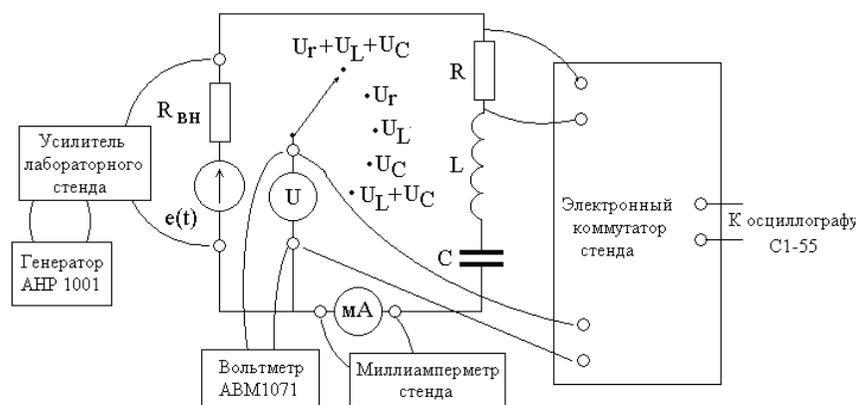


В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Учебное пособие



Воронеж 2014

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

В.П. Литвиненко

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2014

УДК 621.372

Литвиненко В.П. Лабораторный практикум по теории цепей: учеб. пособие / В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. 104 с.

Учебное пособие предназначено для выполнения лабораторных работ. В нем приведены описание измерительных приборов, лабораторные задания и правила их выполнения. Предложен комплекс моделирующих программ и задания по исследованию сигналов и цепей с помощью программ схемотехнического моделирования MicroCAP и WorkBench, приведены указания по их применению. Даются примеры применения программы MathCad для расчетов сигналов и цепей. Часть индивидуальных заданий проверяется с помощью автоматизированной контролирующей системы АКОС.

Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210400 «Радиотехника», профилю 210400.62 «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов», дисциплинам "Основы теории цепей" и "Дополнительные разделы теории цепей" очной формы обучения.

Табл. 37. Ил. 55. Библиогр.: 8 назв.

Научный редактор доцент Б.В. Матвеев

Рецензенты: кафедра инфокоммуникационных систем
и технологий Воронежского института МВД
России (начальник кафедры д.т.н., проф.
О.И. Бокова)
канд. техн. наук, доцент А.Б. Токарев

© Литвиненко В.П., 2014.

© Оформление. ГОУВПО «Воронежский
государственный технический университет», 2014.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные работы являются важнейшей составляющей изучения электрических цепей и действующих в них сигналов. При этом прежде всего необходимо освоить измерительные приборы и методику проведения моделирования, расчетов и измерений характеристик цепей и сигналов [1-5].

В пособии приведено краткое описание комплекса измерительных приборов (генератора сигналов, вольтметра, осциллографа и лабораторного стенда), методики их калибровки и проведения измерений.

Для проведения экспериментальных исследований в пособии представлены задания по лабораторным работам (схемы цепей, описания сигналов, порядок выполнения экспериментов). Приводятся правила оформления отчета о проделанной работе.

Современные средства вычислительной техники позволяют проводить разнообразные исследования сигналов и цепей методами имитационного моделирования. Они обеспечивают высокую степень соответствия результатов моделирования и экспериментальных работ, что позволяет использовать моделирование для проверки лабораторных исследований. Кроме того, моделирование дает возможность существенно расширить и углубить процесс изучения цепей и сигналов.

Учебное пособие ориентировано на использование простейших моделирующих программ MicroCAP и WorkBench [6,7]. Можно использовать и более сложные и мощные программные комплексы ORCAD или DesignLab. При проведении расчетов сигналов и цепей предлагается использовать пакет программ MathCad.

Совместное использование экспериментальных работ и имитационного моделирования позволит существенно повысить качество изучения материала и глубину освоения современных средств вычислительной техники.

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Целью лабораторного практикума является экспериментальное изучение физических процессов в радиотехнических и электронных устройствах, освоение методов их схемотехнического моделирования и исследования, закрепление полученных теоретических знаний, овладение техникой простейших измерений. Перед началом лабораторной работы студент должен выполнить домашнее задание.

Домашнее задание состоит из двух частей :

1) подготовки теоретического материала, решения задач по соответствующей теме;

2) оформления "заготовки" отчета по лабораторной работе.

Заготовка отчета оформляется дома до начала лабораторной работы в тетради или на отдельных скрепленных между собой листах формата А4 с указанием Ф.И.О. и группы студента, названия лабораторной работы. Затем следуют разделы, в которых описываются планируемые расчеты и эксперименты, приводятся схемы цепей, заготовки таблиц и графиков, которые будут заполняться в ходе эксперимента. После *каждого пункта* лабораторного задания оставляется свободное место для необходимых вычислений и **обязательных выводов**. Заготовка отчета оформляется в соответствии с **требованиями стандарта ВГТУ** [8].

Разбиение материала на разделы производится студентом самостоятельно. Один раздел может охватывать один или несколько близких по смыслу пунктов задания. Раздел может разбиваться на подразделы, каждый из которых соответствует пункту лабораторного задания или его части. В конце отчета оставляется место для заключения (общих выводов) по работе (например, о применимости законов Ома и Кирхгофа).

Ниже показан пример оформления заготовки отчета.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2
 ГАРМОНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ТОК В ЭЛЕМЕНТАХ
 ЦЕПИ R, L, C И ИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ

ВВЕДЕНИЕ (цель работы, постановка задачи, методика выполнения)

1. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ (название раздела)

В схеме цепи, показанной на рис.1, вычислим реактивное сопротивление индуктивности

$$x_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1,26 \text{ кОм}.$$

Результаты измерений приведены в табл.1.

Рисунок

Рисунок 1.- Схема исследуемой цепи (название)

Таблица 1. Сопротивления элементов цепи (название)

R Ом	x_L Ом	x_C Ом	z Ом

....

2. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЙ

....

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если необходимо, оставляется место для лабораторных расчетов с указанием формул и будущих выводов после каждого пункта лабораторного задания (как видно из графика на рис.2).

Заключение содержит краткие общие выводы по лабораторной работе, объединяющие выводы, сделанные ранее по каждому пункту лабораторного задания.

Приведенные рисунки и таблицы сопровождаются названиями. В тексте ссылки на рисунки и таблицы записываются сокращенно (рис.1, табл.2). Другие сокращения слов стандарт запрещает.

Оформление заготовки отчета дает возможность студенту продумать ход будущей лабораторной работы и оформить отчет по ней без больших затрат времени непосредственно на занятии. По окончании эксперимента студент завершает оформление отчета, делает выводы, пишет заключение и предъявляет отчет преподавателю для проверки и сдачи зачета. Зачет предполагает объяснение полученных экспериментальных результатов, ответы на теоретические вопросы и решение задач, связанных с тематикой проведенных исследований.

При не выполненном (хотя бы частично) домашнем задании студент не допускается к выполнению лабораторной работы. Зачет по проделанной работе должен быть сдан до начала следующей.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Генератор гармонических сигналов Г4-42

Генератор Г4-42 предназначен для формирования гармонических сигналов в диапазоне частот от 12 кГц до 10 МГц с действующим значением от 0 до 1 В и возможностью амплитудной модуляции тональным сигналом 400 Гц или 1 кГц. Внешний вид передней панели прибора показан на рис. 1.

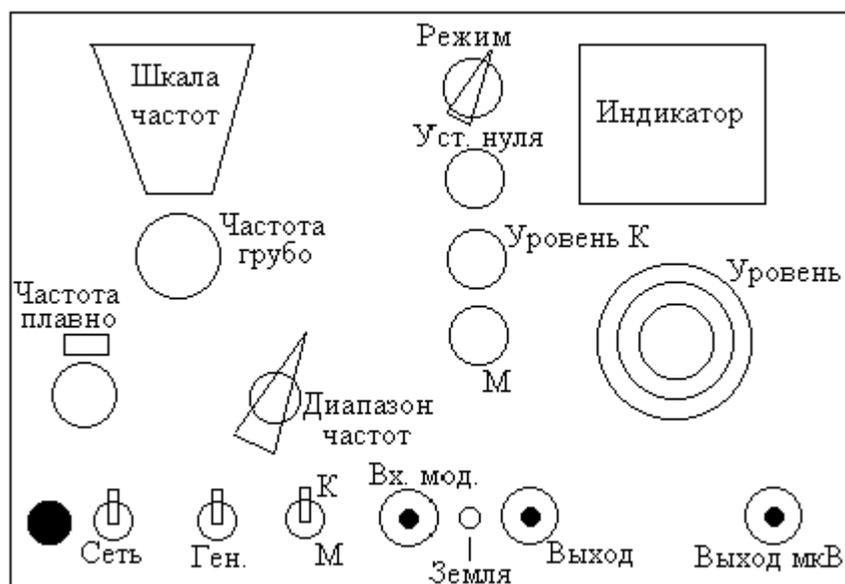


Рис. 1

Общий интервал частот разбит на диапазоны, номера которых определяет переключатель «Диапазон частот», например, диапазон II определяет частоты от 12 кГц до 85 кГц. Значение частоты сигнала в выбранном диапазоне задается ручкой «Частота грубо» и отсчитывается по «Шкале частот», номер

шкалы определяется номером диапазона. Ручкой «Частота плавно» можно подстроить выбранную частоту по той же шкале.

Прибор включается тумблером «Сеть». Тумблер «Ген.» в нижнем положении отключает выходной сигнал генератора без выключения питания прибора.

Стрелочный «Индикатор» позволяет устанавливать уровень выходного сигнала и глубину амплитудной модуляции. Его измерительная шкала переключается тумблером «К/М» (контроль уровня/измерение глубины модуляции).

Вид выходного сигнала определяется переключателем «Режим». В крайнем правом положении прибор формирует гармонический сигнал с постоянным уровнем. При этом возможна амплитудная модуляция внешним сигналом, подаваемым на вход «Вх. мод.». Если он отсутствует, на выходах генератора формируется гармонический сигнал. При повороте переключателя влево включается внутренняя амплитудная модуляция выходного сигнала с частотой 400 Гц или 1000 Гц.

Выходной сигнал снимается через разъемы «Выход» и «Выход мкВ». Уровень сигнала на первом из них задается ручкой «Уровень» со шкалой на 100 делений. Если прибор откалиброван, то максимальное деление шкалы соответствует 1 В действующего значения выходного сигнала. Напряжение на разьеме «Выход мкВ» меньше в число раз, определяемое положением переключателя, расположенного над регулятором «Уровень».

Рядом с индикатором расположена ручка «Уст. нуля», с помощью которой устанавливаются нулевые показания при выключенной тумблером «Ген.» генерации сигнала.

С помощью ручки «Уровень К» осуществляется калибровка выходного сигнала генератора путем установки стрелки индикатора (тумблер «К/М» в верхнем положении) на точку шкалы, отмеченную буквой К.

Ниже расположен регулятор М, позволяющий регулировать глубину амплитудной модуляции в процентах (тумблер «К/М» в нижнем положении).

РАБОТА С ПРИБОРОМ

Калибровка. После включения питания и самопрогрева прибора в течение нескольких минут выключите генерацию тумблером «Ген.» и ручкой «Уст. нуля» установите нулевые показания индикатора (тумблер «К/М» в верхнем положении). Включите генерацию, переключатель «Режим» установите в крайнее правое положение (непрерывная генерация). Ручкой «Уровень К» установите стрелку индикатора на отметку «К» по верхней шкале.

Подготовка к работе. С помощью переключателя выберите требуемый диапазон частот, установите частоту сигнала. Выходное напряжение снимается с разъема «Выход», его действующее значение устанавливается ручкой «Уровень» (100 делений соответствуют напряжению 1 В).

Генератор сигналов АНР 1001

Генератор формирует гармонические, прямоугольные и треугольные сигналы в диапазоне частот от 0,2 Гц до 2 МГц с амплитудой напряжения до 20 В и широким набором возможностей по изменению формы и параметров сигналов. Его внешний вид показан на рис. 2.

Выбор вида сигнала (гармонические, прямоугольные или треугольные импульсы) производится переключателями в правой части передней панели. Левее расположена группа переключателей частотных диапазонов и табло встроенного в прибор электронного частотомера.

В нижней части расположены ручки регулировки парамет-

ров сигнала. В лабораторных работах необходимо использовать левую (плавная установка частоты) и правую (регулировка амплитуды сигнала), а остальные должны находиться в **крайнем левом** положении.

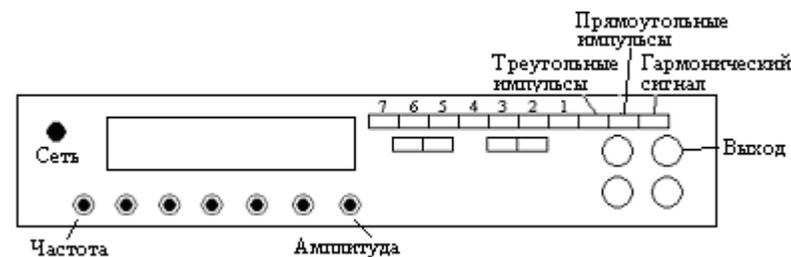


Рис. 2

Назначение остальных органов управления, которые не используются в ходе лабораторных работ, приведено в техническом описании прибора, с которым можно ознакомиться в лаборатории.

Калибровка прибора не требуется.

Подготовка к работе. После включения питания тумблером «сеть» выбираются форма сигнала и диапазон частот. Частота сигнала устанавливается ручкой плавной регулировки по показаниям частотомера, а амплитуда – ручкой регулировки уровня.

