в улитке. В улитке находится базилярная мембрана, состоящая из большого числа волокон, слабо связанных между собой. Вдоль основной мембраны расположены нервные окончания, каждое из которых возбуждается от прикосновения к ним волокон основной мембраны, посылая в слуховой центр мозга электрические импульсы.

Там эти импульсы подвергаются сложному анализу, в результате которого человек определяет передаваемое сообщение. Воспринимаемый слухом частотный диапазон ограничен снизу частотой 16...20 Гц, а сверху - частотой 20000Гц.

### **УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ**

**Краткие теоретические или справочно-информационные материалы**

#### **1 - 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА СЛЫШИМОСТИ**

Если волокно основной мембраны при своих колебаниях не достигает до ближайшего к нему нервного окончания, то человек такой звук не слышит. Но как только при увеличении амплитуды колебаний волокна оно коснется нервного окончания, произойдет это раздражение. Нервное окончание сразу же начнет посылать электрические импульсы в слуховой центр мозга, и звук будет услышан. *Этот скачкообразный переход из слышимого состояния в неслышимое и обратно называют порогом слышимости.* Абсолютное значение слухового ощущения на пороге слышимости мало, но все же имеет вполне конечное значение. Порог слышимости зависит от частоты. На рисунке 1 приведены эти зависимости, причем по оси ординат отложены уровни звукового давления.

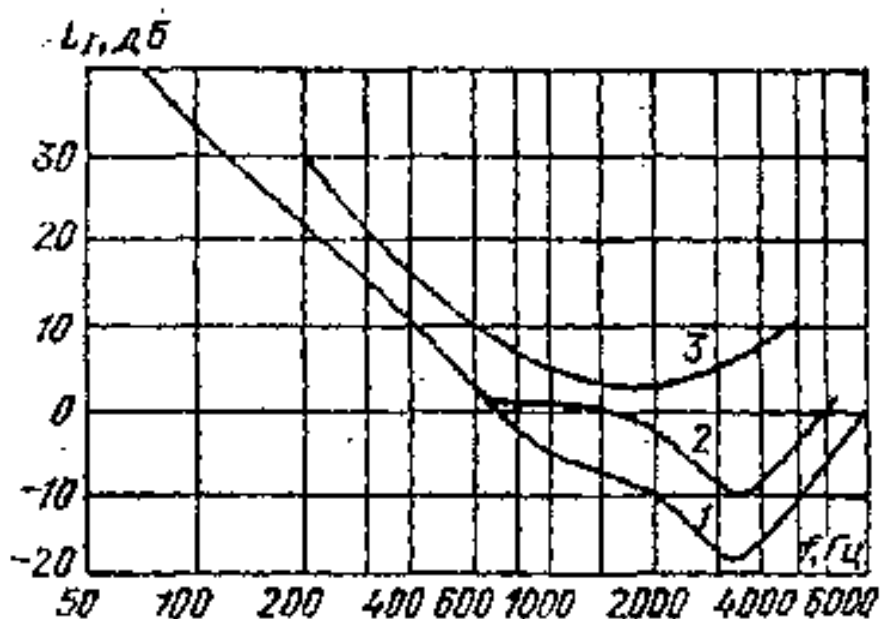


Рис. 1 – Частотная зависимость уровней порога слышимости

Кривая 1 на рис. 1 соответствует диффузному бинауральному слушанию (обоими ушами), когда давление создается множеством источников звука, беспорядочно расположенных в горизонтальной плоскости вокруг головы (диффузный порог). Кривая 2 соответствует фронтальному бинауральному слушанию, когда давление создается источником звука, расположенным на некотором расстоянии перед слушателем (фронтальный порог). Кривая 3 соответствует моноуральному слушанию (одним ухом), когда давление в ушной раковине создается с помощью телефона (порог по давлению).

Таким образом, различия в зависимостях порога слышимости от частоты обусловлены разными условиями измерений порога.

### Содержание практической работы, выполняемой студентами

#### 1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ с проигрывателем «Windows Media» и программным редактором «Sine Wave Generator».

– Лабораторная установка (рис. 10).

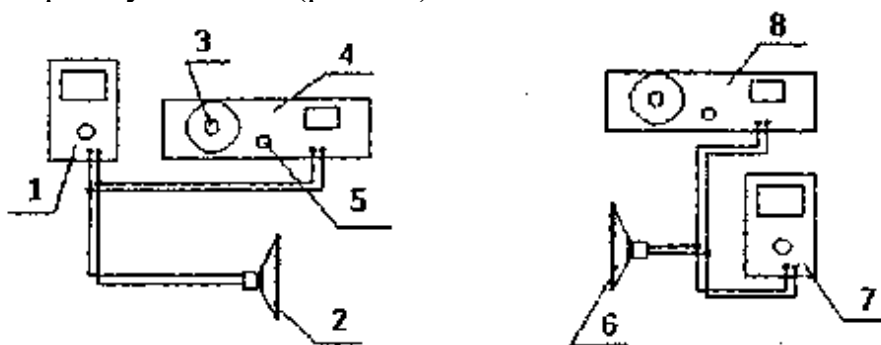


Рисунок 10 – Схема лабораторной установки

В состав лабораторной установки входит:

- 1 – Измеритель уровня интенсивности звука или уровня звукового давления.
- 2 – Динамик, излучающий тональные звуковые сигналы.
- 3 – Ручка регулирования частоты тонального генератора.
- 4 – Тональный генератор.
- 5 – Ручка регулирования амплитуды тонального сигнала.
- 6 – Динамик, излучающий маскирующие тональные сигналы и акустические шумы.
- 7 – Измеритель уровня интенсивности маскирующего тона.
- 8 – Второй тональный генератор или шумовой генератор.

Программно тональный генератор реализован с помощью редактора «Sine Wave Generator» (рис. 11).

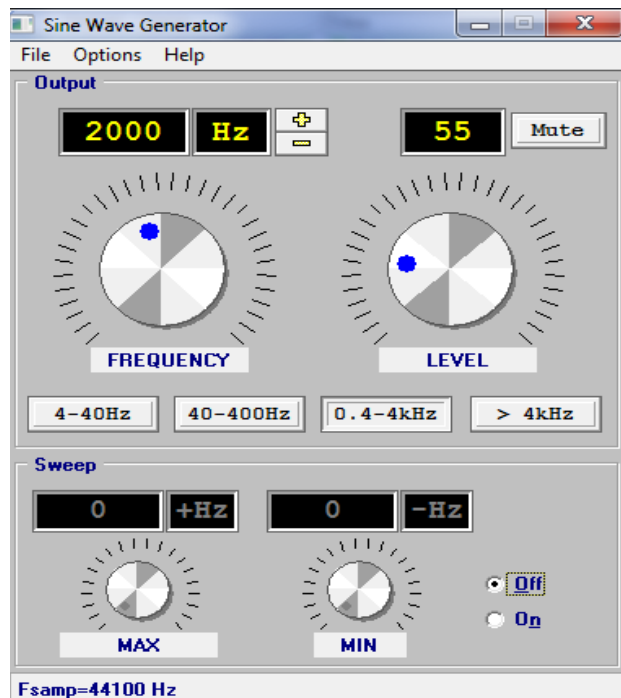


Рис. 11 – Программный тональный генератор «Sine Wave Generator»

Генератор шума реализован с помощью проигрывателя «Windows Media», в список воспроизведения которого занесены звуки акустических шумов (см. рис. 12).

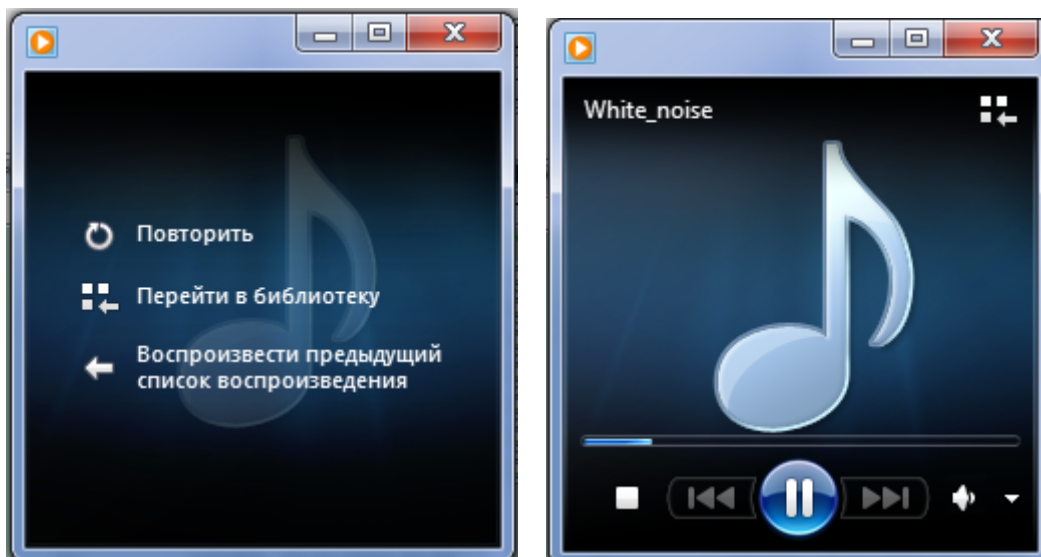


Рис. 12 – Программный генератор шума на основе проигрывателя «Windows Media»

## **2. Требования безопасности при выполнении работы**

### ***I. Перед началом выполнения лабораторной работы:***

1. Изучить оборудование и рабочее место.
2. Получить разрешение к выполнению лабораторных работ от руководителя занятий или лаборанта.

### ***II. Во время выполнения лабораторных работ:***

Убедиться, что на измерительных приборах переключатели установлены в исходном положении ручек, на минимальное напряжение и максимальные пределы измерения.

Включать питающие напряжения и собранные схемы только после разрешения руководителя занятий или лаборанта и предупреждения всех работающих.

В соответствии с методическими рекомендациями по выполнению лабораторных работ, выполнить необходимые измерения и занести их в рабочую тетрадь.

Проверять наличие питающих напряжений и проводить измерения электрических величин только с помощью соответствующих измерительных приборов, одной рукой, после установки на них максимально ожидаемого результата и рода измеряемой величины.

### **ВНИМАНИЕ!**

- Не прикасаться к открытым токоведущим частям, проводникам, клеммам и зажимам, не облакачиваться на приборы, не прикасаться к батареям, не отвлекаться от измерений, не производить изменений в схеме и не оставлять без наблюдения цепь, находящуюся под напряжением.
- При работе с катушками индуктивности и конденсаторами не трогать их и соединительные провода, так как вследствие резонанса могут возникнуть большие токи и напряжение.
- При обнаружении неисправностей в измерительных приборах **немедленно** отключить источники питания и доложить об этом руководителю занятий или лаборанту.

### ***III. По окончании выполнения лабораторных работ:***

1. Докладить руководителю занятий или лаборанту о завершении работ.

2. Обесточить собранные схемы, разобрать их (если это предусмотрено) и выключить контрольно-измерительные приборы.
3. Привести в порядок и сдать рабочее место лаборанту, и доложить руководителю занятий о сдаче.

#### **ПРИ РАБОТЕ ЗАПРЕЩАЕТСЯ:**

- производить самостоятельное включение автоматов защиты, заменять предохранители, устранять неисправности и повреждения;
- проводить какие-либо переключения, соединения, не предусмотренные инструкциями по выполнению лабораторных работ.

#### **ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ И НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЯХ:**

- немедленно отключить автоматы защиты, доложить руководителю занятий и действовать согласно его указаний;
- при поражении электрическим током оказать первую помощь в соответствии с принятой методикой до прибытия врача.

#### **ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА НАРУШЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ:**

- лица, нарушившие требования инструкции отстраняются от выполнения лабораторных работ и допускаются только после сдачи зачета по правилам и мерам безопасности;
- при выводе из строя приборов и оборудования лаборатории по вине лица, проводившего работы и в случае нарушения требования инструкции, они несут материальную ответственность в соответствии с действующим законодательством РФ.

### **3. Задание для работы**

- 17) Измерить и построить зависимость порога слышимости от частоты.
- 18) Исследовать эффективность маскировки звуков при воздействии тонального маскирующего звука и различных видов шумов.
- 19) Составить отчет о проделанной работе в соответствии с требованиями, изложенными в описании работы.

### **4. Порядок выполнения работы**

#### **4.1. Порядок выполнения работы на лабораторной установке**

4.1.1. Включить тональный генератор. Установить частоту основного тона  $f_0=100$  Гц.

4.1.2. Плавно изменяя амплитуду звукового давления до порога слышимости, снять показания в дБ измерителя уровня интенсивности или показания измерителя звукового давления. Зафиксировать порог слышимости.

4.1.3. Изменить частоту тона и повторить предыдущий пункт до частоты  $f_0=4000$  Гц с шагом 200 Гц от 100 Гц до 2000 Гц и с шагом 400 Гц от 2000 Гц до 4000 Гц.

4.1.4. Построить кривую порога слышимости.

4.1.5. Включить второй тональный генератор. Установить частоту маскирующего тона  $f_m=400$  Гц, уровень 80 дБ. Повторяя предыдущие пункты снять зависимость порога слышимости основного тона при воздействии данного маскирующего тона, находя минимальный уровень основного тона, который может быть услышан на фоне мешающего (маскирующего) тона.