Вольтметр универсальный В7-26

Вольтметр предназначен для измерения постоянного (от 30 мВ до 300В), переменного синусоидального напряжения (от 200 мВ до 300 В) и сопротивления постоянному току (от 10 Ом до 1000 Мом). Внешний вид прибора показан на рис. 3. Измеряемая величина определяется переключателем «Режим» (слева направо измерение переменного напряжения U, отрицательного и положительного постоянного напряжения $-U$ и

$+U$, сопротивления r_x). Предел измерения (цена максимального отклонения стрелки измерителя) для напряжений выбирается соответствующим переключателем в зависимости от измеряемой величины. Для сопротивлений Ω переключатель «Пределы измерения» задает *множитель шкалы*.

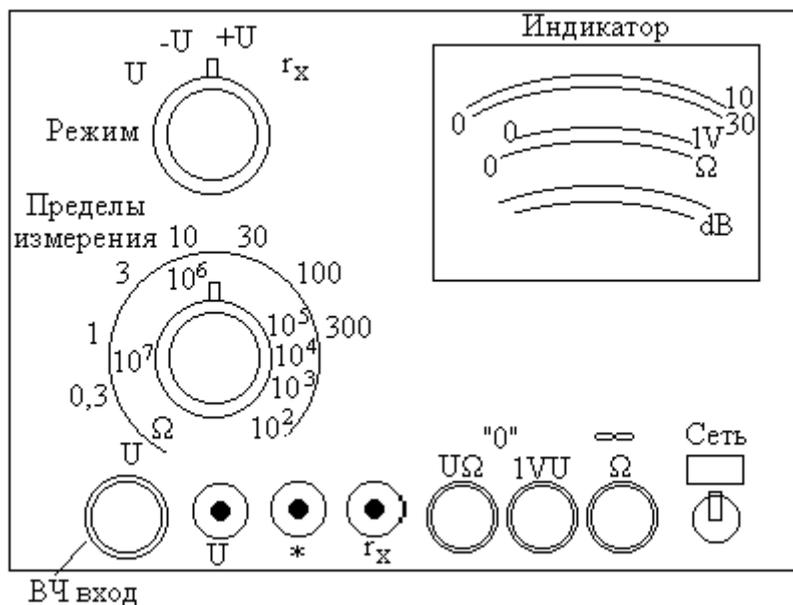


Рис. 3

Измеряемое низкочастотное напряжение подается на вход U (символом * обозначена клемма «земля»), а высокочастотное измеряется выносным пробником «ВЧ вход» (в лабораторных работах он не используется и должен быть вставлен в гнездо прибора). Измеряемое сопротивление подключается между клеммами r_x и *.

Отсчет измеряемой величины производится по одной из шкал «Индикатора». Две верхних шкалы используются при измерении напряжений: нижняя (на 30 делений) на пределах

3, 30 и 300 В, а верхняя (на 10 делений) на пределах 10 и 100 В. На пределе 1 В используется отдельная шкала 1V (третья сверху), ее нулевая точка вынесена отдельно вправо и используется для калибровки прибора. Четвертая сверху шкала Ω предназначена для измерения сопротивления, ее показания *умножаются* на выбранный переключателем «Пределы измерения» множитель. Две нижние шкалы применяются при измерении напряжений в децибелах (дБ).

Ручки $U\Omega$ и 1VU используются для калибровки нуля прибора, а Ω - для калибровки бесконечных показаний омметра.

РАБОТА С ПРИБОРОМ

Калибровка. После включения питания тумблером «Сеть» и самопрогрева прибора в течении нескольких минут проводится калибровка прибора, которая затем **повторяется** каждые 15-20 минут. Для этого необходимо отключить внешние источники и выбрать переключателем «Режим» измеряемую величину.

При измерении переменного напряжения необходимо переключатель «Режим» установить в положение U , замкнуть клеммы U и *, выбрать предел измерения 1V и ручкой установки нуля 1VU установить ноль по шкале 1V (он смещен вправо относительно других шкал). Затем следует выбрать предел 30В и ручкой установки нуля $U\Omega$ установить ноль по остальным шкалам. Эта процедура повторяется 2-3 раза.

При измерении сопротивления переключатель «Режим» необходимо установить в положение r_x , замкнуть клеммы r_x и *, ручкой установки нуля $U\Omega$ добиться нулевых показаний по шкале Ω . Затем клеммы r_x и * размыкаются и ручкой установки бесконечности Ω добиваются соответствующих показаний по шкале измерения сопротивления. Эта процедура повторяется 2-3 раза.

Подготовка к работе. Переключателем «Режим» выбирается измеряемая величина и подбирается подходящий предел измерения. Напряжение подается на клеммы U и * (земля), а сопротивление подключается к клеммам r_x и *.

В режиме омметра *не забывайте* отключать все источники сигнала от измеряемого сопротивления. Через 15-20 минут работы повторяйте калибровку прибора.

Микровольтметр АВМ-1071

Микровольтметр АВМ-1071 предназначен для измерения переменного напряжения с действующим значением от 100 мкВ до 300 В в диапазоне частот до 1 МГц. Внешний вид передней панели показан на рис. 4.

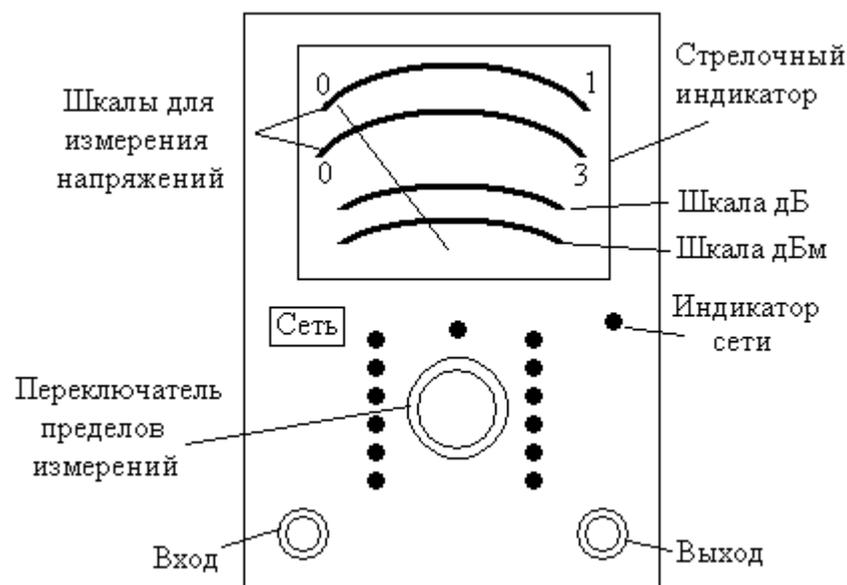


Рис. 4

Прибор включается клавишей «Сеть» и через 5 мин.

готов к работе (калибровка не требуется).

Действующие значения напряжения измеряются по двум верхним шкалам с пределом 1 деление (используется на пределах 1 мВ, 10 мВ, 100 мВ, 1 В, 10 В и 100 В) и 3 деления (используется на пределах 300 мкВ, 3 мВ, 30 мВ, 300 мВ, 3 В, 30 В и 300 В). Пределы измерений выбираются с помощью переключателя.

Входной сигнал подается на вход прибора (разъем расположен в левом нижнем углу). Выход прибора может использоваться для подключения осциллографа.

РАБОТА С ПРИБОРОМ

При измерении неизвестного напряжения переключатель пределов измерения установите в положение «300 В» и затем подберите необходимое значение.

Электронный осциллограф С1-55

Двухлучевой электронный осциллограф С1-55 предназначен для визуализации временных диаграмм двух сигналов и измерений их параметров по осям времени и уровня. Внешний вид прибора показан на рис.5.

Изображение формируется на экране электронно - лучевой трубки осциллографа. Рядом с двух сторон расположены органы управления двумя лучами: их яркостью - «Яркость» и толщиной луча - «Фокус» и «Астигматизм». С их помощью оператор выбирает удобную интенсивность и четкость изображения. Смещение изображения по горизонтали производится двумя ручками (грубо и плавно).

Исследуемый сигнал подается на вход «Вх.1» или «Вх.2» одного из каналов вертикального отклонения луча КВО 1 или КВО 2. Переключателем З/О выбирается тип входа (закрытый или открытый).

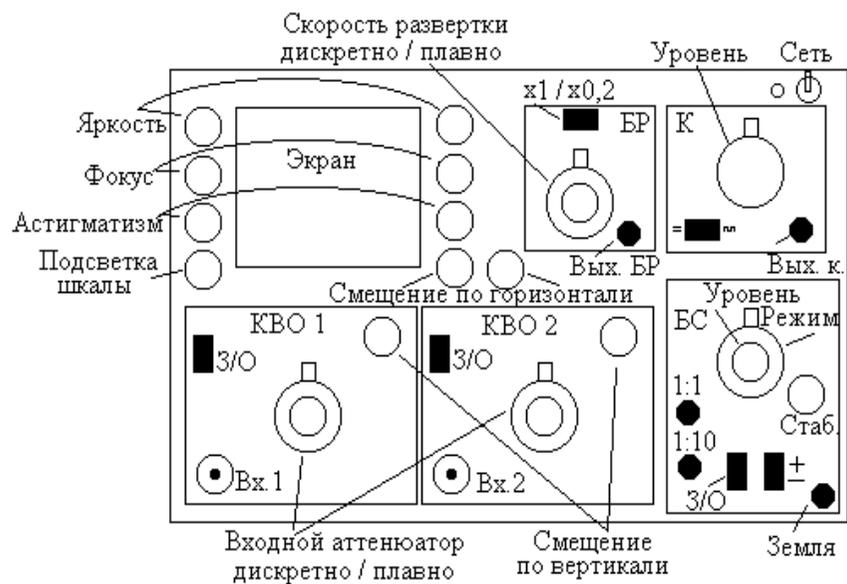


Рис. 5

При закрытом входе последовательно в сигнальную цепь включен разделительный конденсатор и постоянная составляющая сигнала не приводит к смещению луча по экрану. Если вход открыт, то разделительный конденсатор замыкается и можно проводить измерение как переменных, так и постоянных во времени сигналов. В каждом канале имеются ручки смещения луча по вертикали.

Размер изображения по вертикали выбирается входным аттенюатором. Он состоит из переключателя, который обеспечивает заданный размер изображения в делениях сетки экрана (В/дел.), и плавный регулятор, расположенный сверху переключателя. В крайнем правом положении ручки плавного регулятора имеется фиксирующая защелка. *Только в этом случае* развертка по вертикали калибрована, и можно проводить измерение уровня сигнала по размеру изображения с учетом положения переключателя чувствительности канала, ука-

зывающего, сколько вольт приходится на одно деление сетки экрана.

Развертка изображения по горизонтали осуществляется пилообразными импульсами напряжения $u_p(t)$ (рис. 6) от блока развертки (БР), обеспечивающими пропорциональность времени горизонтальной оси изображения сигнала $u_{вх}(t)$.

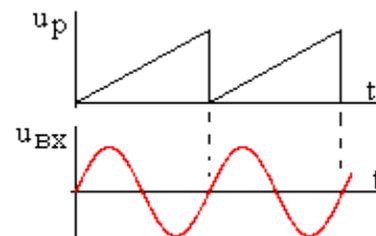


Рис. 6

Скорость развертки определяется переключателем, указывающим, сколько миллисекунд (ms) или микросекунд (μ s) приходится на одно деление сетки экрана по горизонтали, и плавным регулятором, расположенным над переключателем.

Ручка плавного регулятора в правом положении находится в защелке. *Только в этом случае* развертка по горизонтали калибрована, и можно проводить измерение временных характеристик сигнала по размеру изображения с учетом положения переключателя скорости развертки, указывающего, какой интервал времени приходится на одно деление сетки экрана.

Скорость развертки может резко изменяться тумблером « $\times 1 / \times 0,2$ » с двумя положениями: $\times 1$ (скорость определяется положением переключателя) и $\times 0,2$ (показания переключателя скорости развертки необходимо умножать на 0,2). Последний вариант используется для анализа высокочастотных сигналов. Выходной сигнал блока развертки выдается на клемму «Вых. БР».

Для обеспечения устойчивого изображения пилообразное напряжение развертки должно быть **синхронизировано** с исследуемым сигналом. Это обеспечивает блок синхронизации БС. Обычно используются два вида синхронизации:

- **внешняя** путем подачи синхроимпульсов на один из входов «1:1» или «1:10» БС с коэффициентами ослабления 1:1 или 1:10 соответственно;

- **внутренняя** путем выделения в БС синхроимпульсов из исследуемого сигнала первого или второго каналов вертикального отклонения.

Выбор вида синхронизации производится переключателем «Режим» с соответствующими положениями «Внешн.», «Внутр. 1» и «Внутр. 2». Переключатель З/О блока синхронизации задает закрытый/открытый вход для внешнего сигнала.

Переключатель «±» указывает, что синхроимпульсы для генератора развертки формируются по фронту («+») или по срезу («-») сигнала синхронизации.

Генератор развертки может работать в двух режимах:

- **непрерывной развертки**, при этом пилообразные импульсы формируются всегда и независимо от наличия или отсутствия синхроимпульсов от БС и входного сигнала осциллографа;

- **ждущей развертки**, при этом каждый пилообразный импульс выдается в ответ на поступивший синхроимпульс от БС, и если внешние импульсы синхронизации или входной сигнал в режиме внутренней синхронизации отсутствуют, то нет и развертки луча.

Наиболее **устойчивое изображение** получается в режиме ждущей развертки и внешней синхронизации.