4.1.6. Установить частоту маскирующего тона  $f_m=1200$  Гц, уровень 80 дБ. Снять зависимость порога слышимости основного тона при воздействии данного маскирующего тона, находя минимальный уровень основного тона, который может быть услышан на фоне мешающего (маскирующего) тона.

4.1.7. Установить частоту маскирующего тона  $f_m=2400$  Гц, уровень 80 дБ. Снять зависимость порога слышимости основного тона при воздействии данного маскирующего тона, находя минимальный уровень основного тона, который может быть услышан на фоне мешающего (маскирующего) тона.

#### **4.2. Порядок выполнения работы на ПЭВМ**

4.2.1. Запустить программу «Sine.exe», на экране монитора высветится интерфейс программного генератора «Sine Wave Generator». Отключить свипер (Sweep – off), то есть блок звуковых эффектов, при этом ручки «Min» и «Max» установить в нулевое положение. Включить программный тональный генератор, нажав кнопку «Mute».

4.2.2. Включить диапазон частот «0,4 – 4 кГц», ручкой «FREQUENCY» установить частоту основного тона, равную 400 Гц. Плавно и очень медленно вращая ручку «LEVEL» уровня звука, на слух измерить порог слышимости.

4.2.3. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата.

4.2.4. Пересчитать уровень звука из абсолютных единиц в относительные единицы децибелы. Построить график зависимости порога слышимости в децибелах от частоты звука.

4.2.5. Включить второй программный генератор «Sine Wave Generator», на котором установить частоту маскирующего тона 1000 кГц, включив основной тональный генератор и медленно вращая ручку «FREQUENCY» прослушать суммарный звук, представляющий собой биения двух тональных сигналов, во всем диапазоне частот «0,4 – 4 кГц». Сделать выводы о разборчивости исходного тонального сигнала.

4.2.6. Повторить пункт 4.2.5 для частоты маскирующего тона 3000 кГц. Сравнить эффективность маскирования основного тона маскирующими сигналами с частотами 1000 и 3000 Гц.

4.2.7. Запустить файл «White\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке белым шумом.

4.2.8. Запустить файл «Pink\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук розового шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке розовым шумом.

4.2.9. Запустить файл «Brown\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук коричневого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом

400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке красным шумом.

4.2.10. Запустить файл «Blue\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке голубым шумом.

4.2.11. Запустить файл «Purple\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке фиолетовым шумом.

4.2.12. Запустить файл «Gray\_noise», включающий проигрыватель «Windows Media», производящий звук белого шума. Изменяя частоту основного тона от 400 Гц до 2000 Гц с шагом 200 Гц, а затем от 2000 Гц до 4000 Гц с шагом 400 Гц, произвести измерение кривой порога слышимости собственного слухового аппарата при маскировке серым шумом.

4.2.12. Сделать выводы об эффективности маскировки звуков шумами различных видов.

4.3. Оформить отчет о проделанной работе.

### **5. Требования к отчету о проделанной лабораторной работе.**

В отчете привести:

- задание на выполнение работы,
- схему лабораторной установки,
- порядок проведения работы,
- таблицы результатов измерений и графики зависимости порога слышимости в тишине и при маскировке различными видами шумов,
- сравнение расчетных теоретических результатов с экспериментами;
- выводы о проделанной работе.

Образец оформления таблиц результатов измерений:

| Частота, Гц | Уровень порога слышимости в условиях тишины в абс. ед. | Уровень порога слышимости в условиях тишины в дБ | Уровень порога слышимости в дБ при маскировке белым шумом | Уровень маскировки в дБ |
|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 400         | 7                                                      | 17                                               | 37                                                        | 20                      |
| 600         | 4                                                      | 12                                               | 32                                                        | 20                      |
| ...         |                                                        |                                                  |                                                           |                         |
| 1800        | 3                                                      | 9,5                                              | 32,5                                                      | 23                      |
| 2000        | 2                                                      |                                                  |                                                           |                         |
| 2400        | 3                                                      | 9,5                                              | 32,5                                                      | 23                      |
| ...         |                                                        |                                                  |                                                           |                         |
| 4000        | 5                                                      | 14                                               | 40                                                        | 26                      |

### **6. Контрольные вопросы для подготовки к защите отчета:**

41) Сущность порога слышимости.

- 42) Виды порогов слышимости, их условия измерений.
- 43) Характеристика порога слышимости.
- 44) Определение маскировки, порядок ее расчета.
- 45) Сущность и особенности маскировки тональным маскером.
- 46) Характеристика белого шума.
- 47) Характеристика розового шума.
- 48) Характеристика красного (броуновского) шума.
- 49) Характеристика голубого (броуновского) шума.
- 50) Характеристика фиолетового (броуновского) шума.
- 51) Характеристика серого шума.
- 52) Эффективность маскировки белым шумом.
- 53) Эффективность маскировки розовым шумом.
- 54) Характеристика лабораторной установки.
- 55) Характеристика программного генератора «Sine Wave Generator», порядок работы с ним.
- 56) Порядок выполнения работы на лабораторной установке.
- 57) Порядок выполнения работы на ПЭВМ с помощью программных редакторов.
- 58) Порядок измерения уровня порога слышимости.
- 59) Порядок измерения уровня маскировки.
- 60) Сравнительная характеристика эффективности маскировки при различных видах шумов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

- 31) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.
- 32) Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.
- 33) Лепешкин О.М. Физические основы математические и информационные модели защиты информации: Электронное учебное пособие. – Ставрополь: СГУ, 2005.

**РАЗДЕЛ  
№ 5**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

**Тема № 20**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ  
АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №18-20  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ  
ЭФФЕКТОВ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

**Время – 6 часа.**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование и исследование принципов работы акустоэлектрических преобразователей.**

**ВОПРОСЫ (ЗАДАЧИ), ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ**

**Краткие теоретические или справочно-информационные материалы**

**1.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Принцип действия емкостного акустоэлектрического преобразователя (см. рис. 1) основан на изменении емкости конденсатора при воздействии упругой механической волны, создаваемой акустическими сигналами, например, речью на один из конструктивных параметров конденсатора в соответствии с формулой:

$$\tilde{N} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot S}{d}, \quad (1)$$

где — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора;  $\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $S$  — площадь перекрытия пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;  $d$  — толщина диэлектрика или расстояние между пластинами, м.

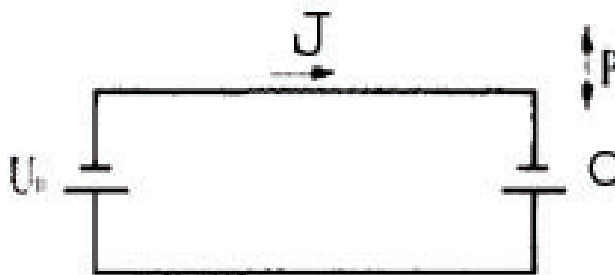


Рис. 1 – Емкостной акустоэлектрический преобразователь

Из выражения (1) следует, что возможны три **способа изменения емкости конденсатора под действием силовых акустических волн**:

- путем изменения площади перекрытия пластин – возникает в конденсаторах переменной емкости;
- путем изменения диэлектрической проницаемости за счет смещения диэлектрика;
- путем изменения расстояния между пластинами конденсатора за счет сжимающего и разжимающего усилия.

Емкостные преобразователи с изменениями первых двух характеристик обладают линейной характеристикой функции преобразования  $C = f(P_{ac})$ , тогда как емкостные преобразователи с изменением расстояния между пластинами обладают нелинейной характеристикой. Это означает, что в таких преобразователях помимо акустоэлектрического преобразования возможно осуществление процедуры частотной модуляции высокочастотного тока, протекающего в цепи конденсатора, по закону низкочастотного электрического сигнала пропорционального изменению акустическому давлению.

Емкость большинства функциональных емкостных измерительных преобразователей составляет 10 – 100 пФ, поэтому даже на высоких частотах  $10^5$  –  $10^7$  Гц их выходные сопротивления велики и равны  $X_c = 1/(C) = 10^3$  –  $10^7$  Ом. Выходные мощности емкостных измерительных преобразователей малы, и в измерительных цепях необходимо применение усилителей с высоким входным сопротивлением на базе операционных усилителей.

**Характеристики емкостных акустоэлектрических преобразователей как источников опасных сигналов:**

- высокая чувствительность;
- высокое быстродействие;
- широкий частотный диапазон;
- низкий уровень выходного сигнала;
- нестабильность характеристик при изменении параметров окружающей среды;
- зависимость характеристик от влияния схемных паразитных емкостей.

## 1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АКУСТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Принцип действия электромагнитных акустоэлектрических преобразователей** (см. рис. 2) основан на изменении параметров магнитной цепи при воздействии упругой механической волны, создаваемой акустическими сигналами, например, речью на один из конструктивных параметров магнитной цепи.

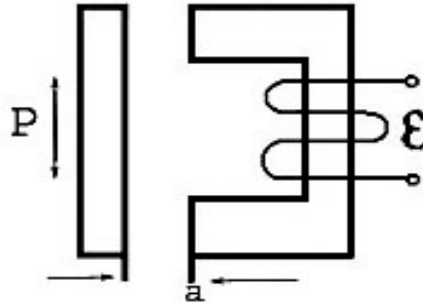


Рис. 2 – Электромагнитный акустоэлектрический преобразователь

Если пренебречь потоками рассеяния, то для электромагнитного измерительного преобразователя формулы для расчета индуктивности  $L$  или взаимоиנדуктивности  $M$  обмоток имеют следующий вид:

$$L = \frac{\varpi_1^2}{R_M + R_B} = \frac{\varpi_1^2}{\frac{l}{\mu \cdot \mu_o S} + \frac{\delta}{\mu_o S}} = \frac{\varpi_1^2 \mu \cdot \mu_o S}{l + \mu \cdot \delta}, \quad (2)$$

$$M = \frac{\varpi_1^2 \varpi_2^2}{R_M + R_B} = \frac{\varpi_1^2 \varpi_2^2 \mu \cdot \mu_o S}{l + \mu \cdot \delta}, \quad (3)$$

где  $l$ ,  $\varpi_1$ ,  $\varpi_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток;  $R_M$  – сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи, включая и ее подвижную часть (якорь);  $R_B$  – сопротивление воздушного зазора между якорем и основным магнитопроводом;  $l$  – средняя длина магнитного пути;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала (для сталей  $\mu = 200 \dots 5000$ );  $\mu_o = 1,257 \cdot 10^{-6}$  В·с/А·м – магнитная постоянная;  $S$  – поперечное сечение магнитопровода, м<sup>2</sup>.

Из выражений (2) и (3) следует, что возможны **три способа изменения значений индуктивности  $L$  или взаимоиנדуктивности  $M$**  под действием силовых акустических волн:

- путем изменения зазора между якорем и магнитопроводом за счет перемещения якоря;
- путем изменения сечения магнитного потока при вращении якоря относительно неподвижной части магнитной цепи;
- путем изменения магнитного сопротивления воздушного зазора за счет введения в него пластин из ферромагнитного или электропроводящего неферромагнитного материала.

Преобразователи перемещения в изменение индуктивности называются индуктивными, а преобразователи перемещения в изменение взаимоиנדукции –

трансформаторными.

Кроме того, существует еще один тип электромагнитных преобразователей – магнитоупругий или магнестрикционный, основанный на изменении магнитной проницаемости замкнутого сердечника под воздействием сжимающего, растягивающего или скручивающего усилия, что согласно выражениям (2) и (3), приводит к изменению магнитного сопротивления сердечника и соответственно к изменению индуктивности  $L$  или взаимоиндуктивности  $M$ .

### 1.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АКУСТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Принцип действия пьезоэлектрических акустоэлектрических преобразователей** (см. рис. 3) **основан** на использовании прямого пьезоэффекта, то есть способности пьезоэлектрических материалов (кварца, турмалина и других) генерировать электрические заряды при приложении механической нагрузки, производимой силовым акустическим полем.

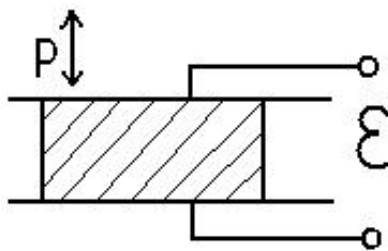


Рисунок 3 – Пьезоэлектрический акустоэлектрический преобразователь

Количественно пьезоэффект характеризуется пьезомодулем:

$$K_d = Q/F, \quad (4)$$

Где  $Q$  – генерируемый заряд при воздействии силы  $F$ .

Из пьезоэлектрических материалов наиболее распространен кварц; он имеет незначительный коэффициент линейного расширения при модуле упругости  $E = 7,7 \cdot 10^{10}$  Па, высокое удельное электрическое сопротивление (порядка  $10^{16}$  Ом/м) и сравнительно незначительную зависимость пьезомодуля ( $2,3 \cdot 10^{12}$  Кл/Н) от температуры в диапазоне 200...500°C.

**Достоинства пьезоэлектрических измерительных преобразователей:**

- простота конструкции,
- малые габариты и стоимость,
- высокая надежность,
- возможность измерения быстропеременных величин.