Режим развертки выбирается ручками «Уровень» (над переключателем режима) и «Стабильность».

В правом верхнем углу прибора размещен калибратор К. Он служит для проверки каналов вертикального отклонения при подаче контрольного сигнала от «Выход к.» на входной разъем канала. Можно использовать либо постоянный, либо импульсный сигнал калибровки (выбирается тумблером) с величиной напряжения, задаваемой переключателем «Уровень».

При включении прибора тумблером «Сеть» после нескольких секунд при отсутствии входного сигнала на экране появляется изображение горизонтальной линии.

Ручка «Стаб.» устанавливается в **крайнее правое** положение, а ручка «Уровень» - в **среднее**, при этом осциллограф будет работать в режиме **непрерывной развертки**.

Если изображение луча отсутствует, то возможны следующие причины:

- недостаточна яркость луча, необходимо ручку «Яркость» повернуть вправо;

- луч смещен за пределы экрана, тогда необходимо установить требуемое положение луча ручками смещения по вертикали и горизонтали.

В результате на экране наблюдается горизонтальная линия с началом в левой части экрана.

После установки луча подается входной сигнал, выбираются требуемые размеры изображения по вертикали с помощью входного аттенюатора (В/дел.) и скорость развертки (с/дел.). Изображение может быть размытым, неустойчивым, многократно повторяющимся.

Для получения устойчивого изображения необходимо провести синхронизацию осциллографа (в режиме внешней синхронизации на вход «1:1» БС должен быть подан внешний синхросигнал). Для этого ручка «Стаб.» из крайнего правого положения поворачивается влево до погасания луча и немного возвращается назад до появления изображения. Затем ручкой «Уровень» в окрестности среднего положения добиваются стабилизации (хотя бы частичной) изображения. После этого опять поворачивают ручку «Стаб.» влево до погасания луча и возвращают назад до появления изображения, и вновь ручкой «Уровень» добиваются его устойчивости.

Эта процедура повторяется несколько раз и обеспечивает режим ждущей развертки, в котором синхронность не нарушается при переключении входного аттенюатора или скорости развертки. Производится окончательная настройка изображения временной диаграммы сигнала.

По изображению сигнала можно проводить измерения уровня (амплитуды) и временных параметров (например, периода повторения). Полученная соответствующая величина размера изображения в делениях сетки экрана умножается на цену деления по вертикали (задается переключателем входного аттенюатора) или горизонтали (задается переключателем скорости развертки).

Необходимо следить, чтобы ручки плавной регулировки входного аттенюатора и скорости развертки находились в крайнем правом положении (в защелке), в противном случае будет нарушаться калибровка вертикальной и горизонтальной осей изображения.

Лабораторный стенд

Лабораторный стенд является нестандартным лабораторным оборудованием и предназначен для фронтального выполнения лабораторных работ по курсам «Основы теории цепей», «Общая электротехника» и «Электротехника и электроника». Внешний вид стенда показан на рис. 7. Для каждой работы используется специальная плата с установленными элементами (на стенд можно установить две платы).

В правой части расположен блок усилителей (БУ), на вход которого подается напряжение от генератора Г4-42. Блок имеет выход «Вых. Е», соответствующий источнику напряжения, и выход «Вых. I», близкий по свойствам источнику тока. Каждый выходной сигнал имеет органы регулировки амплитуды «Е» и «I» соответственно.

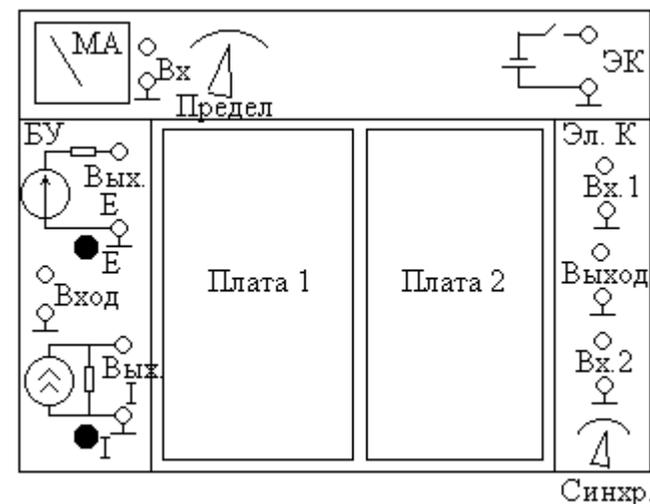


Рис. 7

Ток в исследуемой цепи измеряется миллиамперметром (МА), расположенным в верхней части стенда, его вход расположен рядом с измерительной головкой. Предел измерения выбирается переключателем «Предел».

В правой части стенда находится электронный коммутатор «Эл. К». Он имеет два симметричных (без земляной точки) входа «Вх.1» и «Вх.2» и выход, к которому подключается один канал осциллографа. Отсутствие «земли» на входах коммутатора позволяет подключать их к любым точкам исследуемой цепи и попеременно подавать два гармонических напряжения на осциллограф для измерения сдвига фаз между ними. На верхней панели стенда находится выход электронного коммутатора ЭК для выполнении лабораторной работы «Свободные процессы в линейных цепях».

В правой части стенда расположен переключатель сигнала синхронизации от блока усилителей (БУ) или от электронного коммутатора (ЭК). Синхросигнал подается на вход внешней синхронизации осциллографа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Цель работы - ознакомление с требованиями к выполнению лабораторных работ, с измерительными приборами, установленными на рабочем месте, освоение органов управления и правил использования приборов при проведении измерений.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомьтесь с инструкцией по технике безопасности при проведении экспериментальных работ в лаборатории.

2. Получите инструктаж преподавателя о порядке выполнения лабораторных работ, об используемом оборудовании и лабораторном стенде. Освойте назначение всех узлов лабораторного стенда и органов управления.

3. После объяснений преподавателя по методическим указаниям в лаборатории изучите описание, правила подготовки к работе и проведения измерений с помощью приборов и лабораторного стенда.

4. Установите уровень сигнала на выходе генератора АНР 1001 или Г4-42 равным 0,5 В на частоте 50 кГц. Подключите к выходу генератора осциллограф, установите устойчивое изображение гармонического сигнала на экране и измерьте его амплитуду и частоту. Сравните результаты с установленными данными. Проведите измерения при других параметрах сигнала.

5. Соедините с выходом генератора АНР 1001 или Г4-42 вольтметр и измерьте уровень сигнала. Сравните результат с установленным значением и с результатом осциллографических измерений.

6. Подключите генератор АНР 1001 или Г4-42 к входу усилителя лабораторного стенда и установите уровень сигнала 0,3-0,7 В на частоте 100 кГц. Соедините вольтметр с выходом

источника напряжения и регулятором уровня установите напряжение источника 1,5 В. Отключите вольтметр и подайте сигнал источника на осциллограф, измерьте параметры сигнала, сравните их с показаниями вольтметра.

7. Подготовьтесь к сдаче устного зачета. Отчет по данной лабораторной работе не оформляется.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы - изучить взаимосвязь постоянных токов и напряжений в резистивной цепи.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. В схеме цепи, показанной на рис. 8, установите ключи $K_5 \div K_1$ в положение, соответствующее **двоичному коду** Вашего номера N по модулю 32 в списке группы (таблица кодов в приложении 1), кодовая запись имеет вид $K_5K_4K_3K_2K_1$, значения $K_i = 0$ или 1, $i = 1, 2, 3, 4, 5$. Зарисуйте полученный вариант электрической цепи. Значения сопротивлений элементов цепи в **Омах** определяются выражением

$$R_k = 1000 \cdot [1,2 + \sin(k \cdot G + N)],$$

где G - номер группы, N - номер студента в списке группы, k - номер сопротивления в схеме на рис. 8. Значение ЭДС E источника примите равным 10 В.

2. Постройте модель полученной цепи постоянного тока в программе MicroCAP, проведите моделирование, опишите его в отчете, определите обозначенные на схеме рис. 8 токи I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 и I_6 , представьте результаты в табл. 1.

3. Постройте модель той же цепи тока в программе Work-Bench, проведите моделирование, опишите его, «измерьте» токи I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 и I_6 , занесите их в табл. 1.

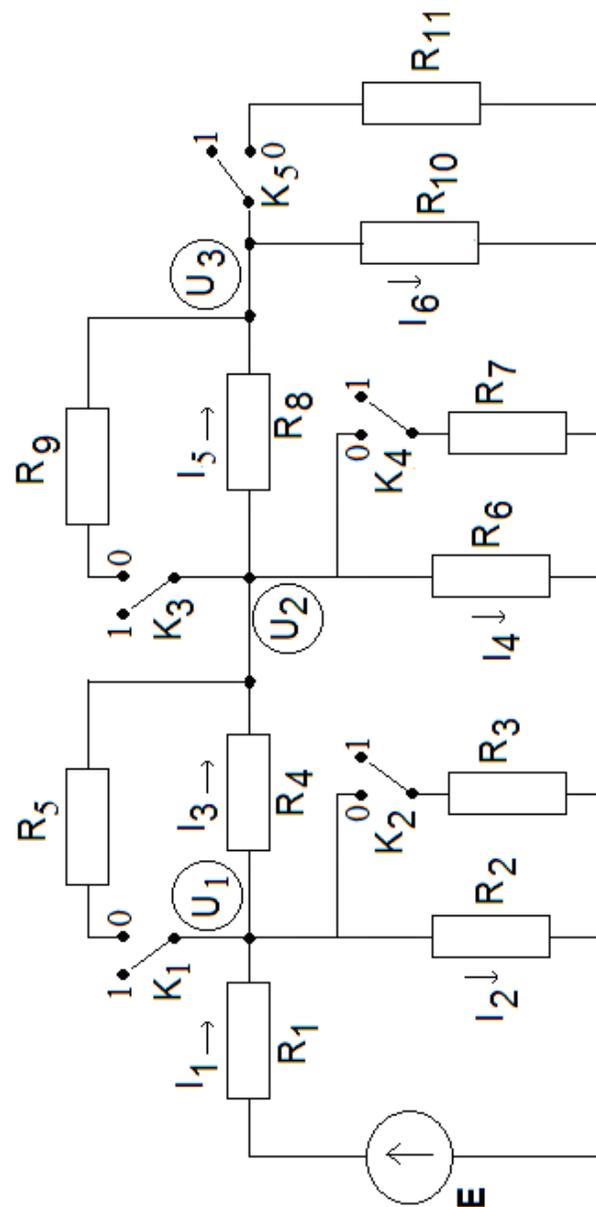


Рис. 8.

Таблица 1

Величина	I_1 , мкА	I_2 , мкА	I_3 , мкА	I_4 , мкА	I_5 , мкА	I_6 , мкА
MicroCAP						
WorkBench						
Расчет по закону Ома						
Номер ответа в АКООС (Тема 25)	1	2	3	4	5	6

4. С помощью закона Ома рассчитайте обозначенные на рис. 8 токи I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 и I_6 , полученные значения в микроамперах внесите в табл. 1 и в АКООС, тема 25, согласно табл. 1.

5. Запишите систему уравнений метода узловых напряжений, решите ее в программе MathCAD и вычислите значения напряжений U_1 , U_2 и U_3 . Их значения в милливольтках введите в табл. 2 и в АКООС, тема 26, согласно табл. 2.

Таблица 2

Величина	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_3 , мВ	P_2 , мкВт	P_6 , мкВт	P_{10} , мкВт
Результаты						
Номер ответа в АКООС (Тема 26)	1	2	3	4	5	6

6. В программе MicroCAP определите мощности P_2 , P_6 , и P_{10} , выделяемые в сопротивлениях R_2 , R_6 , R_{10} соответственно. Их значения в микроваттах внесите в табл. 2 и в АКООС, тема 26, согласно табл. 2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ГАРМОНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ТОК В ЭЛЕМЕНТАХ ЦЕПИ R, L, C И ИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ

Цель работы - изучить взаимосвязь гармонических токов и напряжений в элементах цепи и их последовательном соединении.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Подключите к плате исследуемой цепи (рис. 9) источник напряжения, вольтметр, микроамперметр, коммутатор. Кривыми линиями на рис. 9 показаны соединительные провода с однополюсными вилками. Соедините со стендом генератор АНР 1001 и осциллограф. Откалибруйте измерительные приборы, подготовьте их к измерениям.

На выходе генератора установите такое напряжение, чтобы ток в цепи был равен 1 мА.