**Недостатки пьезоэлектрических измерительных преобразователей:**

- невысокая чувствительность,
- непригодность к измерению статических величин,
- высокое входное сопротивление измерительной цепи,

- относительно невысокий уровень выходного сигнала, что требует дополнительного усиления.

## **Содержание практической работы, выполняемой студентами**

### **1. Описание лабораторного оборудования:**

- ПЭВМ с моделирующей программой «Electronics Workbench».

### **2. Требования безопасности при выполнении работы**

#### ***I. Перед началом выполнения лабораторной работы:***

3. Изучить оборудование и рабочее место.
4. Получить разрешение к выполнению лабораторных работ от руководителя занятий или лаборанта.

#### ***II. Во время выполнения лабораторных работ:***

Убедиться, что на измерительных приборах переключатели установлены в исходном положении ручек, на минимальное напряжение и максимальные пределы измерения.

Включать питающие напряжения и собранные схемы только после разрешения руководителя занятий или лаборанта и предупреждения всех работающих.

В соответствии с методическими рекомендациями по выполнению лабораторных работ, выполнить необходимые измерения и занести их в рабочую тетрадь.

Проверять наличие питающих напряжений и проводить измерения электрических величин только с помощью соответствующих измерительных приборов, одной рукой, после установки на них максимально ожидаемого результата и рода измеряемой величины.

### **ВНИМАНИЕ!**

- Не прикасаться к открытым токоведущим частям, проводникам, клеммам и зажимам, не облокачиваться на приборы, не прикасаться к батареям, не отвлекаться от измерений, не производить изменений в схеме и не оставлять без наблюдения цепь, находящуюся под напряжением.
- При работе с катушками индуктивности и конденсаторами не трогать их и соединительные провода, так как вследствие резонанса могут возникнуть большие токи и напряжение.
- При обнаружении неисправностей в измерительных приборах **немедленно** отключить источники питания и доложить об этом руководителю занятий или лаборанту.

#### ***III. По окончании выполнения лабораторных работ:***

4. Докладить руководителю занятий или лаборанту о завершении работ.
5. Обесточить собранные схемы, разобрать их (если это предусмотрено) и выключить контрольно-измерительные приборы.
6. Привести в порядок и сдать рабочее место лаборанту, и доложить руководителю занятий о сдаче.

### **ПРИ РАБОТЕ ЗАПРЕЩАЕТСЯ:**

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>– производить самостоятельное включение автоматов защиты, заменять предохранители, устранять неисправности и повреждения;</li><li>– проводить какие-либо переключения, соединения, не предусмотренные инструкциями по выполнению лабораторных работ.</li></ul> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### **ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ И НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЯХ:**

- немедленно отключить автоматы защиты, доложить руководителю занятий и действовать согласно его указаний;
- при поражении электрическим током оказать первую помощь в соответствии с принятой методикой до прибытия врача.

### **ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА НАРУШЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ:**

- лица, нарушившие требования инструкции отстраняются от выполнения лабораторных работ и допускаются только после сдачи зачета по правилам и мерам безопасности;
- при выводе из строя приборов и оборудования лаборатории по вине лица, проводившего работы и в случае нарушения требования инструкции, они несут материальную ответственность в соответствии с действующим законодательством РФ.

### **3. Задание для работы**

20) Исследовать зависимости выходного напряжения емкостного акустоэлектрического преобразователя от параметров конденсатора и входного воздействия.

21) Исследовать зависимости выходного напряжения индуктивного акустоэлектрического преобразователя от параметров катушки индуктивности и входного воздействия.

22) Исследовать зависимости выходного напряжения пьезоэлектрического акустоэлектрического преобразователя от параметров пьезоэлектрика и входного воздействия.

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

### **4. Порядок выполнения работы**

#### ***4.1. Исследование емкостного акустоэлектрического преобразователя***

4.1.1. Запустить моделирующую программу EWB 5.12.

4.1.2. Собрать эквивалентную схему замещения емкостного преобразователя, с параметрами элементов, приведенными на рис. 4.

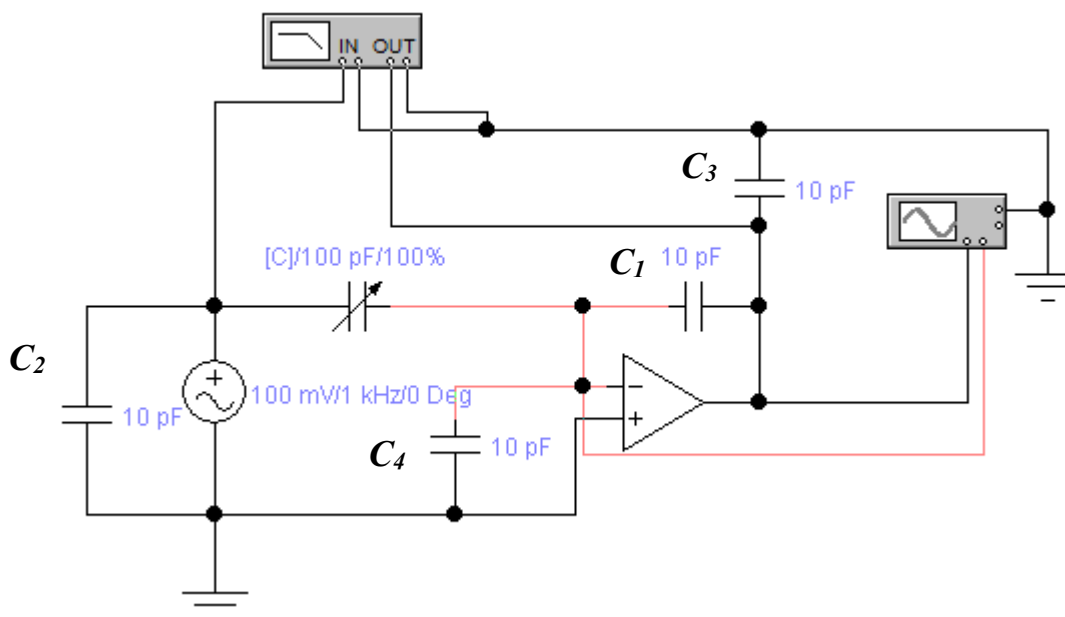


Рис. 4 – Эквивалентная схема замещения емкостного преобразователя

Данная схема соответствует электрической эквивалентной схеме функционального емкостного измерительного преобразователя, основу которой составляют датчик в виде переменного конденсатора  $C$  и операционный усилитель (ОУ) с емкостью цепи обратной связи  $C_1$ . Емкости  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  – это паразитные емкости проводов.

Схема построена по принципу делителя напряжения. Следовательно статическая характеристика измерительного преобразователя, то есть зависимость выходного напряжения  $U_{вых}$  от входного напряжения источника  $U_i$  пропорциональна коэффициенту деления

$$U_{\text{вых}} = U_i \frac{C}{C_1}. \quad (5)$$

Данный емкостной преобразователь при воздействии акустического поля вырабатывает выходное напряжение пропорциональное механическому изменению площади конденсатора  $C$ , то есть

$$U_{\text{вых}} = U_i \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d C_1}. \quad (6)$$

4.1.3. Включить симулятор EWB, убедиться в работоспособности схемы, просмотрев осциллограммы входных и выходных сигналов операционного усилителя. Отобразить осциллограммы в отчете. Измерить сдвиг фаз между выходным напряжением  $U_{вых}$  и напряжением источника измерения  $U_i$ .

4.1.4. Определить зависимость величины амплитуды  $U_{вых}$  выходного сигнала преобразователя от емкости измерительного конденсатора  $C$ . Для этого путем нажатия клавиши «C» при английской раскладке клавиатуры, уменьшать емкость конденсатора от 100 пФ до 0 пФ с шагом 5 пФ и производить измерение выходного напряжения  $U_{вых}$ . Построить график зависимости  $U_{вых} = f(C)$ .

4.1.5. Определить зависимость величины амплитуды  $U_{\text{вых}}$  выходного сигнала преобразователя от величины площади перекрытия пластин измерительного конденсатора  $C$ . Для этого, установить величину переменной емкости  $C = 88,5$  пФ, затем путем нажатия клавиши «C» при английской раскладке клавиатуры, уменьшать емкость конденсатора от 88,5 пФ до 0 пФ с шагом 4,425 пФ и производить измерение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Построить график зависимости  $U_{\text{вых}} = f(S)$ , для этого вначале определить коэффициент преобразования  $S = f(C)$  при условии, что  $\epsilon = 1$ ,  $d = 1$  мм.

4.1.6. Определить зависимость величины амплитуды  $U_{\text{вых}}$  выходного сигнала от расстояния между обкладками конденсатора  $d$ . Для этого, установить величину емкости  $C = 88,5$  пФ, затем путем нажатия клавиши «C» при английской раскладке клавиатуры, уменьшать емкость конденсатора от 88,5 пФ до 0 пФ с шагом 4,425 пФ и производить измерение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Построить график зависимости  $U_{\text{вых}} = f(d)$ , для этого вначале определить коэффициент преобразования  $d = f(C)$  при условии, что  $\epsilon = 1$ ,  $S = 10^{-3}$  м<sup>2</sup>.

4.1.7. Определить чувствительность измерительного конденсатора. Для этого найти величину входного напряжения, пропорционального мощности давления акустического сигнала, при условии, что напряжение на выходе конденсатора минимальное, но не равное нулю.

4.1.8. Измерить амплитудно-частотную характеристику емкостного преобразователя, для этого снять АЧХ с помощью измерителя *Bode Plotter* в диапазоне звуковых частот. Сделать выводы о диапазонных свойствах преобразователя.

## **4.2. Исследование индуктивного акустоэлектрического преобразователя**

4.2.1. Собрать эквивалентную схему замещения индуктивного преобразователя, с параметрами элементов, приведенными на рис. 5.

Схема включения индуктивного акустоэлектрического преобразователя представляет собой последовательную **RL**-цепь, на которой измерительный преобразователь представлен переменной индуктивностью  $L$ , управляемой одноименной клавишей клавиатуры. Сопротивление нагрузки  $R_n$  выбрано равным индуктивному сопротивлению преобразователя на рабочей частоте источника измерительного напряжения  $U_i$ .  $R_a$  – активное сопротивление обмотки катушки индуктивности.

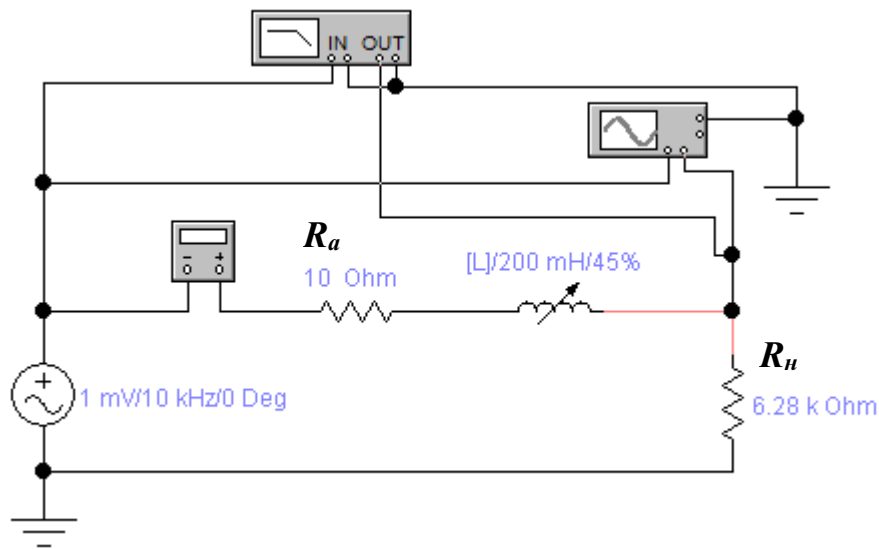


Рис. 5 – Эквивалентная схема замещения индуктивного преобразователя

Действующее значение тока в  $RL$ -цепи, измеряемое амперметром определяется как

$$I = \frac{U_i}{\sqrt{(R_a + R_i)^2 + (2\pi fL)^2}}. \quad (7)$$

Поскольку измерительный преобразователь используется для измерения линейного перемещения якоря под действием силового акустического поля, то после подстановки из (2) значения индуктивности  $L=f(\ )$  в (7) находим напряжение  $U_o$  на выходе измерителя:

$$U_o = \frac{R_i \cdot U_i}{\sqrt{(R_a + R_i)^2 + (2\pi f \varpi^2 \mu_o S / \delta)^2}}. \quad (8)$$

Если выбрать параметры измерительного преобразователя из условия, что  $(R_a + R_n) \ll (2\pi f \varpi^2 \mu_o S / \delta)$ , тогда

$$U_o = \frac{\delta R_i U_i}{2\pi f \varpi^2 \mu_o S} = K \delta, \quad \text{где} \quad K = \frac{R_i U_i}{2\pi f \varpi^2 \mu_o S} \quad (9)$$

$K$  – коэффициент преобразования, В/м.

4.2.2. Включить симулятор EWB 5.12, убедиться в работоспособности схемы, просмотрев осциллограммы входных и выходных сигналов преобразователя. Отобразить осциллограммы в отчете. Измерить сдвиг фаз между выходным напряжением  $U_o$  и напряжением источника измерения  $U_i$ .