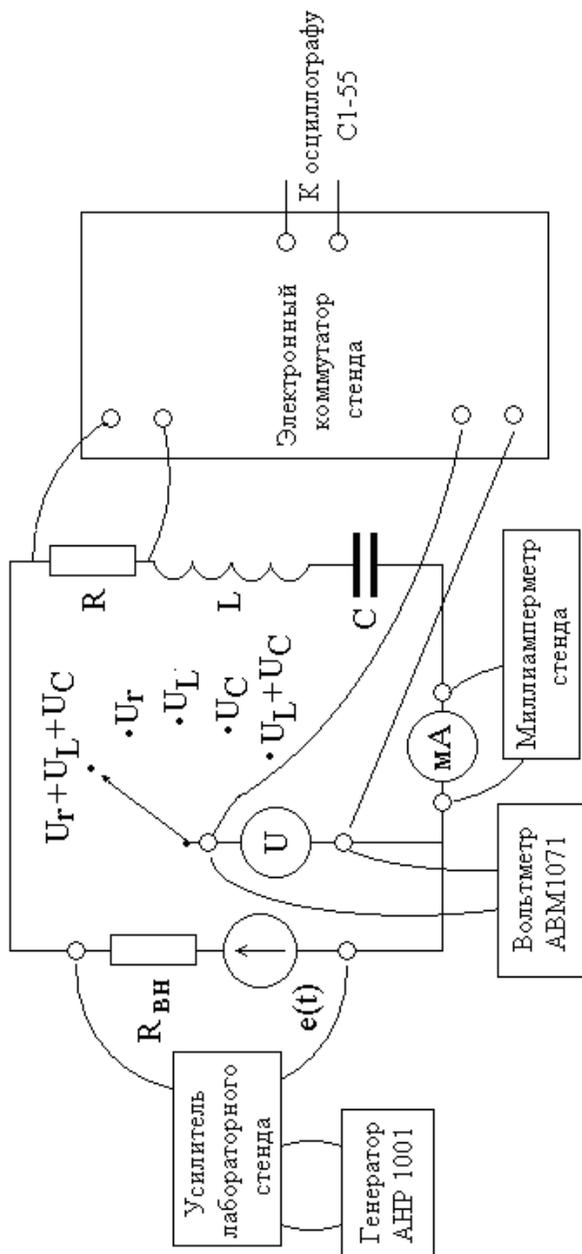
Переключатель режимов синхронизации лабораторного стенда установите в положение синхронизации от блока усилителя «БУ» Запишите значения параметров цепи, указанные на плате.

2. На частоте $f_1 = 40$ кГц вычислите реактивные сопротивления емкости X_C , индуктивности X_L и полное сопротивление последовательной RLC цепи Z . Результаты расчета внесите в табл. 3.

Таблица 3

Сопротивления элементов цепи

R, Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	Z, Ом



3. Измерьте напряжения и ток в цепи.

3.1. Устанавливая переключатель вольтметра на сменной панели стенда поочередно в положения U_R , U_L , U_C , $U_R+U_L+U_C$, измерьте соответствующие напряжения и ток в цепи I . Результаты занесите в табл. 4.

Таблица 4

Ток и напряжения в цепи

Величина	I , мА	U_R , В	U_L , В	U_C , В	U , В	$U_{\text{выч}}$, В	δ , %
Измерения							
Расчет						-	-

3.2. Вычислите, исходя из измеренных значений U_R , U_L , U_C и занесите в табл. 4 значение напряжения $U_{\text{выч}}$ на последовательном соединении элементов R, L, C . Сопоставьте U и $U_{\text{выч}}$, определите относительную погрешность $\delta = |U_{\text{выч}} - U| / U$. Если ошибка превышает 15-20 %, уточните результаты измерений.

3.3. Для **измеренного общего напряжения** U и известных сопротивлений элементов цепи (табл. 3) вычислите значения тока I , напряжений на элементах цепи U_R , U_L , U_C и внесите их в табл. 2. Сравните результаты расчетов и измерений.

3.4. По величинам U и I определите полное сопротивление цепи $Z_{\text{изм}}$ и сопоставьте его с вычисленным значением Z из табл. 3. Определите относительную погрешность определения сопротивления $\delta_z = |Z - Z_{\text{изм}}| / Z_{\text{изм}}$.

4. Измерьте фазовые соотношения между гармоническими колебаниями в цепи.

4.1. Переключатель **установите** в положение « $U_R+U_L+U_C$ ».

4.2. Подайте на входы коммутатора напряжений опорный сигнал (напряжение источника U) и напряжение на резисторе U_R . Осциллограф подключите к выходу коммутатора и установите **режим внешней синхронизации** от блока усилителей БУ. Получите устойчивое изображение на экране двух гармонических колебаний, сдвинутых во времени.

Разберитесь, какой осциллограмме соответствует напряжение U , а какой U_R . Измерьте по экрану период колебаний T и сдвиг во времени Δt_R напряжения U_R относительно U , определите знак Δt_R (если U_R опережает по фазе U , то величина Δt_R отрицательна, а иначе положительна).

Определите сдвиг фаз φ_R между U_R и U по формуле

$$\varphi_R = -\omega \times \Delta t_R.$$

Результат занесите в табл. 5.

4.3. Вместо U_R подайте на вход коммутатора напряжение на индуктивности U_L и аналогично предыдущему измерьте смещение по времени Δt_L и сдвиг фаз φ_L между U_L и U . Результат внесите в табл. 5.

Таблица 5

Фазовые соотношения

Сдвиг фаз	φ_R , рад	φ_L , рад	φ_C , рад
Эксперимент			
Расчет			

4.4. Аналогично вместо U_L подайте на вход коммутатора напряжение на емкости U_C , измерьте смещение по времени Δt_C и сдвиг фаз φ_C между U_C и U , запишите полученное значение в табл. 5.

4.5. Используя значения сопротивлений в табл. 3, проведите **расчет** сдвигов фаз φ_R , φ_L , φ_C между напряжениями на элементах и общим напряжением цепи, результаты занесите в табл. 3. Сравните результаты.

29

4.5. Полагая начальную фазу источника напряжения рав-

ной нулю, определите по результатам измерений из табл. 5 начальные фазы тока ψ_i в цепи и напряжений на резисторе ψ_R , катушке индуктивности ψ_L и конденсаторе ψ_C . Занесите их в табл. 6.

Таблица 6

Начальные фазы колебаний

ψ_e , рад	ψ_i , рад	ψ_R , рад	ψ_L , рад	ψ_C , рад
0				

4.6. По результатам измерений определите сдвиг фаз φ между общим напряжением и током в цепи.

4.7. Проанализируйте полученные результаты. При больших (более 15-20 %) погрешностях повторите измерения.

5. По результатам измерений в пунктах 3 и 4 с помощью линейки и транспортира постройте векторную диаграмму тока I и напряжений U_R , U_L , U_C , U . Сложите графически векторы U_R , U_L и U_C . Сравните результат с вектором U .

6. Тремя способами вычислите среднюю мощность, потребляемую цепью от источника:

P_1 - по величинам напряжения U и тока I с учетом сдвига фаз между ними;

P_2 - по величине тока I и значениям сопротивлений элементов цепи;

P_3 - по значениям напряжений на элементах и их сопротивлениям.

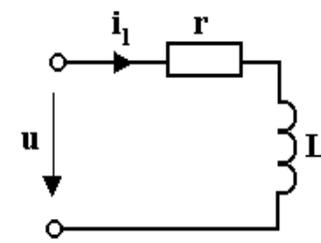
Определите среднее значение потребляемой мощности

$$P_{cp} = (P_1 + P_2 + P_3) / 3.$$

Результаты занесите в табл. 7.

30

Если возникают значительные погрешно-



сти, проанализируйте возможные причины.

Таблица 7

Потребляемая мощность

P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_3 , Вт	$P_{ср}$, Вт

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

7. Увеличьте частоту источника до $f_2=80$ кГц. Изменяя уровень сигнала источника, добейтесь, чтобы ток в цепи остался прежним.

Измерьте напряжение U на последовательном соединении и сдвиг фаз φ между напряжением и током в цепи. По результатам измерений вычислите модуль полного сопротивления цепи Z и потребляемую мощность P . Результаты занесите в табл. 8 и сравните с полученными ранее на частоте f_1 .

Таблица 8

Результаты измерений на частоте f_2

I мА	U В	φ рад	Z Ом	P Вт

8. При экспериментальном значении напряжения цепи U из табл. 8 на частоте 80 кГц проведите **расчет** сопротивления цепи Z , тока I , сдвига фаз φ и мощности P . Сравните результаты расчета и эксперимента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

1. В цепи (рис.10) с параметрами $r = 5$ Ом и $L = 27,5$ мГн действует напряжение $u = 100\cos(314t + 30^\circ)$ В. Определите ток $i(t)$.

Рис. 10

Ответ: $i = 10\cos(314t - 30^\circ)$ А.

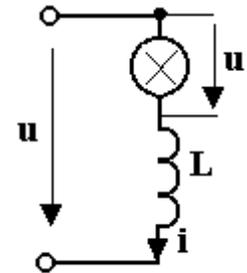


Рис. 11

2. Амплитуда общего напряжения $U_m = 100$ В, частота $f = 50$ Гц, но осветительная лампа рассчитана на напряжение $U_{m1}=40$ В, при котором она потребляет ток $I_m=0,2$ А (рис. 11).

Определите необходимую индуктивность L .

Ответ: $L = 1,46$ Гн.

3. При разомкнутом ключе ток i_1 в цепи на рис. 12 опережает по фазе приложенное напряжение u на угол $\varphi = 45^\circ$. Какова величина угла φ при замкнутом ключе?

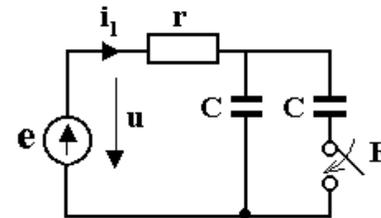


Рис. 12

Ответ: $\varphi = - 26^\circ 34'$.

4. В цепи на рис. 13 напряжение $u = 120\cos 2\pi \cdot 10^3 t$ В, амплитуды токов $I_{m1} = 15$ А, $I_{m2} = 8$ А. Определите амплитуду общего тока I_m , полную проводимость цепи Y и сдвиг фаз между общим напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

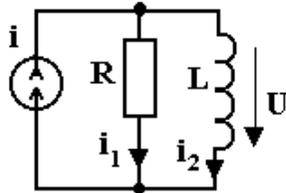


Рис. 13

Ответ: $I_m = 17$ А; $Y = 0,142$ Сим; $\varphi = 28^\circ$.

5. К реальному источнику напряжения с ЭДС (рис. 14)

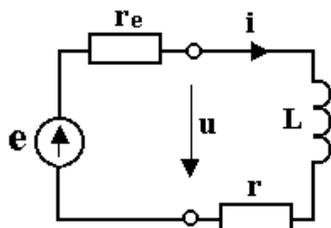


Рис. 14

с ЭДС (рис. 14) $e(t) = 50\cos 10^6 t$ В и внутренним сопротивлением $r_e = 425$ Ом подключено последовательное соединение из элементов $L = 1$ мГн и $r = 575$ Ом. Определите ток $i(t)$ и напряжение $u(t)$.

Ответ: $i(t) = 35,5\cos(10^6 t - \pi/4)$ мА,
 $u(t) = 40,9\cos(10^6 t + 15^\circ)$ В.

6. На какой частоте ω сопротивление показанной на рис. 15 цепи имеет активный характер.

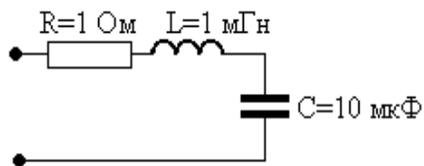


Рис. 15

Ответ: $\omega = 10^4$ рад/с.

7. В показанной на рис. 16 цепи определите сдвиг фаз φ между напряжением на индуктивности $u_L(t)$ и емкости $u_C(t)$.

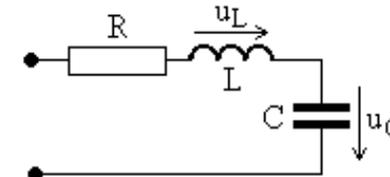


Рис. 16

Ответ: $\varphi = 180^\circ$.

8. На каком из рисунков на рис. 17 показаны временные диаграммы тока и напряжений на элементах в показанной на рис. 18 цепи.

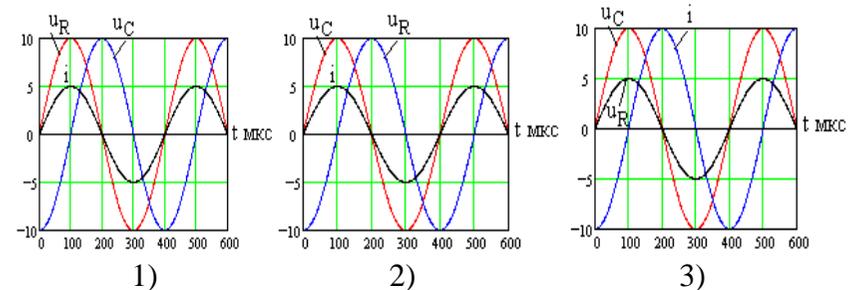


Рис. 17

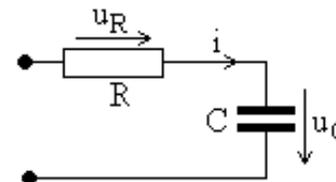


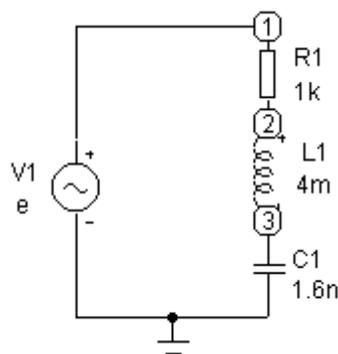
Рис. 18

Ответ: 1.

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Цель работы - изучить гармонические токи и напряжения в линейной цепи и методы их расчета.

1. В программе MicroCAP проведите схемотехническое моделирование цепи из предыдущей лабораторной работы №3



те в

Рис. 19.

при использованных в ней параметрах элементов на частоте 40 кГц. Пример модели приведен на рис. 19.

Задайте установленные в лабораторной работе №3 амплитуду и частоту источника гармонического сигнала. Определите ток и напряжения на элементах цепи, результаты занесите в табл. 9. Опишите

отчете ход моделирования.

Таблица 9

Величина	I, мА	U _R , В	U _L , В	U _C , В	U, В	U _{ВЫЧ} , В
Моделирование						
Расчет						
Измерения						

По результатам моделирования вычислите общее напряжение U_{ВЫЧ}, сравните его с U. При заданном общем напряжении вычислите ток I и напряжения U_R, U_L, U_C, результаты внесите в табл. 9.