4.2.3. Определить зависимость величины амплитуды  $U_o$  выходного сигнала преобразователя от величины индуктивности  $L$  измерительной катушки. Для этого, установить величину индуктивности  $L = 200$  мГн, затем путем нажатия клавиши « $L$ » при английской раскладке клавиатуры, уменьшать индуктивность катушки от 200 мГн до 0 с шагом 10 мГн и производить измерение выходного напряжения  $U_o$ . Построить график зависимости  $U_o = f(L)$ .

4.2.4. Определить зависимость величины амплитуды  $U_o$  выходного сигнала преобразователя от величины зазора. Для этого, установить величину индуктивности  $L = 126$  мГн, затем путем нажатия клавиши «L» при английской раскладке клавиатуры, уменьшать индуктивность катушки от 126 мГн до 0 с шагом 6,3 мГн и производить измерение выходного напряжения  $U_o$ . Построить график зависимости  $U_o = f(\quad)$ , при условии, что  $\mu = 1000$ ,  $\alpha = 1$ ,  $S = 2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>,  $l = 10^{-2}$  м.

4.2.5. Определить чувствительность измерительной магнитной системы. Для этого найти величину входного измерительного напряжения, пропорционального мощности давления акустического сигнала, при условии, что выходное напряжение преобразователя минимальное, но не равное нулю.

4.2.6. Измерить амплитудно-частотную характеристику емкостного преобразователя, для этого снять АЧХ с помощью измерителя *Bode Plotter* в диапазоне звуковых частот. Сделать выводы о диапазонных свойствах преобразователя.

### 4.3. Исследование пьезоэлектрического акустоэлектрического преобразователя

4.3.1. Собрать эквивалентную схему замещения пьезоэлектрического преобразователя, с параметрами элементов, приведенными на рис. 6.

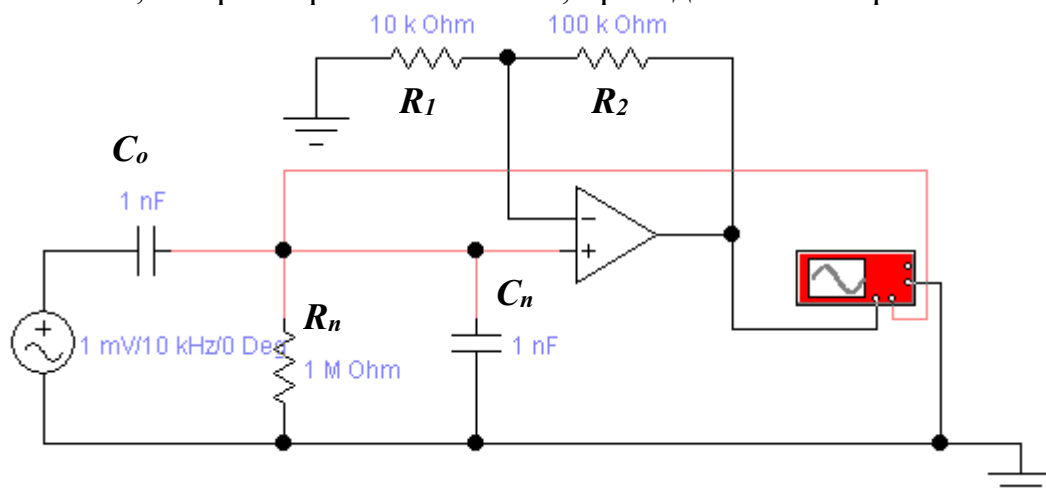


Рис. 6 – Эквивалентная схема замещения пьезоэлектрического преобразователя

Схема замещения пьезоэлектрического измерительного преобразователя включает в себя источник заряда, имитируемый источником напряжения и конденсатором  $C_o$ , и усилитель напряжения на операционном усилителе. Кроме того, на схеме обозначено:  $R_n$ ,  $C_n$  — сопротивление утечки преобразователя и емкость соединительного кабеля,  $R_1$ ,  $R_2$  — элементы цепи обратной связи усилителя, обеспечивающие по неинвертирующему входу коэффициент усиления

$$K = 1 + R_2/R_1 \quad (10).$$

Для увеличения выходного сигнала и повышения чувствительности преобразователя из пластин набирают батарею из последовательно подключенных пьезоэлементов.

4.3.2. Включить симулятор EWB 5.12, убедиться в работоспособности схемы, просмотрев осциллограммы входных и выходных сигналов преобразователя. Отобразить осциллограммы в отчете.

4.3.3. Определить зависимость величины амплитуды  $U_o$  выходного сигнала преобразователя от величины емкости  $C_o$  измерительного конденсатора. Для этого уменьшать емкость  $C_o$  конденсатора от 1 нФ до 100 пФ с шагом 100 пФ производить измерение выходного напряжения  $U_o$ . Построить график зависимости  $U_o = f(C_o)$ .

4.3.4. Определить чувствительность измерительного преобразователя. Для этого найти величину входного измерительного напряжения, пропорционального мощности давления акустического сигнала, при условии, что напряжение на выходе преобразователя без усиления минимальное, но не равное нулю.

4.3.5. Установить напряжение источника напряжения  $U_i = 10$  мкВ, подсоединить параллельно конденсатору  $C_o$  емкость величиной 1 мкФ, смоделировав батарею пьезоэлементов. Измерить выходное напряжение источника заряда  $U_o$ , сделать выводы об изменении величины напряжения.

4.4. Оформить отчет о проделанной работе.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №20 -22**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ  
ЭФФЕКТОВ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

**2. Моделирование и исследование принципов работы датчика Холла.**

**СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Современные технические средства и системы обработки, хранения и передачи информации имеют в своем составе функциональные акустоэлектрические преобразователи, к которым относятся микрофоны, и электроакустические преобразователи, к которым относятся системы звукового вещания и телефоны. Следует иметь ввиду, что данные преобразователи в большинстве случаев осуществляют двойное преобразование энергии, то есть помимо основного преобразования производят обратное преобразование. Так наиболее распространенные акустоэлектрические преобразователи линейны, то есть удовлетворяют требованиям неискаженной передачи сигнала и обратимы, следовательно, могут работать и как излучатель и как приемник и подчиняются принципу взаимности. Зная данное свойство, во многих средствах звукозаписи, звукофикации и передачи информации предусматриваются дополнительные меры по безопасности информации, исключающие появление опасных сигналов.

Однако многие радио и электротехнические элементы и устройства в принципе любых радиоэлектронных и электрических устройств и приборов обладают акустоэлектрическим эффектом, то есть при определенных условиях способны несанкционированно преобразовывать акустическую энергию (то есть энергию упругих волн в воздушной среде) в электромагнитную энергию. Это приводит к возникновению в электрических цепях радиоэлектронных и электрических устройств опасных сигналов. Поэтому для принятия эффективных мер по защите информации от утечки за счет возникновения опасных сигналов необходимо понимать принципы образования и работы

акустоэлектрических преобразователей.

В данной лабораторной работе проводятся исследования принципов работы наиболее распространенных акустических преобразователей: емкостных, электромагнитных и пьезоэлектрических преобразователей.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ДАТЧИКА ХОЛЛА

### Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Прежде чем перейти к исследованию самого датчика, нужно изучить принцип его работы. Датчик использует эффект Холла, открытый американским физиком Эдвином Холлом (E. Hall) в 1879 г. Это один из наиболее интересных гальваномагнитных явлений как в смысле доступности наблюдения, так и тех выводов, которые с помощью его могут быть сделаны.

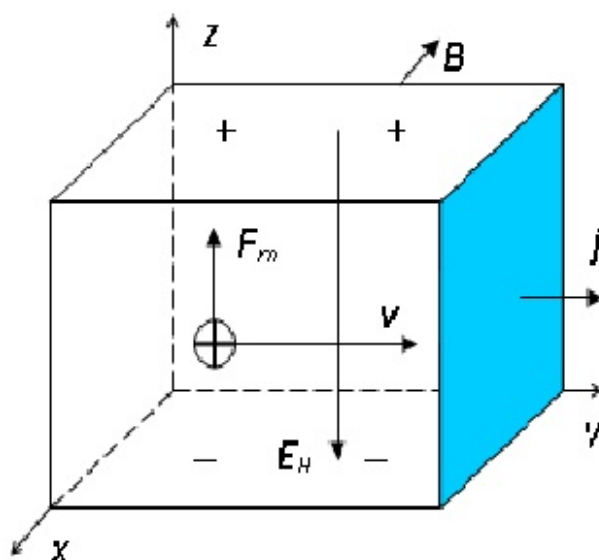


Рисунок 2.1 – Иллюстрация эффекта Холла (носителями тока являются положительные частицы)

Рассмотрим металлическую (или полупроводниковую) пластинку в форме прямоугольного параллелепипеда, по которой течет ток  $\vec{i}$ , находящуюся в поперечном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , изображенной на рисунке 1 и рисунке 2. Согласно электронной теории электропроводимости твердых тел ток представляет собой направлено движущийся поток заряженных частиц – носителей тока (электронов или дырок). Среднюю скорость их движения можно вычислить следующим образом:

$$\vec{v} = \frac{\vec{j}}{ne}, \quad v = \frac{i}{neab}, \quad (2.1)$$

Где  $j = \frac{i}{ab}$  - плотность тока,

$n$  – концентрация носителей тока,

$e$  – заряд одной частицы (алгебраическая величина),  
 $a$  и  $b$  – размеры поперечного сечения образца.

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца (голландский физик Н. А. Lorentz, 1853-1928)

$$\vec{F}_m = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.2)$$

Пусть образец ориентирован в магнитном поле так, как это показано на рисунке 1. Раскрывая написанное выше векторное произведение, можно убедиться, что только  $z$ -компонента силы Лоренца отлична от нуля

$$F_{mz} = -ev_y B_x \quad (2.3)$$

Если носителями тока являются положительные частицы ( $e > 0$ ), то направление их скорости  $\vec{v}$  совпадает с направлением тока, как показано на рисунке 1. На рисунке 2 показаны носители тока, имеющие отрицательный заряд ( $e < 0$ ), поэтому их скорость противоположна току. Но в том и другом случае сила Лоренца  $\vec{F}_m$  направлена в одну сторону – в данном случае вверх. В результате действия этой силы концентрация заряженных частиц на верхней грани параллелепипеда возрастает, только в первом случае – положительных, а во втором – отрицательных. Это приводит к появлению разности потенциалов между верхней и нижней гранями. За счет такой разности потенциалов возникает электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_i$ , которое будет действовать на заряженные частицы с силой

$$\vec{F}_e = e\vec{E}_H \quad (2.4)$$

Сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического поля  $F_e$ , направлена противоположно магнитной силе  $F_m$ , (Не учтена сила, действующая со стороны источника тока и вынуждающая носители тока участвовать в процессе токообразования).

Таким образом, на каждую частицу (носитель тока) действует сумма сил

$$\vec{F} = \vec{F}_m + \vec{F}_e. \quad (2.5)$$

В проекции на ось  $z$  в первом случае на рисунке 1 уравнение таково:

$$F_z = F_{mz} - F_{ez} \quad (2.6)$$

Процесс увеличения концентрации носителей тока на верхней грани образца прекратится, когда  $F_z$  обратится в нуль, т.е.

$$evB - eE_H = 0. \quad (2.7)$$

Соответствующая этому условию разность потенциалов между верхней и нижней гранями, если они не замкнуты внешней цепью, составляет ЭДС Холла.

$$\mathcal{E}_H = bE_H = bvB. \quad (2.8)$$

Подставляя формулу (1.1) для скорости получим

$$\varepsilon_H = \frac{iB}{ena} = R_H \frac{iB}{a}. \quad (2.9)$$

Величина  $R_H = 1/en$  называется *постоянной Холла*. Она зависит от свойств вещества. По ее знаку можно определить знак носителей тока в образце, а по величине – их концентрацию.

Более строгий подход, учитывающий распределение носителей тока по скоростям, дает следующее выражение для постоянной Холла

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en} \quad (2.10)$$

Наряду с концентрацией носителей можно определить их подвижность. Подвижностью  $\nu_0$  называется средняя скорость, которую приобретают носители тока под действием электрического поля напряженностью 1 В/м, созданного источником рабочего тока

$$\nu_0 = \bar{\nu}/E_0 \quad (2.11)$$

Так как  $i = \sigma E_0 ab$ , а из формулы (1.10) получаем  $1/en = (8/3\pi)R_H$ , то подвижность носителей тока получится следующей:

$$\nu_0 = \frac{8}{3\pi} \sigma R_H, \quad (2.12)$$

Где  $\sigma = 1/\rho$  - удельная электропроводность вещества.

Итак на рисунке 2.2. изображен датчик Холла, представляющий собой небольшую полупроводниковую пластину. Пластина имеет 4 вывода: два токовых вывода 1-2 и два вывода 3-4 для снятия напряжения. К выводам 1-2 подключается источник тока.