В табл. 9 запишите результаты измерений, полученные в ходе лабораторной работы №3, проведите их сравнительный анализ.

2. Повторите исследования по пункту 1 в программе WorkBench, определяя ток и напряжения с помощью моделей измерительных приборов. Заполните таблицу, аналогичную табл. 9. Сравните результаты. Какие значения гармонических сигналов определяются по временным диаграммам и с помощью измерительных приборов, чем они отличаются?

Опишите модель и ее результаты.

3. В программе MicroCAP в режиме AC Analysis исследуйте амплитудные и фазовые соотношения для цепи на рис. 19 в диапазоне частот от 10 кГц до 100 кГц.

Рассмотрите амплитудночастотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики для тока и каждого из напряжений U_R, U_L, U_C в цепи. Приведите их в отчете, объясните вид полученных зависимостей, сравните с ними экспериментальные результаты на частоте 40 кГц.

4. В программе MicroCAP в режиме AC Analysis проанализируйте зависимость от частоты мощности P, потребляемой цепью от источника в режиме AC Analysis,

$$P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos(\varphi),$$

где I_m и U_m - амплитуды тока и напряжения цепи, а φ - сдвиг фаз между ними. Учтите, что начальная фаза напряжения источника принята равной нулю и функция ph(i) возвращает начальную фазу тока i(t) в градусах, а функция cos(x) требует значения аргумента x в радианах. Приведите в отчете полученные графики, дайте физическое и математическое объяснение результатов моделирования, рассмотрите влияние изменения параметров элементов.

5. В программе WorkBench проведите схемотехническое моделирование параллельного соединения тех же элементов, что и в цепи на рис. 19, но с источником тока I_0 . Пример показан на рис. 20.

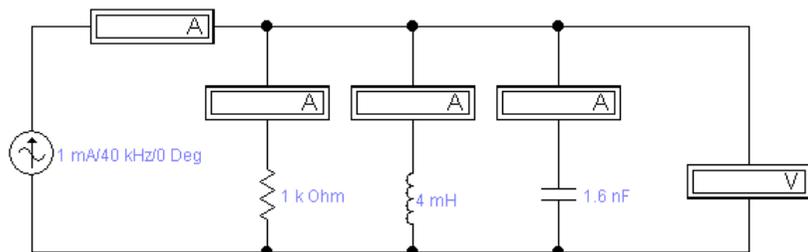


Рис. 20.

Внесите в табл. 10 значения общего тока I_0 , токов в сопротивлении I_R , индуктивности I_L , емкости I_C и общего напряжения U . По значениям I_R , I_L и I_C вычислите общий ток $I_{\text{выч}}$, занесите его в табл. 10, сделайте выводы.

Таблица 10

Величина	I_0 , мА	I_R , мА	I_L , мА	I_C , мА	U , В	$I_{\text{выч}}$ мА
Моделирование						
Расчет						

При выбранном общем токе I_0 рассчитайте токи I_R , I_L , I_C и общее напряжение U , запишите результаты в табл. 10, сделайте выводы.

6. В программе WorkBench рассмотрите временные диаграммы токов и напряжения, определите сдвиги фаз между ними, запишите полученные результаты, сделайте выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ И ТЕОРЕМА ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОМ ИСТОЧНИКЕ

Цель работы - экспериментальная проверка применимости метода (принципа) наложения и теоремы об эквивалентном источнике.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Подключите генератор к блоку усилителей стенда и осциллограф к электронному коммутатору. Установите уровень сигнала генератора 0,3-0,6 В на частоте 40 кГц. Соедините с платой (рис. 21) источник напряжения (тумблер Т1 поставьте в положение 2), и с помощью вольтметра установите его напряжение равным 3-5 В.

Соедините с платой источник тока, тумблер Т2 поставьте в положение 2, подключите миллиамперметр и установите ток источника равным 0,5-1 мА. Начальную фазу источника тока выберите по собственному усмотрению, установив переключатель в нижней части БУ стенда в положение “ ψ ” или “ $\psi+\pi$ ”, где ψ - начальная фаза источника напряжения.

2. Проверьте применимость метода (принципа) наложения.

2.1. К исследуемой цепи, схема которой показана на рис. 19 (переключатель ТЗ - замкнут), подключите источники тока (тумблер Т2 - в положении 1) и напряжения (тумблер Т1 - в положении 1).

Измерьте вольтметром напряжение на конденсаторе U_C . На один из входов коммутатора подайте сигнал от источника напряжения, на другой вход - напряжение на конденсаторе, и определите сдвиг фаз между ними.

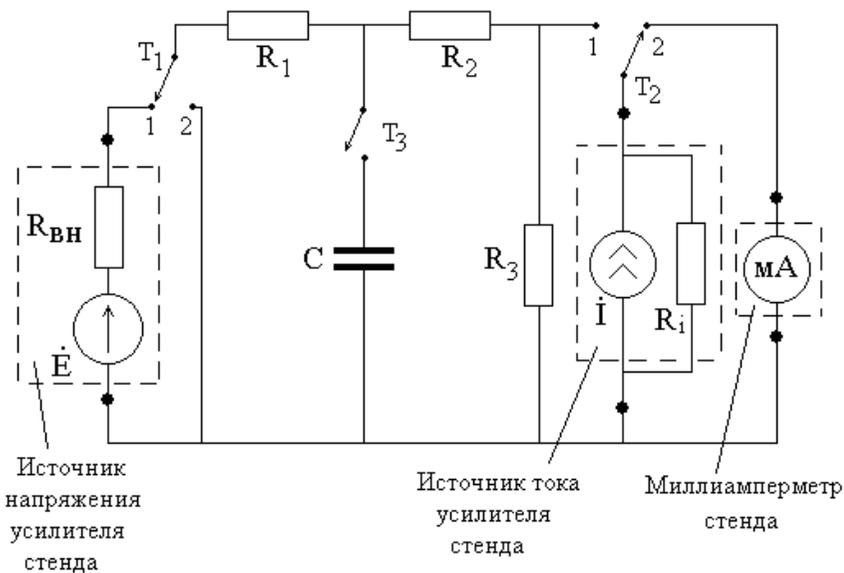


Рис. 21. Схема исследуемой цепи

Полагая начальную фазу напряжения источника равной нулю, найдите начальную фазу напряжения на конденсаторе ψ_C . Результаты занесите в табл. 11.

Таблица 11

Результаты измерений по методу наложения

U_C , В	ψ_C , град	U_{C1} , В	ψ_{C1} , град	U_{C2} , В	ψ_{C2} , град	U_{CP} , В	ψ_{CP} , град

2.2. Отключите от исследуемой цепи источник тока, установив переключатель T2 в положение 2. Источник напряжения оставьте включенным в цепь и измерьте создаваемое им напряжение U_{C1} на конденсаторе.

Аналогично предыдущему определите его начальную фазу ψ_{C1} . Результаты запишите в табл. 11.

2.3. Отключите от цепи источник напряжения (тумблер T1 - в положении 2) и включите источник тока (тумблер T2 - в положении 1). Как и в пункте 2.2, измерьте напряжение на конденсаторе U_{C2} , создаваемое источником тока, и его начальную фазу ψ_{C2} , результаты внесите в табл. 11.

2.4. Сложите измеренные напряжения на конденсаторе, создаваемые отдельно источниками напряжения и тока. Суммарное напряжение U_{CP} и его начальную фазу ψ_{CP} запишите в табл. 11.

Сравните результаты расчета и эксперимента. Если погрешность превышает 15-20 %, повторите измерения.

3. Проверьте применимость теоремы об эквивалентном источнике напряжения.

3.1. Подключите к исследуемой цепи оба источника (оба тумблера T1 и T2 - в положении 1). В табл. 12 занесите измеренные в пункте 2.1 значения напряжения на конденсаторе U_C и его начальной фазы ψ_C .

Таблица 12

Результаты измерений по теореме об эквивалентном источнике

U_C , В	ψ_C , (°)	U_{xx} , В	ψ_{xx} , (°)	$I_{кз}$, мА	$R_э$, Ом	U_{CP} , В	ψ_{CP} , (°)

3.2. Тумблером T3 отключите конденсатор от исследуемой цепи. Измерьте напряжение холостого хода U_{xx} в точках подключения конденсатора и его начальную фазу ψ_{xx} . Затем к тем же точкам подключите микроамперметр и измерьте ток короткого замыкания $I_{кз}$. Отключите от цепи оба источника (тумблеры T1 и T2 - в положении 2) и прибором ВЗ-26 определите внутреннее сопротивление $R_э$ полученной пассивной резистивной цепи. Результаты внесите в табл. 12.

3.3. Рассчитайте величину внутреннего сопротивления

$R_{эп} = U_{хх} / I_{кз}$, сравните ее с $R_э$. По измеренным параметрам эквивалентного источника $U_{хх}$ и $R_э$ по теореме вычислите напряжение на конденсаторе $U_{ср}$ и его начальную фазу $\psi_{ср}$.

Результаты запишите в табл. 12 и сравните их с измеренными величинами. При возникновении больших погрешностей уточните измерения.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

4. По известным значениям параметров цепи и установленным уровням сигналов источников рассчитайте напряжение на конденсаторе при включении каждого из источников в отдельности. Методом наложения определите напряжение на конденсаторе при действии двух источников. Сравните результаты расчета и эксперимента.

5. При тех же условиях рассчитайте параметры эквивалентного источника напряжения и по теореме определите напряжение на конденсаторе. Сравните расчетные и экспериментальные значения.

6. Проведите схемотехническое моделирование проведенных экспериментальных исследований.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

1. Для указанного преподавателем варианта N из табл. 13 выберите номер рисунка схемы цепи и искомый ток, который определите методом наложения.

2. Для выбранного варианта N по теореме об эквивалентном источнике напряжения рассчитайте ток, заданный табл. 13 для соответствующей схемы цепи.

3. Повторите задание с использованием теоремы об эквивалентном источнике тока.

N	Рис.	Найти ток	N	Рис.	Найти ток	N	Рис.	Найти ток
1	22.а	\dot{I}_{m2}	5	22.г	\dot{I}_{m2}	8	22.д	\dot{I}_{m4}
2	22.а	\dot{I}_{m4}	6	22.г	\dot{I}_{m4}	9	22.е	\dot{I}_{m2}
3	22.б	\dot{I}_{m2}	7	22.д	\dot{I}_{m1}	10	22.е	\dot{I}_{m4}
4	22.в	\dot{I}_{m3}						

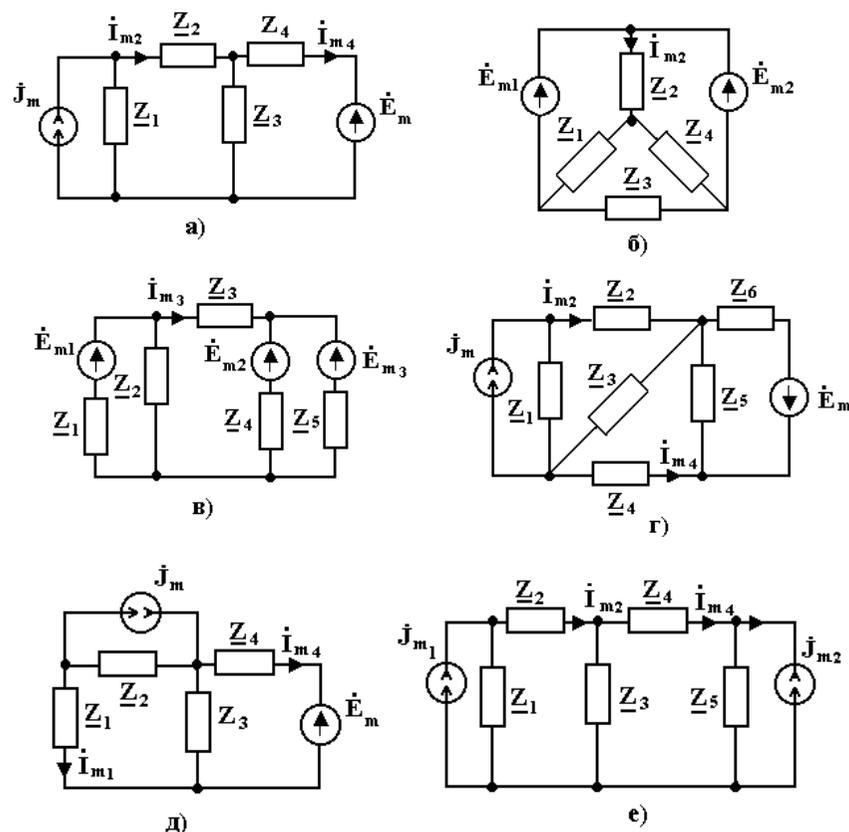


Рис. 22

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Цель работы - изучить резонансные и частотно-избирательные свойства и характеристики последовательного колебательного контура.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Подключите к сменной плате исследуемой цепи, схема которой показана на рис. 23, источник напряжения и миллиамперметр. Соедините генератор с входом блока усилителей стенда. Установите тумблер T1 в положение 2 и тумблер T2 в положение 1.

Все измерения проводите при подключенном к емкости контура вольтметре ВК7-26.

Изменяя частоту генератора в интервале 120-150 кГц, добейтесь максимального тока в контуре при постоянном уровне входного сигнала. Установите на выходе источника напряжения усилителя стенда уровень сигнала, при котором максимальный ток в контуре будет не более 5 мА.

2. Измерьте резонансную частоту контура.