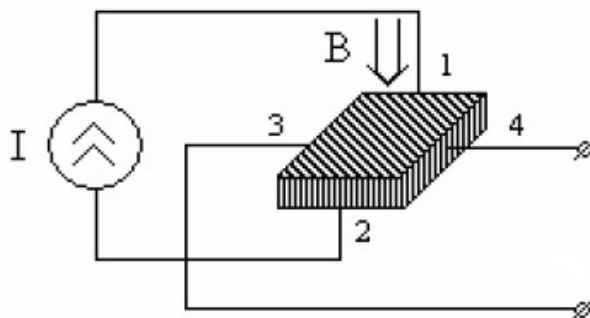


Рисунок 2.2. – Датчик Холла

При отсутствии внешнего магнитного поля носители тока (дырки, электроны) равномерно перемещаются от вывода 1 к выводу 2, поэтому на зажимах 3-4 ЭДС равна нулю ( $e=0$ ). При взаимодействии внешнего магнитного

поля с индукцией  $B$  носители тока под действием силы Лоренца отклоняются к одной из боковых граней (3-4), вследствие чего на одной из граней создается избыток зарядов одного знака, а на противоположной грани возникает заряд другого знака. В результате появляется ЭДС Холла

$$e = SB \sin \alpha \quad (2.13)$$

Где  $S$  – чувствительность датчика Холла

$\alpha$  – угол между вектором магнитной индукции  $B$  и плоскостью датчика.

### Содержание практической работы, выполняемой студентами

**Задание 2.1. Разработать в программной среде компьютерной математики MathCAD математическую модель датчика Холла.**

Порядок составления алгоритма в математическом пакете MathCAD:

- Ввести на рабочем окне программы исходные данные:
  - $S = 280$
  - $B = 0.5$
  - $\alpha = 0\text{deg}, 0,001\text{deg}..180\text{deg}$  (deg указывается, чтобы mathcad воспринял это за градусы)
- Ввести формулу (2.2), взяв в качестве переменной  $\alpha$ , для расчета зависимости ЭДС Холла от угла  $\alpha$ .

Алгоритм зависимости ЭДС Холла от вектора магнитной индукции.

- Ввести в рабочем окне программы исходные данные
  - $S = 280$
  - $B = 0..10$
  - $\alpha = 90\text{deg}$
- Ввести формулу (2.2), взяв в качестве переменной  $B$ , для расчета зависимости ЭДС Холла от вектора магнитной индукции.

Алгоритм зависимости ЭДС Холла от чувствительности датчика.

- Ввести в рабочем окне программы исходные данные
  - $S = 0..300$
  - $B = 0.5$
  - $\alpha = 90\text{deg}$
- Ввести формулу (2.2), взяв в качестве переменной  $S$ , для расчета зависимости ЭДС Холла от чувствительности датчика.

**Задание 2.2. Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы датчика Холла.**

Для построения данной модели были использованы следующие элементы:

- источник постоянного напряжения  $V1$ ;
- резисторы  $R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8$ ;
- два ключа  $S1, S2$ ;
- источники тока  $I1, I2, I3$ ;

В качестве источника электрического поля выбран источник постоянного

напряжения **V1**, так как питание реальных летчиков Холла осуществляется от аккумуляторных батарей. Величина электрического тока, проходящая через пластину, задается сопротивлением **R1** и **R2**.

В связи с тем, что необходимым условием возникновения эффекта Холла является наличие электрического поля, в схему введен переключатель **S1**, управляемый нажатием клавиатуры ПЭВМ, и ключ **S2**, управляемый напряжением, подаваемым из электронной цепи, демонстрирующих данное условие.

Внешнее переменное магнитное поле реализовано с помощью трех гармонических источников тока **I1**, **I2**, **I3** с различными частотами и фазовыми сдвигами с целью моделирования поля, создаваемого вокруг проводника при протекании через него многотонального электрического тока эквивалентного речи человека.

Резисторы **R3** и **R4** моделируют: магнитные сопротивления воздушного зазора между проводником и пластиной датчика и магнитное сопротивление пластины датчика соответственно.

В результате ток, задаваемый этими сопротивлениями, будет эквивалентен величине магнитного потока, а, следовательно, величине магнитной индукции внешнего поля. ЭДС Холла в данной схеме снимается осциллографом на сопротивлении нагрузки **R5**.

Для исследований нам так же понадобится схема моделирования поля, создаваемого вокруг проводника при протекании через него многотонального электрического тока эквивалентного речи человека, назовем это имитацией телефонной линии.

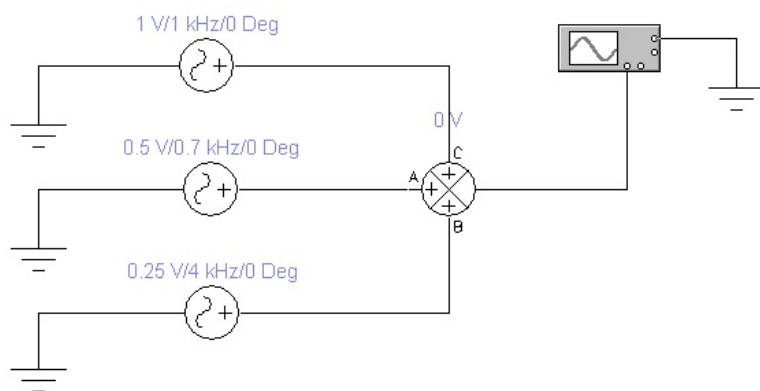


Рисунок 2.3 – Моделирование телефонной линии

Итак, схемотехническая модель датчика Холла представлена на рис. 2.4.

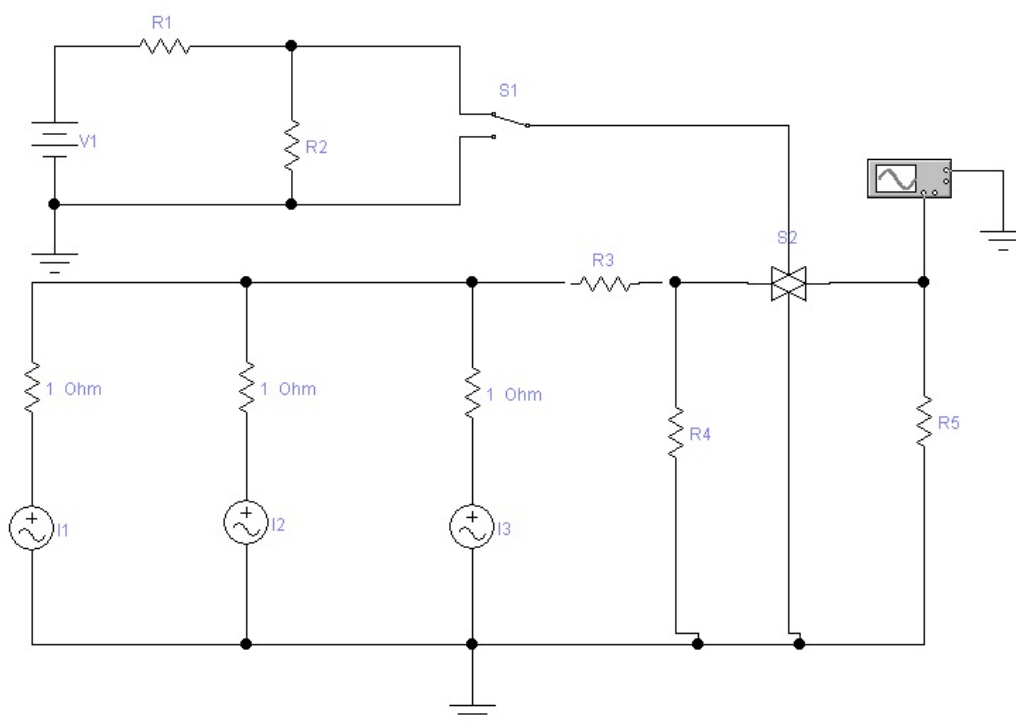


Рис. 2.4 – Схемотехническая модель датчика Холла

Исходные данные для моделирования:

I1 – гармонический источник тока: напряжение: 1 В, частота 1 кГц;

I2 – гармонический источник тока: напряжение 0.5 В, частота 0.7 кГц;

I3 – гармонический источник тока: напряжение 0.25 В, частота 4 кГц;

V1 – источник постоянного напряжения: 5 В;

R1 – резистор, являющийся сопротивлением тока, проходящего через пластину: 250 Ohm;

R2 – резистор, являющийся сопротивлением тока, проходящего через пластину: 500 Ohm;

R3 – резистор, являющийся сопротивлением воздушного зазора между пластиной и проводником: 300 Ohm;

R4 – резистор, являющийся магнитным сопротивлением пластины датчика: 300 Ohm;

R5 – резистор, являющийся сопротивлением нагрузки: 50 Ohm.

Порядок исследования датчика Холла:

1) Используя схемотехническую модель, приведенную на рисунке 2.4, провести исследования возможности перехвата датчиком речи передаваемой по телефонной линии.

2) Используя схемотехническую модель, приведенную на рисунке 2.4, провести исследования зависимости величины опасного сигнала от величины параметров датчика.

Сделать выводы по проделанной работе.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17 – 19.**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ**  
**ЭФФЕКТОВ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ОПТИКО-**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

**УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:**

- 1. Моделирование и исследование принципов работы оптико-электрических преобразователей.**

**СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**ВВОДНАЯ ЧАСТЬ**

Современные технические средства и системы обработки, хранения и передачи информации имеют в своем составе функциональные акустоэлектрические преобразователи, к которым относятся микрофоны, и электроакустические преобразователи, к которым относятся системы звукового вещания и телефоны. Следует иметь в виду, что данные преобразователи в большинстве случаев осуществляют двойное преобразование энергии, то есть помимо основного преобразования производят обратное преобразование. Так наиболее распространенные акустоэлектрические преобразователи линейны, то есть удовлетворяют требованиям неискаженной передачи сигнала и обратимы, следовательно, могут работать и как излучатель и как приемник и подчиняются принципу взаимности. Зная данное свойство, во многих средствах звукозаписи, звукофикации и передачи информации предусматриваются дополнительные меры по безопасности информации, исключающие появление опасных сигналов.

Однако многие радио и электротехнические элементы и устройства в принципе любых радиоэлектронных и электрических устройств и приборов обладают акустоэлектрическим эффектом, то есть при определенных условиях способны несанкционированно преобразовывать акустическую энергию (то есть энергию упругих волн в воздушной среде) в электромагнитную энергию. Это приводит к возникновению в электрических цепях радиоэлектронных и электрических устройств опасных сигналов. Поэтому для принятия эффективных мер по защите информации от утечки за счет возникновения опасных сигналов необходимо понимать принципы образования и работы акустоэлектрических преобразователей.

В данной лабораторной работе проводятся исследования принципов работы наиболее распространенных акустических преобразователей: емкостных, электромагнитных и пьезоэлектрических преобразователей.

# 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

## Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

### Разработка математической модели пирозлектрического преобразователя

Принцип действия пирозлектрического сенсора состоит в том, что спонтанная поляризация пирозлектрика уменьшается из-за нагревания под действием теплового потока, освобождая поверхностные заряды, стекающие через входное сопротивление усилителя. Таким образом, пирозэлемент генерирует электрический ток:

$$j = -\delta P_c / \delta t = (\delta P_c / \delta T)(\delta T / \delta t) = \gamma(\delta T / \delta t) \quad (3.1)$$

где  $\gamma = |\partial P_c / \partial T|$  – пирозлектрический коэффициент.

Для практики представляется важной задача определения формы индуцированного импульсного тока при воздействии прерывистого инфракрасного луча, который падает на пирозлектрический материал. При этом температура пирозэлемента увеличивается в соответствии с законом:

$$(1 - e^{-t/\tau})$$

Поскольку пирозлектрический ток  $j$ , в согласии с уравнением (4), изменяется пропорционально величине  $\delta T / \delta t$ , то  $j \sim e^{-t/\tau}$ . Из этого соотношения следует, что при одном импульсе ИК излучения появится только один импульс тока. Поскольку через некоторое время спадающий ток становится нулевым, то трудно установить, появлялся ли ИК луч или нет. Следовательно, для того, чтобы измерить температуру ИК - излучающего объекта ИК луч должен периодически прерываться.

С ростом частоты понижается чувствительность пирозэлемента: дело в том, что уменьшается его рабочий объем, поскольку изменяющаяся со временем тепловая волна на высокой частоте может проникать только в приповерхностные области пирозлектрика. Таким образом, возникает необходимость в оптимизации выбора частоты модуляции. Для пояснения сказанного на рис. приводится анализ динамического отклика пирозэлемента на ступенчатое воздействие теплового потока:  $\Phi_2 - \Phi_1$ . Электрический заряд  $Q$  освобождается практически мгновенно, но затем начинает снижаться с характерным временем  $\tau_T$ .