Отключите добавочное сопротивление R1 (тумблер T1 установите в положение 2) и сопротивление нагрузки R2 (тумблер T2 - в положение 1). Изменяя частоту генератора, добейтесь максимального тока в контуре, сохраняя постоянным уровень входного сигнала. По шкале генератора определите значение резонансной частоты f_0 .

3. Исследуйте зависимость от частоты тока и входного сопротивления последовательного колебательного контура.

Не меняя положение тумблеров T1 и T2, измерьте ток в цепи при неизменном входном напряжении на частотах от $0,9f_0$ до $1,1f_0$ с шагом **не более 1 кГц** (всего 20-30 точек).

43

Определите абсолютную расстройку контура на каждой из

частот. Результаты занесите в табл. 14 с соответствующим числом столбцов.

По результатам измерений вычислите входное сопротивление контура на каждой из частот и запишите полученные значения в табл. 14. Постройте графики зависимостей $I(\Delta f)$ и $Z(\Delta f)$. Проанализируйте полученные результаты.

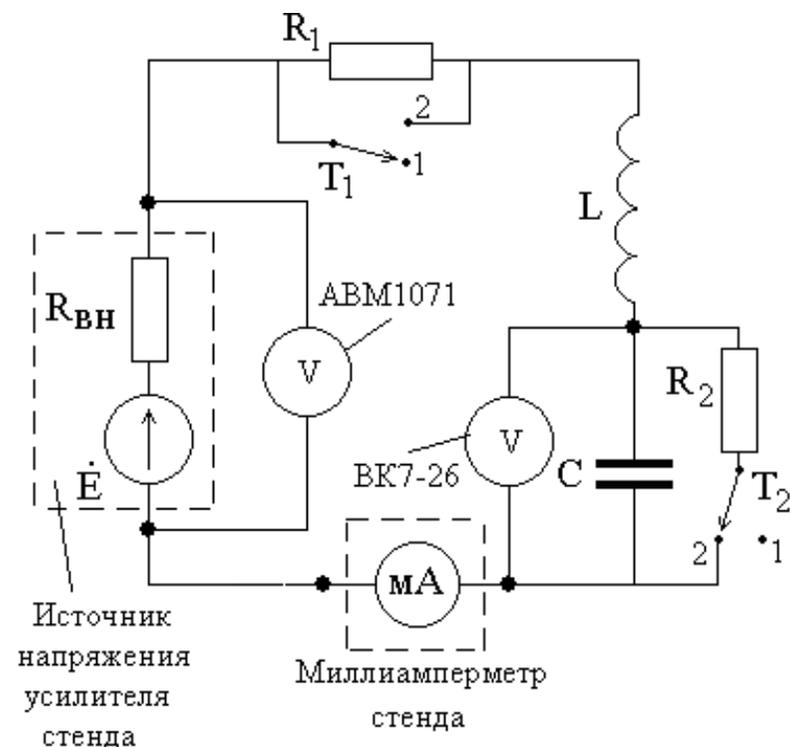


Рис. 23. Схема исследуемой цепи

Из табл. 10 и графика $Z(\Delta f)$ определите сопротивление потерь колебательного контура r . Чем оно обусловлено, от чего зависит?

44

Таблица 14

Зависимость от частоты тока и сопротивления контура

F, кГц					
Δf , кГц					
$U_{вх}$, В					
I, мА					
Z, Ом					

4. Изменяя, как и в предыдущем случае, частоту генератора, снимите амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) контура - зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ от абсолютной расстройки Δf при неизменном уровне входного напряжения $U_{вх}$.

По данным эксперимента вычислите коэффициент передачи $H=U_{вых}/U_{вх}$. Результаты занесите в табл. 15.

Обратите внимание на то, что подключение вольтметра к выходу контура (к конденсатору) изменяет резонансную частоту по сравнению с предыдущим значением. Это обусловлено влиянием паразитной входной емкости прибора (20-40 пФ).

Постройте график АЧХ $H(\Delta f)$ и определите полосу пропускания Π и добротность Q контура. Результаты запишите в табл. 16.

Таблица 15

Амплитудно-частотная характеристика контура

F, кГц					
Δf , кГц					
$U_{вх}$, В					
$U_{вых}$, В					
H					
$H_{расч}$					
ΔH					

5. Рассчитайте теоретически зависимость $H(\Delta f)$ (через

обобщенную расстройку), используя экспериментальные значения резонансной частоты f_0 и полосы пропускания Π .

Определите погрешность $\Delta H=H_{расч}-H$. Результаты внесите в табл. 15. На построенный ранее график АЧХ нанесите расчетную кривую. Сравните результаты.

6. Исследуйте влияние добавочного сопротивления потерь R_1 контура на его добротность методом "трех отсчетов". Для этого тумблер T_1 установите в положение 1 (T_2 остается в положении 1), вольтметр подключите к емкости контура.

Изменяя частоту генератора, настройтесь в резонанс и измерьте резонансное выходное напряжение $U_{рез}$. Определите величину выходного напряжения на границе полосы пропускания $U_{гр}=U_{рез}/\sqrt{2}$.

Уменьшая частоту генератора относительно резонансной, добейтесь, чтобы вольтметр показывал напряжение, равное $U_{гр}$. По шкале генератора определите нижнее значение частоты на границе полосы пропускания f_{min} . Затем, увеличивая частоту, аналогично определите верхнюю частоту на границе полосы пропускания f_{max} .

Не забывайте контролировать постоянство входного напряжения при всех измерениях. Полоса пропускания контура с добавочным сопротивлением равна

$$\Pi_{доб}=f_{max} - f_{min} .$$

Определите добротность контура $Q_{доб}$ с добавочным сопротивлением. Результаты внесите в табл. 16.

Таблица 16

Полоса пропускания и добротность контура

Π , кГц	Q	$\Pi_{доб}$, кГц	$Q_{доб}$	$\Pi_{н.}$, кГц	$Q_{н}$

7. Аналогично предыдущему методом трех отсчетов

определите влияние на добротность контура сопротивления нагрузки, подключенного к конденсатору. Для этого тумблер T_1 переведите в положение 2 (добавочное сопротивление отключено), а тумблер T_2 - в положение 2 (подключено сопротивление нагрузки R_2). Измерьте граничные частоты полосы пропускания, определите полосу пропускания Π_n и добротность контура Q_n .

Результаты запишите в табл. 16, сравните результаты.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

8. По данным эксперимента определите паразитную емкость вольтметра, используя изменение резонансной частоты по максимуму тока в контуре при отключении и подключении вольтметра ВК7-26 к емкости контура.

9. С помощью двухлучевого осциллографа снимите фазочастотную характеристику коэффициента передачи контура. Для этого один вход осциллографа подключите на вход контура (к источнику напряжения), а второй - к выходу (к емкости) контура. Изменяя частоту генератора в окрестности резонанса, как это делалось в пункте 4, установите устойчивое изображение двух гармонических колебаний и определите сдвиг фаз между ними.

Постройте график зависимости сдвига фаз между выходным и входным сигналами от абсолютной расстройки. Проведите те же измерения с включенным добавочным сопротивлением, сравните результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

1. Рассчитайте комплексный коэффициент передачи, АЧХ и ФЧХ четырехполюсников, схемы которых показаны на

47

рис. 24, постройте их графики.

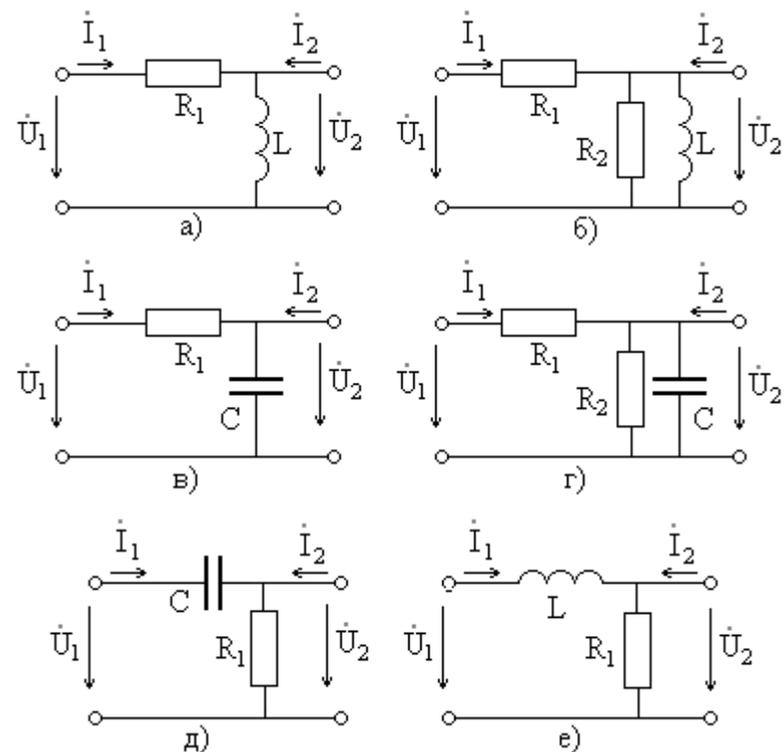


Рис. 24

2. Определите полосу удержания четырехполюсников на рис. 24а, рис. 24б и рис. 24д.

3. Определите полосу пропускания четырехполюсников на рис. 24в, рис. 24г и рис. 24е.

4. Рассчитайте коэффициент прямоугольности четырехполюсников на рис. 24.

5. По данным, приведенным в табл. 17, определите граничные частоты полосы пропускания последовательного колебательного контура с параметрами L , C , r , резонансной частотой f_c и добротностью Q .

Таблица 17

Вариант	L мкГн	C пФ	r Ом	f_0 МГц	Q
1	180	-	15	1,5	-
2	-	200	12	1	-
3	140	80	15	-	-
4	200	-	10	-	80
5	-	160	8	-	60
6	150	-	14	-	30
7	100	120	-	-	50
8	140	-	6	1,5	-
9	-	150	18	2	-
10	-	180	12	-	40

6. Определите эквивалентную добротность последовательного колебательного контура из задачи 5 при подключении к его емкости сопротивления нагрузки $R_H = 50$ кОм.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7 СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЦЕПЕЙ

1. В программе MicroCAP исследуйте частотные характеристики последовательного колебательного контура, показанного на рис. 25 при $r = 20 + 10 \cdot \sin(N + G)$ Ом, $L = 2 + \cos(N + G)$ мГн и $C = 1 + 0,2 \cdot \sin(N + G)$ нФ (аргументы тригонометрических функций – в радианах).

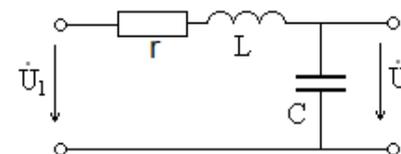


Рис. 25

Определите резонансную частоту f_0 контура в **килогерцах**, введите полученное значение в АККОС, тема 27, ответ 1.

Найдите максимум АЧХ и внесите его в АККОС, тема 27, ответ 2. По АЧХ определите полосу пропускания контура, полученное значение в **герцах** введите в АККОС, тема 27, ответ 3

Увеличьте сопротивление потерь r и индуктивность L в два раза и по АЧХ определите резонансную частоту f_0 контура в **герцах**, максимум АЧХ и полосу пропускания в **герцах** (результаты введите в АККОС, тема 27, ответы 4, 5 и 6 соответственно).

2. В программе WorkBench проведите моделирование частотных фильтров, схемы которых показаны на рис. 26а (полосовой фильтр) и рис. 26б (режекторный фильтр). Параметры контура указаны в п. 1 и $R = [7 + 5 \cdot \sin(N + G)]$ кОм

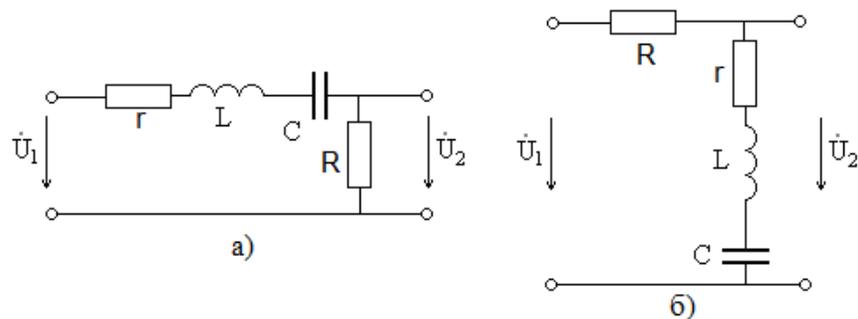


Рис. 26

Приведите графики АЧХ, максимум АЧХ в цепи рис. 25а и минимум АЧХ в цепи рис. 25б, **умноженные на 10000**, введите в АККОС, **тема 28, ответы 1 и 2 соответственно**.

Рассмотрите влияние сопротивлений r и R на форму АЧХ, приведите в отчете необходимые кривые.

3. Проведите **расчет** в координатах обобщенной расстройки АЧХ цепи рис. 26а для четных номеров студента N или рис. 26б для нечетных N . Преобразуйте полученные формулы в координаты частоты f , постройте график, сравните его с результатами моделирования.

4. В программе MicroCAP получите частотные характеристики резонансных цепей, показанных на рис. 27.

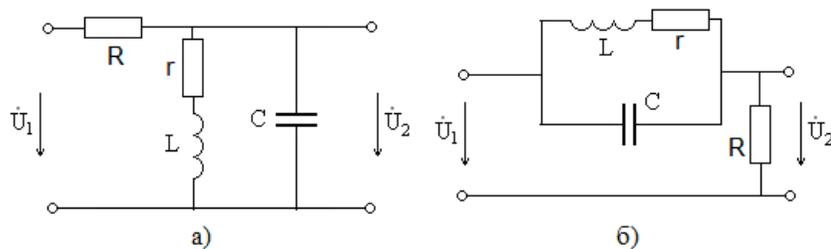


Рис. 27

Параметры элементов приведены в п. 1 и п. 2.