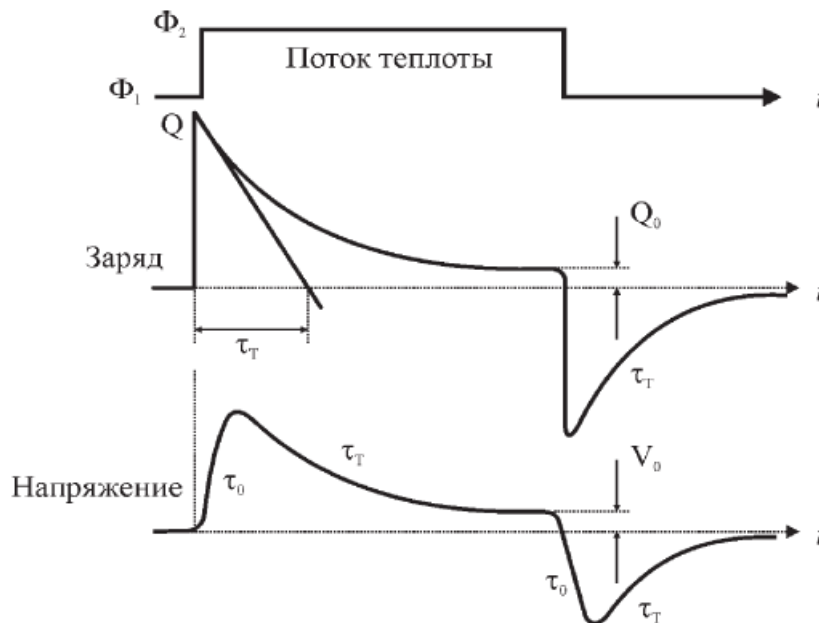


Рисунок 3.1 – Динамика отклика пироэлектрика на ступенчатое воздействие потока теплоты

Это время равно произведению емкости  $C$  в тепловой схеме замещения пироэлемента на «тепловое сопротивление»  $R_T$ :  $\tau_T = CR_T$ . Величина  $R_T$  характеризует комплекс различных причин: собственно электрическое сопротивление самого пироэлемента и входной цепи усилителя, а также тепловое рассеяние пироэлемента в окружающую среду.

Для низкочастотных применений пиродатчика параметр  $\tau_T$  должен быть по возможности большим для повышения чувствительности устройства. Напротив, для высокочастотных применений (таких как диагностика импульсов лазеров или импульсов СВЧ генераторов) параметр  $\tau_T$  должен быть как можно меньшим, для чего увеличивают «тепловой сток» с пироэлемента, помещая тонкую пленку сенсора на металлическую пластинку.

Если пироэлектрический элемент «электрически разомкнут», т.е. не нагружен на резистор, то на нем возрастает электрический потенциал со временем «электрической релаксации»  $\tau_E$ . Время электрической релаксации определяется пирокоэффициентом и диэлектрической проницаемостью активного материала.

### Содержание практической работы, выполняемой студентами

**Задание 3.1.** Разработать в программной среде компьютерной математики MathCAD математическую модель пироприемника.

Для этого составить вычислительную схему исходя из математического описания.

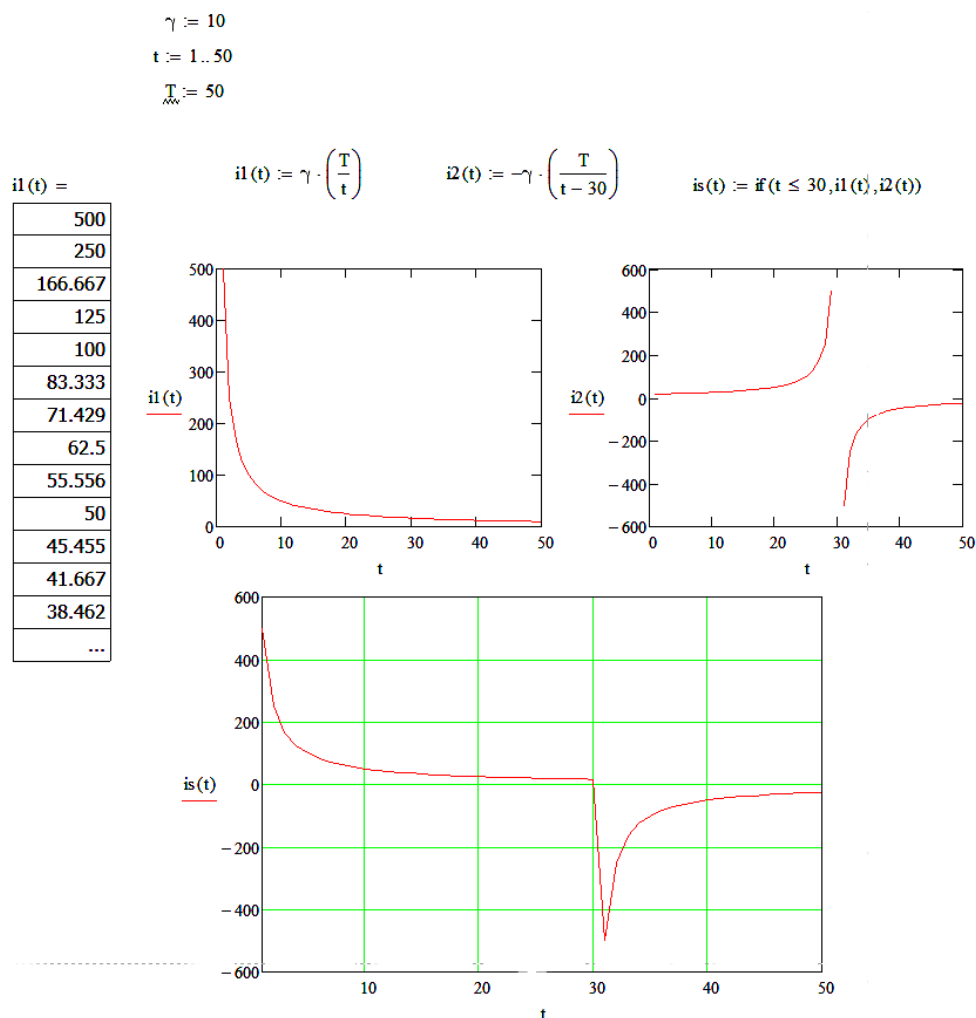
Ввести в рабочем окне программы исходные данные:

- ввести формулу для расчета пироэлектрического тока  $I$ ;
- ввести величину температуры  $T$ ;

- ввести величину пирозлектрического коэффициента  $\gamma$ ;
- ввести цикл чисел,  $t = 1 \dots 50$ ;

Периодическое изменение облучения вызывает периодическое изменение температуры пирозлектрического датчика, что, в свою очередь, индуцирует периодически изменяющийся пирозлектрический ток.

Пример:



### ***Задание 3.2. Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы пироприемника.***

Для построения данной модели использовать следующие компоненты:

- Function Generator – функциональный генератор, источник напряжения, выдающий синусоидальный, треугольный или прямоугольный сигнал;
- Voltage Differentiator – дифференциатор напряжения (нелинейно изменяет напряжение);
- Oscilloscope – двухканальный осциллограф для отображения величины и изменения электронных сигналов;
- конденсатор C;
- резистор R;

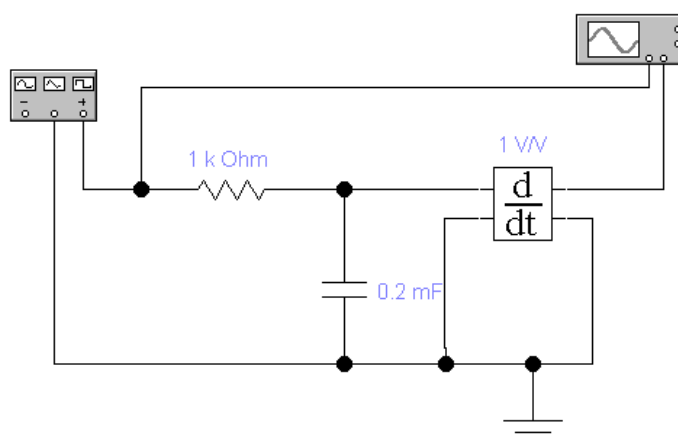


Рисунок 3.2 – Схемотехническая модель пирозлектрического датчика

Установить на панели функционального генератора режим последовательности прямоугольных импульсов; частоту повторения импульсов  $\omega$  - 0.5 Гц; отношение длительности импульса  $t_1$  к периоду импульсной последовательности  $T = 2\pi / \omega$  в процентах – 25%; амплитуду импульса – 5 В.

Установить значения сопротивления  $R = 1 \text{ кОм}$  и ёмкости  $C = 0.2 \text{ мФ}$ .

Получить осциллограмму, как показано на рис. 3.3.

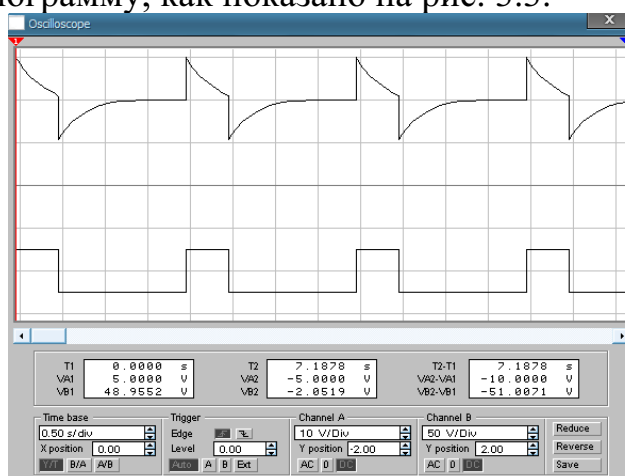


Рисунок 3.3. – Первоначальные показания осциллографа

### Исходных данных для моделирования :

- частота повторения импульсов  $\omega$  - 0.5 Гц;
- отношение длительности импульса  $t_1$  к периоду импульсной последовательности в процентах – 25%;
- амплитуду импульса – 5 В;
- сопротивление  $R = 1 \text{ кОм}$  ;
- ёмкость  $C = 0.2 \text{ мФ}$ ;

### Порядок проведения исследований

Используя схемотехническую модель, приведенную на рисунке 3.2, проведем следующие исследования:

1) измерения зависимости выходного сигнала пирозлектрического датчика от длительности теплового импульса;

2) измерения зависимости выходного сигнала пирозлектрического датчика от частоты повторения тепловых импульсов;

3) измерения зависимости выходного сигнала пирозлектрического датчика от тепловой постоянной времени.

Сделать выводы по проделанной работе.

### **5. Требования к отчету о проделанной лабораторной работе.**

В отчете привести:

- задание на выполнение работы,
- электрические схемы замещения акустоэлектрических преобразователей,
- порядок проведения работы,
- результаты измерений в виде графиков и таблиц;
- необходимые расчеты,
- выводы о проделанной работе.

### **6. Контрольные вопросы для подготовки к защите отчета:**

61) Принцип действия емкостного акустоэлектрического преобразователя.

62) Способы изменения емкости конденсатора преобразователя под действием силовых акустических волн.

63) Характеристика формулы для расчета емкости измерительного преобразователя.

64) Характеристики емкостных акустоэлектрических преобразователей как источников опасных сигналов.

65) Принцип действия электромагнитных акустоэлектрических преобразователей.

66) Способы изменения значений индуктивности или взаимоиндуктивности преобразователя под действием силовых акустических волн.

67) Характеристика типов электромагнитных преобразователей.

68) Характеристика формулы для расчета индуктивности измерительного преобразователя.

69) Принцип действия пьезоэлектрических акустоэлектрических преобразователей.

70) Характеристики пьезоэлектрических измерительных преобразователей как источников опасных сигналов.

71) Статическая характеристика емкостного измерительного преобразователя.

72) Характеристика зависимости величины выходного напряжения емкостного преобразователя от величины емкости измерительного конденсатора.

73) Характеристика зависимости величины выходного напряжения индуктивного преобразователя от величины емкости измерительной катушки индуктивности.

74) Порядок определения чувствительности акустоэлектрического преобразователя.

75) Порядок измерения АЧХ акустоэлектрических преобразователей и их сравнительная характеристика.

76) Характеристика зависимости величины выходного напряжения пьезоэлектрического преобразователя от величины емкости измерительного конденсатора.

77) Способ повышения величины выходного напряжения в источнике зарядов пьезоэлектрического преобразователя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

34) Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.

35) Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.

36) Лепешкин О.М. Физические основы математические и информационные модели защиты информации: Электронное учебное пособие. – Ставрополь: СГУ, 2005.

37) Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

### Лабораторная работа разработана доцентом кафедры ОТЗИ Сагдеевым К.М. Содержание МР к лабораторным работам по ФОЗИ

| №  | Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание                                                       | Часы |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|    | <b>Раздел 1. Физические поля объектов и проблемы защиты информации</b>                                              |      |
|    | Тема 3. Исследование электрических цепей как физической среды распространения тока и утечки электрических сигналов. |      |
| 1  | 1. Моделирование электрических цепей с сосредоточенными параметрами.                                                | 2    |
| 2  | 2. Исследование электрических цепей с сосредоточенными параметрами.                                                 | 2    |
| 3  | 3. Моделирование и исследование электрических цепей с распределенными параметрами.                                  | 2    |
|    | <b>Раздел 2. Физические основы электромагнитных явлений</b>                                                         |      |
|    | Тема 8. Моделирование и исследование электрических, магнитных, электромагнитных полей и волн.                       |      |
| 4  | 1. Моделирование электрических полей.                                                                               | 2    |
| 5  | 2. Исследование электрических полей.                                                                                | 2    |
| 6  | 3. Моделирование и исследование магнитных полей.                                                                    | 2    |
| 7  | 4. Моделирование и исследование явления электромагнитной индукции.                                                  | 2    |
| 8  | 5. Моделирование и исследование электромагнитных волн.                                                              | 2    |
|    | <b>Раздел 3. Физические основы функциональных процессов в радиоэлектронных средствах</b>                            |      |
|    | Тема 13. Моделирование и исследование физических процессов в радиоэлектронных средствах.                            |      |
| 9  | 1. Моделирование и исследование процессов регистрации электрических полей.                                          | 2    |
| 10 | 2. Моделирование и исследование процессов регистрации магнитных полей.                                              | 2    |
| 11 | 3. Моделирование и исследование наводок, возникающих за счет внешних паразитных связей.                             | 2    |
| 12 | 4. Исследование принципов экранирования полей и паразитных связей.                                                  | 2    |
| 13 | 5. Моделирование и исследование процессов фильтрации сигналов.                                                      | 2    |

| №  | Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                                                                                   | Часы      |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|    | <b>Раздел 4. Физические основы акустических явлений</b>                                                                                                                                                         |           |
| 14 | Тема 17. Моделирование и исследование акустических явлений.<br>1. Моделирование и исследование звуковых волн и речеподобных акустических сигналов.                                                              | 2         |
| 15 | 2. Моделирование и исследование акустических свойств помещений.                                                                                                                                                 | 2         |
| 16 | 3. Моделирование и исследование эффекта маскировки акустических сигналов.                                                                                                                                       | 2         |
|    | <b>Раздел 5. Физические эффекты в радиоэлектронных средствах, приводящие к образованию каналов утечки информации</b>                                                                                            |           |
| 17 | Тема 20. Моделирование и исследование физических эффектов акустоэлектрического и оптико-электрических преобразований.<br>1. Моделирование и исследование принципов работы акустоэлектрических преобразователей. | 2         |
| 18 | 2. Моделирование и исследование принципов работы датчика Холла.                                                                                                                                                 | 2         |
| 19 | 3. Моделирование и исследование принципов работы оптико-электрических преобразователей.                                                                                                                         | 2         |
|    | <b>Итого</b>                                                                                                                                                                                                    | <b>38</b> |

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по выполнению практических работ  
по дисциплине «Физические основы защиты информации»  
для студентов направления подготовки  
10.03.01 Информационная безопасность  
Направленность (профиль)  
«Организация и технологии защиты информации  
(по отрасли или в сфере профессиональной деятельности)»

Ставрополь, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Введение.....                                                          | 206 |
| 1. Общая характеристика самостоятельной работы студента .....          | 207 |
| 2. Технологическая карта самостоятельной работы студента.....          | 208 |
| 3. Самостоятельное изучение тем лекций.....                            | 209 |
| 4. Паспорт фонда оценочных средств для проверки самостоятельной работы | 210 |
| 5. Список рекомендуемой литературы.....                                | 217 |

## Введение

Целью изучения дисциплины «Физические основы защиты информации» является формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 10.03.01 Информационная безопасность. Формируемая в рамках дисциплины способность использования естественнонаучных законов в области электродинамики, радиофизики и акустики способствует углубленной подготовке бакалавров к решению профессиональных задач по защите информации.

Основными задачами дисциплины являются:

– общепрофессиональная подготовка бакалавров по выявлению сущности проблем, возникающих в процессе обеспечения информационной безопасности, и путей их решения на основе анализа физических явлений, процессов и эффектов в области электродинамики, радиофизики и акустики;

– теоретическая и практическая подготовка бакалавров к профессиональной экспериментально-исследовательской деятельности путем проведения экспериментов по заданной методике, обработки и анализа результатов.

– мотивация студентов к деятельности исследовательского характера для развития их творческих способностей, а также инициирование самообразовательной деятельности в освоении предметной области, касающейся вопросов защиты информации.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

| Перечень компонентов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Технологии формирования компетенции | Средства и технологии оценки    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Знать:</b><br>– основные естественнонаучные законы в области электродинамики, радиофизики и акустики,<br>– математический аппарат, описывающий физические поля в виде носителей информации, процесс формирования, распространения, приема и регистрации сигналов в электромагнитных и акустических полях;<br>– методы анализа электромагнитных и акустических явлений, процессов и эффектов;<br>– физические основы электромагнитных и акустических явлений, процессов и | лекции, самостоятельная работа      | собеседование, письменный отчет |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                      |                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| эффектов, приводящих к образованию технических каналов утечки информации;<br><b>Уметь:</b><br>– применять способы измерения физических величин для оценки информативных характеристик акустических и электромагнитных полей;<br>– моделировать физические явления, процессы и эффекты, происходящие в объектах информатизации, средствах разведки и защиты информации;<br><b>Владеть:</b><br>– методами обработки и анализа экспериментальных данных;<br>- профессиональной терминологией в области электродинамики, радиофизики и акустики. | лабораторная работа,<br>самостоятельная работа<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>лабораторная работа,<br>самостоятельная работа | собеседование,<br>письменный отчет<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>собеседование,<br>письменный отчет |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 1. Общая характеристика самостоятельной работы студента

Основными видами учебной работы по достижению результатов освоения дисциплины являются лекции, лабораторные работы и самостоятельная работа студентов (СРС).

На лекциях раскрываются основные положения и понятия курса, формируются знания в области физических основ защиты информации. На лабораторных работах формируются умения и навыки, необходимые для решения задач профессиональной деятельности.

Приступая к изучению учебной дисциплины, необходимо ознакомиться с учебной программой, получить в библиотеке рекомендованные учебные пособия, а также получить у ведущего преподавателя в электронном виде конспекты лекций, методические рекомендации к лабораторным работам и тестовые задания, завести новую тетрадь для конспектирования лекций и выполнения лабораторных работ.

Для изучения дисциплины предлагается список основной и дополнительной литературы. Основная литература предназначена для обязательного изучения, дополнительная – поможет более глубоко освоить отдельные вопросы, подготовить исследовательские задания и выполнить задания для самостоятельной работы.

В ходе лекционных занятий студент обязан осуществлять конспектирование учебного материала, особое внимание, обращая на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных понятий, физических явлений, процессов, эффектов. В рабочих конспектах желательно оставлять поля, на которых следует делать пометки из рекомендованной литературы, дополнять материал прослушанной лекции, формулировать научные выводы и

практические рекомендации. Студент имеет право задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций.

Самостоятельная работа студентов над материалом учебной дисциплины является неотъемлемой частью учебного процесса и должна предполагать углубление знания учебного материала, излагаемого на аудиторных занятиях, и приобретение дополнительных знаний по отдельным вопросам самостоятельно.

Основными видами самостоятельной работы курсантов по учебной дисциплине являются:

- самостоятельное изучение учебного материала по заданным темам;
- подготовка к лабораторным работам, оформление отчета по выполненной лабораторной работе и подготовка к защите отчета.

Основными методами самостоятельной работы студентов являются:

- 1) для овладения знаниями:
  - чтение текста (конспекта лекций, учебника, дополнительной литературы) и конспектирование текста;
  - работа с нормативными документами;
  - поиск информации в Интернет;
- 2) для закрепления и систематизации знаний:
  - работа с конспектом лекции (обработка текста);
  - повторная работа над учебным материалом (учебника, дополнительной литературы, слайдами);
  - составление плана и тезисов ответа или графическое изображение структуры ответа;
  - составление таблиц для систематизации учебного материала;
  - изучение нормативных документов;
  - ответы на контрольные вопросы;
- 3) для формирования умений:
  - практическая подготовка к лабораторным работам;
  - решение задач и практических заданий репродуктивного уровня по имеющемуся образцу;
  - решение задач и практических заданий реконструктивного уровня;
  - решение задач и практических заданий творческого уровня;
  - моделирование физических явлений, процессов и явлений;
  - проведение исследований с помощью разработанных моделей;
  - подготовка отчетов по лабораторным работам;
  - рефлексивный анализ профессиональных умений.

В случае пропуска учебного занятия студент может воспользоваться содержанием различных блоков учебно-методического комплекса (лекции, лабораторные работы, контрольные вопросы и тесты) для самоподготовки и освоения темы. Для самоконтроля необходимо использовать вопросы и задания, предлагаемые к лабораторным работам, а также варианты тестовых заданий.

## **2. Технологическая карта самостоятельной работы студента**

| Код<br>реализуемой<br>компетенции | Вид деятельности студентов                                                      | Итоговый<br>продукт<br>самостоятельной<br>работы | Средства<br>и<br>технологии<br>оценки | Объем<br>часов |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>3 семестр</b>                  |                                                                                 |                                                  |                                       |                |
| ОПК-4                             | Самостоятельное изучение учебного материала по темам № 2, 4, 9 лекций.          | Конспект                                         | Компьютерное тестирование             | 12.0           |
| ОПК-4                             | Самостоятельное изучение темы № 3 лабораторных работ.                           | Письменный отчет                                 | Собеседование                         | 12.0           |
| ОПК-4                             | Самостоятельное решение разноуровневых задач по темам № 1, 5 лабораторных работ | Письменный отчет с решением разноуровневых задач | Собеседование                         | 12.0           |
| <b>Итого:</b>                     |                                                                                 |                                                  |                                       | <b>36.0</b>    |

### 3. Самостоятельное изучение тем лекций

| п/п       | Темы для самостоятельного изучения                                                                                                                                                                                                | Рекомендуемые источники информации<br>(№ источника) |                     |                   |                              |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
|           |                                                                                                                                                                                                                                   | Основная                                            | Дополни-<br>тельная | Методи-<br>ческая | Интерн<br>ет-<br>ресурс<br>ы |
| 3 семестр |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                     |                     |                   |                              |
|           | <b>Раздел 1. Физические поля объектов и проблемы защиты информации</b>                                                                                                                                                            |                                                     |                     |                   |                              |
| 1         | <b>Характеристика физических полей объектов. Физические проблемы защиты информации.</b><br>1. Характеристика физических полей объектов: понятие физического поля;<br>2. Физические поля различной природы как носители информации | 1                                                   | 1, 2, 4, 5          | 3, 4              | 1                            |
|           | <b>Раздел 2. Физические основы электромагнитных явлений</b>                                                                                                                                                                       |                                                     |                     |                   |                              |
| 2         | <b>Магнитные поля объектов и магнитные носители информации.</b><br>1. Основы магнитного взаимодействия.<br>2. Магнитное поле, его характеристики.                                                                                 | 1                                                   | 3, 4, 5             | 2, 3              | 1                            |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                              |   |         |      |  |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---------|------|--|
|   | 3. Проявление магнитного поля.<br>4. Силы Ампера и Лоренца.<br>5. Свойства магнитного поля.<br>Магнитные носители информации.                                                                                                                                |   |         |      |  |
|   | <b>Раздел 3. Физические основы функциональных процессов в радиоэлектронных средствах</b>                                                                                                                                                                     |   |         |      |  |
| 3 | <b>Генерация электромагнитных колебаний. Паразитная генерация.</b><br>1. Свободные колебания в идеальном колебательном контуре.<br>2. Сохранение энергии при гармонических колебаниях.<br>3. Затухание свободных колебаний в реальном колебательном контуре. | 1 | 2, 3, 6 | 1, 5 |  |

#### 4. Паспорт фонда оценочных средств для проверки самостоятельной работы

| Код оцениваемой компетенции (или её части) | Модуль, раздел, тема (в соответствии с Программой) | Тип контроля            | Вид контроля                      | Компонент фонда оценочных средств                | Количество заданий для каждого уровня, шт. |               |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
|                                            |                                                    |                         |                                   |                                                  | Базовый                                    | Повышенный    |
| 3 семестр                                  |                                                    |                         |                                   |                                                  |                                            |               |
|                                            |                                                    | Промежуточный (экзамен) | Устный                            | Вопросы к экзаменам                              | 75                                         |               |
| ПК-1                                       | 1 – 5                                              | текущий                 | с помощью тех. средств письменный | компьютерное тестирование<br><br>типовые задания | 200<br><br>32                              | 100<br><br>18 |
| ПК-20                                      | 1 – 5                                              | текущий                 | с помощью тех. средств письменный | компьютерное тестирование<br><br>типовые задания | 100<br><br>32                              | 65<br><br>18  |
| ПК-22                                      | 1 – 5                                              | текущий                 | письменный                        | типовые задания                                  | 32                                         | 18            |

##### 4.1 Вопросы для подготовки к экзамену

*Базовый уровень:*

**Знать:**

1. Понятие физического поля.
2. Физические поля различной природы как носители информации об объектах.
3. Общие принципы регистрации информативных характеристик полей.
4. Физические основы образования каналов утечки информации.
5. Классификация технических каналов утечки информации.
6. Роль физических эффектов в образовании каналов утечки информации и создании технических средств защиты информации.
7. Основы теории поля физического.
8. Поток векторного поля и его физический смысл.
9. Дивергенция векторного поля и ее физический смысл.
10. Циркуляция векторного поля и ее физический смысл.
11. Ротор векторного поля и его физический смысл.
12. Градиент скалярного поля и его физический смысл.
13. Общая характеристика волн. Распределение волн по частоте.
14. Гармонические волны, их параметры.
15. Уравнение плоской бегущей волны.
16. Волновое уравнение.
17. Волновые явления, их характеристики.
18. Основы электрического взаимодействия.
19. Виды электрических полей, их сравнительная характеристика.
20. Электростатическое поле, его характеристики и свойства.
21. Действие электрического поля на вещества.
22. Электрическое поле в проводнике.
23. Основы магнитного взаимодействия.
24. Магнитное поле, его характеристики.
25. Воздействие магнитного поля на вещества. Магнитный гистерезис.
26. Воздействие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы и проводники с током. Силы Ампера и Лоренца.
27. Свойства магнитного поля.
28. Магнитные носители информации. Принципы записи и считывания.
29. Электромагнитная индукция.
30. Вихревое электрическое поле, ток смещения.
31. Уравнения Максвелла, их физический смысл.
32. Понятие электромагнитной волны, ее характеристики.
33. Свойства электромагнитной волны.
34. Поле электрического диполя. Ближняя и дальняя зоны излучателя.
35. Поле магнитного диполя. Ближняя и дальняя зоны излучателя.
36. Перенос энергии электромагнитными волнами.

37. Особенности распространения радиоволн в однородной и неоднородной средах.
38. Регистрация электромагнитных полей.
39. Физические процессы в электрических цепях.
40. Паразитная емкостная связь.

**Уметь, Владеть:**

**Задачи для проверки умений и навыков**

1. Собрать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 схему, содержащую синусоидальный источник напряжения и функциональный генератор, провести измерение параметров носителей информации.
2. Собрать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 схему интегрирующего усилителя, определить сдвиг фаз между входным и выходным электрическими сигналами.
3. Собрать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 схему дифференцирующего усилителя, определить сдвиг фаз между входным и выходным электрическими сигналами.
4. Собрать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 схему исследования спектров аналоговых и дискретных электрических сигналов, провести их измерение и сравнительный анализ.
5. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 эквивалентную схему замещения индукционного датчика – измерителя поля, определить величину напряженности магнитного поля.
6. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 эквивалентную схему замещения электрического диполя – измерителя поля, определить величину напряженности электрического поля.
7. Собрать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 схему исследования информационных параметров амплитудно-модулированных и частотно-модулированных радиосигналов в частотной и временной областях, произвести измерение временных и спектральных параметров радиосигналов.
8. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник гармонического напряжения и активное сопротивление; измерить амплитуду напряжения на резисторе, рассчитать силу тока в цепи, установить взаимосвязь напряжения и тока в цепи активного сопротивления.
9. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник гармонического напряжения и идеальную индуктивность; измерить амплитуду напряжения на индуктивности, рассчитать силу тока в цепи, установить взаимосвязь напряжения и тока в цепи идеальной индуктивности.
10. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник гармонического напряжения и идеальную емкость; измерить амплитуду напряжения на конденсаторе, рассчитать силу тока в цепи, установить взаимосвязь напряжения и тока в цепи

идеальной емкости.

*Повышенный уровень:*

**Знать:**

1. Паразитная индуктивная связь.
  2. Паразитная гальваническая связь.
  3. Основы экранирования полей.
  4. Экранирование электрических полей.
  5. Экранирование магнитных полей.
  6. Экранирование электромагнитных полей.
  7. Свободные колебания в идеальном колебательном контуре.
- Сохранение энергии при гармонических колебаниях.
8. Затухание свободных колебаний в реальном колебательном контуре.
  9. Вынужденные колебания в колебательном контуре.
  10. Устройства генерации синусоидальных колебаний.
  11. Паразитная генерация.
  12. Генерация электромагнитных волн.
  13. Основы модуляции. Представление сигналов.
  14. Амплитудно-модулированные колебания.
  15. Частотно-модулированные колебания.
  16. Демодуляция.
  17. Основы пространственной селекции.
  18. Основы частотной фильтрации (селекции).
  19. Принципы построения и работы частотных фильтров.
  20. Упругие волны, их характеристики.
  21. Характерные особенности и свойства звуковых волн.
  22. Инфразвук, ультразвук.
  23. Основы акустики речи.
  24. Основы акустики слуха.
  25. Особенности распространения воздушных акустических волн в закрытых помещениях. Реверберация.
  26. Физические основы звукоизоляции.
  27. Физические основы звукопоглощения.
  28. Классификация и общая характеристика акустоэлектрических преобразователей.
  29. Индуктивные генераторные акустоэлектрические (электромагнитные, электродинамические, магнитострикционные) преобразователи.
  30. Параметрические акустоэлектрические (емкостные, пьезоэлектрические, тензорезистивные) преобразователи.
  31. Эффект Холла. Датчик Холла.
  32. Физические эффекты акустооптического преобразования.
  33. Физические эффекты оптико-электрического преобразования.

Пироприемники.

34. Физические эффекты оптико-электрического преобразования. Фотоприемники.

35. Преобразование инфракрасного излучения в видимое излучение.

**Уметь, Владеть:**

**Задачи для проверки умений и навыков**

1. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник гармонического напряжения, активное сопротивление и индуктивность; измерить амплитуду напряжения на индуктивности, рассчитать силу тока в цепи, установить взаимосвязь напряжения и тока в данной цепи.

2. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник гармонического напряжения, активное сопротивление и емкость; измерить амплитуду напряжения на емкости, рассчитать силу тока в цепи, установить взаимосвязь напряжения и тока в данной цепи.

3. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник импульсного напряжения, активное сопротивление и индуктивность; продемонстрировать и объяснить физические явления, происходящие в данной цепи.

4. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 электрическую цепь, содержащую источник импульсного напряжения, активное сопротивление и емкость; продемонстрировать и объяснить физические явления, происходящие в данной цепи.

5. Смоделировать в программе схемотехнического моделирования EWB 5.12 последовательный контур, продемонстрировать явления резонанса в последовательном контуре, определить частоту резонанса, получить амплитудно-частотную характеристику контура и его полосу пропускания.

#### **4.2 Комплект разноуровневых задач и заданий**

**1. Тема 3. Исследование электрических цепей как физической среды распространения тока и утечки электрических сигналов.**

***Типовые задачи (всего 11 заданий):***

***Задания реконструктивного уровня:***

24) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование интегрирующей RC цепи.

25) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование интегрирующей RL цепи.

26) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование дифференцирующей RC цепи.

27) Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование дифференцирующей RL цепи.

28)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств последовательного колебательного контура.

29)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств параллельного колебательного контура.

30)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств последовательного колебательного контура.

31)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» и провести исследование резонансных свойств параллельного колебательного контура.

***Задания творческого уровня:***

32)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» с помощью элементов с сосредоточенными параметрами сегмент длинной линии в виде витой пары пятой категории и провести ее исследование.

33)Смоделировать в программе «MathCAD» математическую модель длинной линии в виде витой пары пятой категории и произвести расчет ее вторичных параметров.

34)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» заданную однородную длинную линию связи и провести ее исследование в различных режимах.

**2. Тема 8. Моделирование и исследование электрических, магнитных, электромагнитных полей и волн.**

***Типовые задачи (всего 9 заданий):***

***Задания реконструктивного уровня:***

35)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в электрическом поле плоского конденсатора.

36)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» электрическое поле от дискретного набора электрических зарядов.

37)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» нерелятивистское движение заряженных частиц в магнитном поле.

38)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» магнитное поле от дискретного набора постоянных электрических токов.

39)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» параметры плоской электромагнитной волны.

***Задания творческого уровня:***

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

41)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» переменное магнитное поле и явление электромагнитной индукции.

42)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» пространственно-временное распределение векторов напряженностей плоской электромагнитной волны.

43)Смоделировать и исследовать в системе «Mathcad» особенности пространственно-временного распределения векторов напряженностей сферических и цилиндрических электромагнитных волн.

**3. Тема 13. Моделирование и исследование физических процессов в радиоэлектронных средствах.**

**Типовые задачи (всего 13 заданий):**

**Задания реконструктивного уровня:**

44)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней емкостной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

45)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения внешней резистивной параллельной паразитной связи между двумя каналами.

46)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения последовательной паразитной связи через паразитную взаимную индуктивность между двумя каналами.

47)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса экранирования источника электромагнитного излучения.

48)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса электрического экранирования коаксиального кабеля.

49)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса магнитного экранирования коаксиального кабеля.

50)Смоделировать и исследовать пассивный фильтр низких частот.

51)Смоделировать и исследовать пассивный фильтр высоких частот.

52)Смоделировать и исследовать пассивный полосно-пропускающий фильтр.

53)Смоделировать и исследовать пассивный полосно-заграждающий фильтр.

**Задания творческого уровня:**

54)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения индукционного преобразователя для измерения магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

55)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» эквивалентную схему замещения электрического диполя для измерения напряженности электрического поля.

56)Смоделировать и исследовать эквивалентную схему замещения процесса полного экранирования коаксиального кабеля.

**4. Тема 17. Моделирование и исследование акустических явлений.**

**Типовые задачи (всего 7 заданий):**

**Задания реконструктивного уровня:**

57)Собрать схему лабораторной установки и провести исследование зависимости порога слышимости от частоты.

58) Исследовать эффективность маскировки звуков при воздействии тонального маскирующего звука.

59)Исследовать эффективность маскировки звуков при воздействии белого шума.

60)Исследовать эффективность маскировки звуков при воздействии розового шума.

61)Исследовать эффективность маскировки звуков при воздействии серого шума.

**Задания творческого уровня:**

62)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» речеподобный звук.

63)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» шумоподобный звук.

## **5. Тема 20. Моделирование и исследование физических эффектов акустоэлектрического и оптико-электрических преобразований.**

*Типовые задачи (всего 10 заданий):*

*Задания реконструктивного уровня:*

64)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы емкостного акустоэлектрического преобразователя, получить зависимость выходного напряжения емкостного акустоэлектрического преобразователя от параметров конденсатора и входного воздействия.

65)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы индуктивного акустоэлектрического преобразователя, получить зависимость выходного напряжения индуктивного акустоэлектрического преобразователя от параметров катушки индуктивности и входного воздействия.

66)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы пьезоэлектрического акустоэлектрического преобразователя, получить зависимость выходного напряжения пьезоэлектрического акустоэлектрического преобразователя от параметров пьезоэлектрика и входного воздействия.

67)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы тензорезистивного акустоэлектрического преобразователя, получить зависимость выходного напряжения тензорезистивного акустоэлектрического преобразователя от параметров тензорезистора и входного воздействия.

*Задания творческого уровня:*

68)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы магнитострикционного акустоэлектрического преобразователя.

69)Разработать в программной среде компьютерной математики MathCAD математическую модель датчика.

70)Смоделировать и исследовать в программе «Electronics Workbench» принцип работы датчика Холла.

71)Разработать в программной среде компьютерной математики MathCAD математическую модель пироприемника.

72)Смоделировать в программе «Electronics Workbench» электрическую схему замещения пироприемника.

73)Провести исследование в программе «Electronics Workbench» принципов работы пироприемника.

## **5. Список рекомендуемой литературы**

### **5.1. Основная литература**

1. Харченко, Е.А. Физические основы защиты информации: Учебное пособие / Е. А. Харченко, Моск. гос. индустр. ун-т . – М. : Изд-во МГИУ, 2011 . – 154 с.

2. Соболев А.Н., Кириллов В.Н. Физические основы технических средств обеспечения информационной безопасности. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 214 с.
3. Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.
4. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.
5. Трофимова Т.И. Краткий курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2004.
6. Ан А.Ф., Самохин А.В. Общий курс физики. Физические основы электромагнитных явлений: конспект лекций. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2006.
7. Креопалов В.В. Технические средства и методы защиты информации: учебно-практическое пособие [Электронный ресурс]/ В.В. Креопалов. – М.: Евразийский открытый институт, 2011. – URL:<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=90753>

## **5.2. Дополнительная литература**

1. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики: Учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2002. – 720 с.
2. Трофимова Т.И. Краткий курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 352 с.
3. Ан А.Ф., Самохин А.В. Общий курс физики. Физические основы электромагнитных явлений: конспект лекций. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2006. – 120 с.
4. Пинегина Т.Ю., Серебрякова Т.К. Курс физики. Волны: Учебное пособие. – Новосибирск: НГУ, 2000. – 128 с.

## **5.3. Методическая литература**

1. Электронный курс лекций:
2. Электронные методические рекомендации по выполнению лабораторных работ.
3. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров. Русская версия. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
4. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений. – М.: Диалог-МИФИ, 2004..
5. Серебряков А.С. Электротехника и электроника. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Multisim. – М.: Высшая школа, 2009.

## **5.4. Интернет-ресурсы**

1. <http://www.physel.ru/-mainmenu-29/mainmenu-46/493-s-162---.html>

### **5.5. Программное обеспечение**

1. Программа тестового контроля «АСТ» или «Айрен»;
2. Математический программный редактор «Mathcad Professional – 12»;
3. Программный редактор «Electronics Workbench» не ниже EWB 5.12;
4. Программный акустический редактор «Sine Wave Generator».

### **5.6. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

1. Лекционная аудитория, оборудованная электронной доской;
2. Компьютерный класс из расчета не менее одной ПЭВМ на два человека;
3. Лабораторное оборудование: осциллографы GOS-620FG, генераторы НЧ сигналов GOS-810, частотомеры GFC 8010H, блоки питания НУ3005, электронные платы к ПЭВМ ЛА–Н 10 М6.