Представьте в отчете графики АЧХ, максимум АЧХ в цепи рис. 27а и минимум АЧХ в цепи рис. 27б, **умноженные на 1000**, введите в АККОС, **тема 28, ответы 3 и 4 соответственно**.

Рассмотрите влияние сопротивлений r и R на форму АЧХ, приведите в отчете необходимые кривые.

5. В программе MicroCAP проведите моделирование зависимости **от частоты** амплитуды напряжения U на сложном параллельном колебательном контуре, показанном на рис. 28, при:

$$r_1 = [40 + 10 \cdot \sin(N + G)] \text{ Ом}, \quad r_2 = [20 + (N + G)/5] \text{ Ом}$$

$$L_1 = [2 + \cos(N + G)] \text{ мГн}, \quad L_2 = [1 - 0,5 \cdot \cos(N + G)] \text{ мГн},$$

$$C = 1 + 0,2 \cdot \sin(N + G) \text{ нФ} \text{ и } I_0 = 1 \text{ мА}$$

(аргументы тригонометрических функций – в радианах).

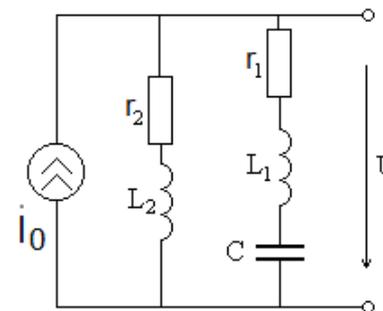


Рис. 28

Представьте в отчете график, **максимум** напряжения U_{MAX} **на контуре** в милливольтках введите в АККОС, **тема 28, ответ 5**. Рассчитайте это напряжение, сравните результаты.

Проведите моделирование зависимости **от частоты** амплитуды тока емкости I_C , его **резонансное** значение в микроамперах введите в АККОС, **тема 28, ответ 6**.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Цель работы: исследование связи формы и параметров периодических сигналов с их амплитудными и фазовыми спектрами.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рабочее окно программы для исследования спектров периодических сигналов показано на рис. 29. В его верхней части изображается временная диаграмма исследуемого сигнала, а в нижней – спектры амплитуд и фаз. Рабочее разрешение экрана 800×600 пиксель.

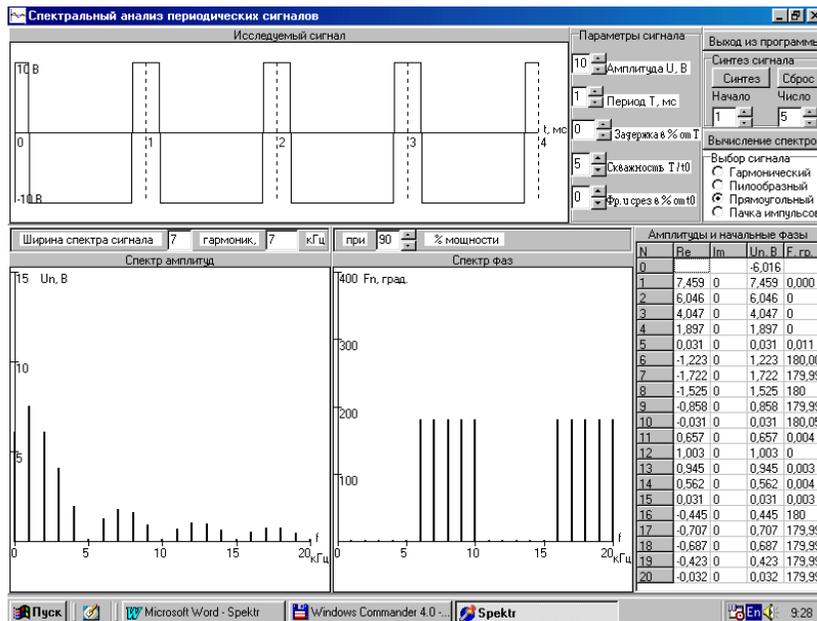


Рис. 29

В правом верхнем углу расположена панель управления

программой. На ней расположен переключатель для выбора сигналов и регуляторы их параметров. Все изменения немедленно отображаются на временной диаграмме.

После установки требуемых параметров нажимается кнопка «Вычисление спектров» и на графиках отображаются спектры амплитуд и фаз сигналов. Численные значения амплитуд и фаз первых двадцати гармоник выдаются в таблицу в правой нижней части экрана.

Программа обеспечивает синтез (суммирование гармоник) сигнала по его спектру. Для этого регуляторами задаются начальный номер гармоники и их количество.

Затем нажатием кнопки «Синтез» на временной диаграмме отображается полученная функция времени. Кнопкой «сброс» график очищается, и переход в режим синтеза возможен после нажатия кнопки «Вычисление спектров».

Программа определяет ширину спектра сигнала при заданном уровне мощности, регулятор которого находится в центре рабочего окна.

Регистрация результатов исследований производится копированием экрана монитора через системный буфер Windows нажатием клавиши «Print screen». После этого изображение вводится в заранее открытый файл редактора Word для формирования отчета по лабораторной работе.

Пример такого перехвата экрана показан на рис. 28.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Исследуйте спектр гармонического сигнала с амплитудой $U = 10В$, периодом $T = 1мс$ при задержке $\Delta t = 0$. Установите задержку $\Delta t = 25\%$ от периода сигнала T . Затем установите $\Delta t = -25\%$ периода.

Сравните спектры амплитуд и фаз этих трех сигналов. Проверьте свойства запаздывания и симметрии сигналов.

2. Выберите пилообразный сигнал при $U = 10В$, $T = 1мс$,

$\Delta t = 0$, исследуйте его спектры амплитуд и фаз. Обратите внимание на похожесть формы пилообразного и гармонического сигналов. Сравните их спектры.

Установите задержку $\Delta t = 25\%$ от периода. Сравните спектры смещенного и исходного сигналов, проверьте свойство (теорему) смещения.

3. Исследуйте спектры амплитуд и фаз периодической последовательности прямоугольных импульсов при исходных значениях параметров $U = 10В$, $T = 1мс$, $\Delta t = 0$, скважности сигнала $Q = T/\tau = 2$ (τ - длительность импульса) и длительности фронта $t_\phi = 0$ в процентах от τ .

Увеличьте период сигнала до $T = 2мс$. Как изменяются спектры амплитуд и фаз? Проверьте свойство изменения временного масштаба сигнала. Рассмотрите влияние на спектры амплитуд и фаз длительности импульсов, изменяя их скважность $Q = T/\tau$ от 2 до 10.

Как изменяется при этом ширина спектра при учитываемой доле мощности 90% ($Ш_{90}$) и 99% ($Ш_{99}$), значения которых внесите в табл. 18. Определите ширину спектра $Ш_0$ по положению первого нуля огибающей спектра.

Постройте графики зависимости ширины спектра от длительности импульса.

Таблица 18

Q	2	3	10
τ , мс				
$Ш_{90}$, кГц				
$Ш_{99}$, кГц				
$Ш_0$, кГц				

4. Проанализируйте спектр пачки из двух импульсов при скважности $Q = 10$ и произвольной задержке. Этот сигнал

можно рассматривать как сумму двух импульсных потоков той

же длительности (скважности) при соответствующих смещениях.

Установите эти последовательности прямоугольных импульсов в моделирующей программе, определите их спектры амплитуд и фаз. Для третьей гармоники проверьте свойство линейности спектров. Сделайте выводы. Сравните ширину спектра пачки импульсов и одиночной последовательности.

5. Установите импульсную последовательность при скважности $Q = 5$. Проведите синтез этого сигнала при числе гармоник 5, 10, и 30. Сравните результаты, сделайте выводы.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

6. Исследуйте влияние на спектры импульсных сигналов длительности их фронта и среза. Как они влияют на ширину спектра сигнала?

7. Проведите имитационное моделирование в программах MicroCAP или WorkBench спектров произвольных сигналов, например, последовательностей прямоугольных импульсов.

8. Создайте модель фильтра нижних (верхних) частот и проанализируйте изменения спектров проходящих через нее сигналов (прямоугольных импульсов).

9. Проведите численные расчеты спектров рассмотренных в лабораторной работе сигналов в программе MathCAD.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Исследуйте спектры амплитуд сигналов при прохождении последовательности прямоугольных импульсов через фильтрующие цепи. Применительно к RC фильтру нижних частот модель представлена на рис. 30.

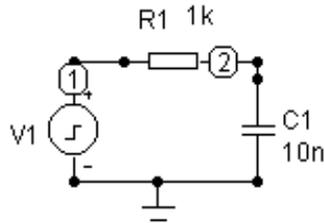


Рис. 30

Проанализируйте частотные характеристики цепи и временные диаграммы сигналов на входе и выходе.

Сравните спектры амплитуд входного и выходного сигналов, проанализируйте влияние параметров цепи, сделайте соответствующие выводы.

Объясните характер наблюдаемых спектров и их отличие от теоретического вида. Как форма спектров связана с длиной реализации сигнала, частотой квантования (этот вопрос выходит за рамки курса ОТЦ)?

Аналогично рассмотрите прохождение того же сигнала через простейший RC фильтр верхних частот и последовательный RLC колебательный контур, проведите анализ результатов моделирования. Соответствующие модели показаны на рис. 31 и 32 соответственно.

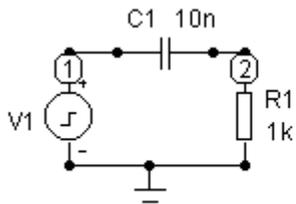


Рис. 31

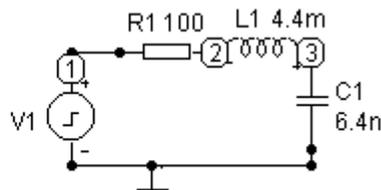


Рис. 32

Проведите исследования спектров сигналов с использованием программы MATHCAD на базе функции fft.

Функция $\text{fft}(u)$ реализует быстрое преобразование Фурье (БПФ) вида

$$S_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u_i \cdot \exp\left(j2\pi \frac{n}{N} \cdot i\right),$$

где u_i – отсчеты сигнала $u(t)$ в моменты времени $t_i=i \times \Delta t$, i – номер отсчета, Δt – интервал дискретизации сигнала по времени на периоде колебаний $T=N \times \Delta t$, $N = 2^m$ – число отсчетов на периоде сигнала (m – целое число), S_n – результат БПФ, комплексное число, определяющее n -ю гармонику сигнала.

Постоянная составляющая спектра сигнала U_0 равна

$$U_0 = \frac{S_0}{\sqrt{N}},$$

а амплитуда n -й гармоники U_n и ее начальная фаза ψ_n определяются выражениями:

$$U_n = \frac{2|S_n|}{\sqrt{N}},$$

$$\psi_n = -\arg(S_n).$$

Изменяя параметры сигнала, исследуйте их влияние на спектры амплитуд и фаз, сравните результаты с полученными с помощью пакета MICROCAP.

С помощью пакета MATHCAD рассмотрите влияние изменения амплитуд и начальных фаз гармоник последовательности прямоугольных импульсов на форму временной диаграммы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

6.1. Используя данные табл. 19, из временной диаграммы рис. 33 определите аналитическое выражение временной зависимости $u(t)$ на интервале одного периода колебаний. Рассчитайте коэффициенты ряда Фурье и постройте график спектра амплитуд для первых пяти гармоник.

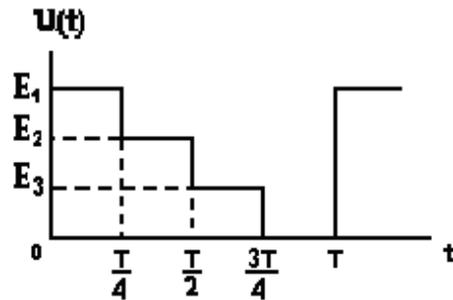


Рис. 33

Таблица 19

Вариант	E_1 В	E_2 В	E_3 В	T мс
1	20	10	0	40
2	20	0	10	20
3	10	20	0	80
4	10	0	20	40
5	-20	10	0	50
6	-20	0	10	40
7	20	20	10	20
8	10	20	10	40
9	20	10	20	50
10	10	20	20	80

6.2. Определите комплексные спектральные плотности, спектры амплитуд и фаз одиночных сигналов, показанных на рис. 34, постройте их графики.

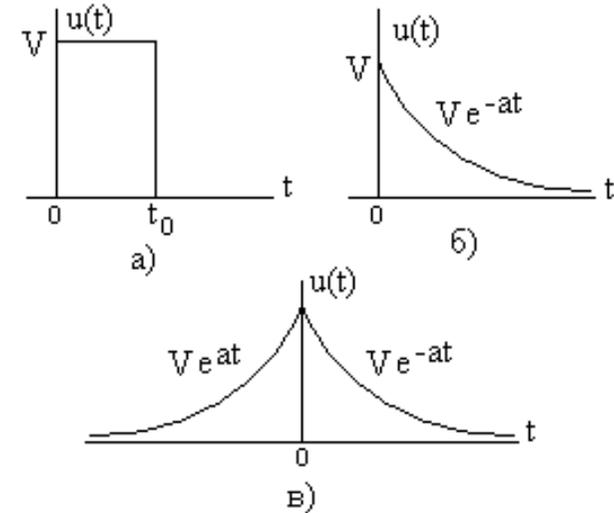


Рис. 34

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9 СВОБОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы - экспериментальное исследование свободных процессов в линейных электрических цепях.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. К исследуемой цепи, схема которой показана на рис. 35, подключите электронный ключ (ЭК), размещенный в верхней части стенда.

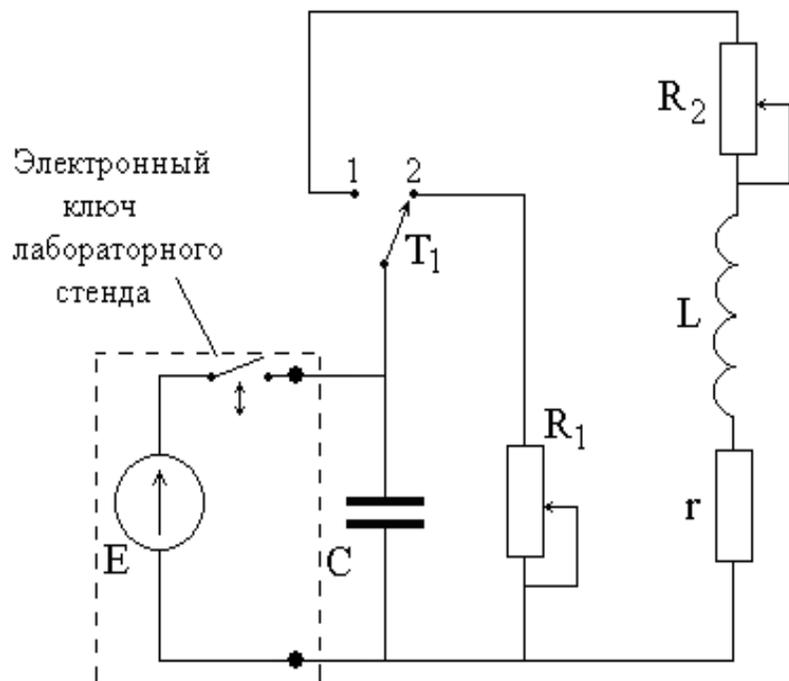


Рис. 35. Схема исследуемой цепи

2. Исследуйте свободные процессы в цепи первого порядка.

2.1. Регулятор резистора R_1 установите в крайнее правое положение (максимальное сопротивление) и **при отключенном ЭК** измерьте с помощью вольтметра В7-26 его величину. Запишите значение емкости C . Тумблер T_1 переведите в положение 2. Подключите осциллограф к емкости и при синхронизации от ЭК добейтесь устойчивого изображения свободного апериодического процесса.

2.2. Зарисуйте зависимость напряжения емкости от времени. По осциллограмме определите постоянную времени цепи τ_3 . Вычислите величину τ_p по известным R_1 и C и определите относительную погрешность δ .

Результаты занесите в табл. 20.

Таблица 20

Постоянная времени цепи

R_1 , кОм	C , пФ	τ_3 , мс	τ_p , мс	δ , %

2.3. Установите регулятор резистора R_1 в среднее положение и **при отключенном ЭК** измерьте величину сопротивления. Зарисуйте зависимость напряжения на емкости от времени. По осциллограмме вновь определите постоянную времени цепи τ_3 , вычислите величину τ_p по известным R_1 и C и определите погрешность δ . Результаты занесите в табл. 20. Сравните результаты, сделайте соответствующие выводы.

3. Исследуйте свободные процессы в последовательном колебательном контуре.

3.1. Переключатель T_1 установите в положение 1 и регулятор резистора R_2 - в крайнее левое положение (минимальное сопротивление $R_2=0$), при котором сопротивление потерь контура равно сопротивлению потерь r катушки индуктивности. Осциллограф подключите к конденсатору.

3.2. Зарисуйте осциллограмму напряжения на конденсаторе в колебательном режиме при $R_2=0$. Определите период колебаний T , частоту f , постоянную времени τ , декремент затухания D , логарифмический декремент затухания d и добротность контура Q , результаты внесите в табл. 21.

3.3. Увеличьте сопротивление R_2 так, чтобы затухание свободного процесса заметно увеличилось, а режим остался колебательным, и повторите задание по предыдущему пункту.

Таблица 21

Параметры колебательного режима

R_2 , Ом	T , мс	F , кГц	τ , мс	D	d	Q

3.4. Для двух выбранных ранее сопротивлений R_2 по измеренным значениям постоянных времени вычислите индуктивность контура L и ее сопротивление потерь r , а также постоянные времени τ_p , сравнив их с экспериментальным значением τ_3 . Определите погрешности расчета постоянных времени δ , результаты занесите в табл. 22. Сделайте выводы.

Таблица 22

Постоянная времени цепи

R_2 , Ом	L , мГн	R , Ом	τ_3 , мс	τ_p , мс	δ , %

3.5. Увеличивая сопротивление R_2 , по осциллограмме напряжения на емкости установите критический режим свободных колебаний в контуре, зарисуйте осциллограмму.

Переведите переключатель T_1 в положение 2 и измерьте сопротивление резистора $R_{2кр}$ в критическом режиме, возвратите переключатель в положение 1.

По результатам расчетов в предыдущем пункте вычислите сопротивление $R_{2кр}$ и сравните его с измеренным значением.

3.6. Установите в контуре аperiodический режим свободных колебаний и зарисуйте осциллограмму напряжения на конденсаторе. Сравните осциллограммы свободных процессов в различных режимах.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

4. В цепи рис. 34 получите **выражения** для напряжения на конденсаторе в колебательном, критическом и аperiodическом режимах. При найденных параметрах контура рассчитайте зависимости напряжения от времени, постройте графики. Сравните их с экспериментальными осциллограммами.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10 СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

1. В программе MicroCAP проведите исследование свободных процессов в цепи первого порядка, рассмотренной в лабораторной работе №9, с помощью модели, представленной на рис. 36.

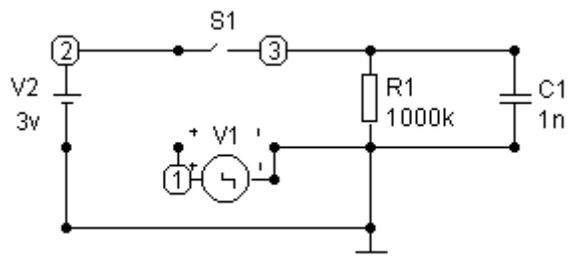


Рис. 36

Как и в лабораторной установке, в ее состав входят источник постоянного напряжения $V2$ и электронный ключ $S1$, управляемый генератором прямоугольных импульсов $V1$.

Изучите влияние на характер свободных процессов сопротивления $R1$, изменяя его от 10 кОм до 1 МОм, используя режим Stepping (5-8 кривых).

Определите постоянные времени цепи при выбранных в эксперименте значениях сопротивления $R1$ и емкости $C1$ (табл. 21).

2. Для исследования свободных процессов в цепи второго порядка - колебательном контуре - воспользуйтесь моделью, схема которой показана на рис. 37.

Рассмотрите временные диаграммы напряжений на элементах и тока цепи в **колебательном, критическом и апериодическом режимах**, изменяя сопротивление потерь $R1$.

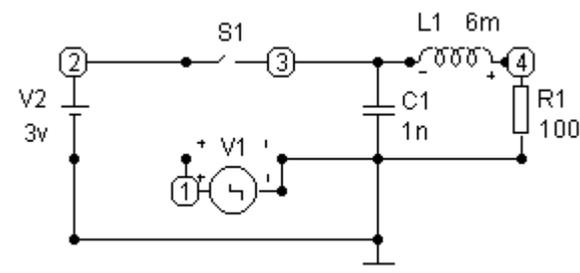


Рис. 37

Параметры элементов $R1$, $L1$, $C1$ возьмите из материалов лабораторной работы №9.

Определите параметры **колебательного** режима (период колебаний T , постоянную времени τ , декремент D и логарифмический декремент затухания d) для выбранных в лабораторной работе №9 значений $R1$, запишите их в табл. 23 и сравните с лабораторными результатами из табл. 21 и 22. Приведите в отчете две временных диаграммы напряжения на емкости.

Таблица 23

Результаты	$R1$, кОм	T , мкс	τ , мс	D	d
моделирования					
измерения					

3. Увеличивая $R1$, по форме временных диаграмм найдите критическое сопротивление контура $R_{кр}$. Приведите временную диаграмму напряжения на емкости и тока в контуре в критическом режиме.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

4. Изучите, как влияет изменение сопротивления потерь контура R1 в диапазоне от 100 Ом до R_{кр} (10-15 значений) на период свободных колебаний T, приведите таблицу, постройте график, объясните причины этого явления.

5. Проведите моделирование процессов в системе автомобильного зажигания, в которой для формирования высоковольтных импульсов используется аккумулятор с напряжением 12 В, электронный ключ и катушка индуктивности. Ее модель показана на рис. 38.

В цепи R1 отображает сопротивление потерь катушки индуктивности, а R2 - сопротивление утечки свечи в системе зажигания. При замкнутом ключе S1 индуктивность накапливает энергию от аккумулятора, а после его размыкания на сопротивлении R2 формируется отрицательный высоковольтный импульс.

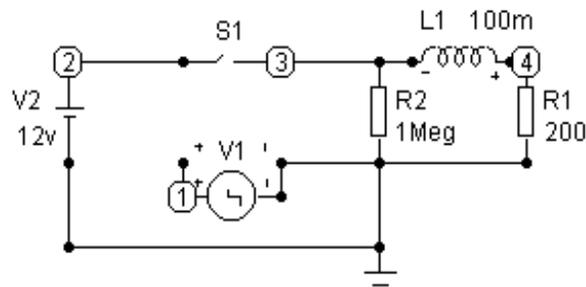


Рис. 38

Исследуйте влияние на форму импульса зажигания (напряжения V(3)) параметров катушки индуктивности (L1 и R1) и сопротивления свечи R2. Объясните причины наблюдаемых явлений.

6. Повторите (хотя бы частично) описанные выше исследования в программе WorkBench.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

7.1. В последовательном соединении r , L и C – колебательный режим. Используя данные табл. 24, определите величины, отмеченные в таблице вопросительными знаками.

7.2. Конденсатор, заряженный до напряжения U_{CO} , разряжается на катушку индуктивности. После k периодов свободных колебаний амплитуда напряжения на конденсаторе U_{mck} уменьшается в m раз по сравнению с U_{CO} . Используя данные табл. 25, определите величины, отмеченные вопросительными знаками.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

7.3. Добротность Q задана. Определите, после скольких периодов k свободных колебаний амплитуда тока уменьшится в n раз по сравнению с первоначальной.

Решение

Известно, что амплитуда тока свободных колебаний уменьшается со временем по закону

$$I_m(t) = I_0 e^{-\delta t},$$

где I_0 - начальное значение амплитуды, δ - коэффициент затухания.

Таблица 24

Вариант	L мГн	C нФ	r Ом	P Ом	Q	f_c кГц	T_c мкс	τ_{Φ} Ом	t_y мс	Θ
1	0,5	10	4	?	?	?	?	?	?	?
2	2	?	5	500	?	?	?	?	?	?
3	?	5	8	?	60	?	?	?	?	?
4	?	?	4	?	?	?	10	?	?	0,025
5	15	?	7	?	?	50	?	?	1,4	?

69

Таблица 25

Вариант	L мкГн	C нФ	r Ом	Q	Θ	Δ	m	k	U_{co} В	U_{max} В
1	-	-	-	?	?	?	?	20	80	3
2	-	-	-	40	?	-	20	?	40	?
3	-	-	-	?	?	?	-	30	100	40
4	500	10	4	-	-	?	?	25	600	?
5	100	20	6	-	?	-	?	15	?	20

При $t = kT_c$ (k – искомое число периодов, T_c – период свободных колебаний) имеем

$$I_m(kT_c) = I_0 e^{-k \cdot \delta T_c}$$

и для величины n получим

$$n = \frac{I_0}{I_m(kT_c)} = e^{k \cdot \delta T_c}$$

или

$$\ln n = k \delta T_c .$$

С другой стороны отношение токов можно выразить через логарифмический декремент затухания Θ ,

$$\ln n = k \Theta .$$

Так как $\Theta \approx \pi / Q$, то

$$k = \frac{\ln n}{\Theta} \approx Q \frac{\ln n}{\pi} .$$

7.4. На рис. 39 приведена осциллограмма напряжения на конденсаторе емкостью 0,025 мкФ при разряде последнего на катушку индуктивности. Определите параметры контура.

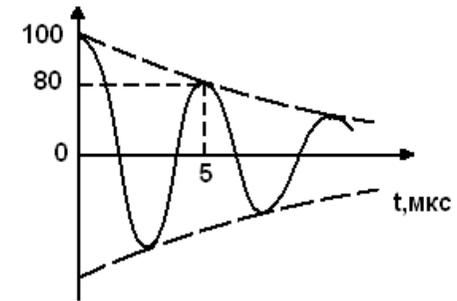


Рис. 39

70

Решение

Расчет параметров контура (значение элементов L , C и r) осуществляем с учетом известного значения емкости. Частота свободных колебаний приближенно равна

$$f_c \approx 1/2\pi\sqrt{LC},$$

тогда $L = 1/4\pi^2 f_c^2 C$, а $f_c = 1/T_c$.

На рис. 38 видно, что $T_c = 5 \cdot 10^{-6} c$ (или $f_c = 200$ кГц), тогда

$$L = 1/4\pi^2 \cdot 4 \cdot 10^{10} \cdot 0.025 \cdot 10^{-6} = 25 \text{ мкГн.}$$

Значение сопротивления потерь r находим из соотношения

$$Q = \omega_c L / r \approx \pi / \Theta,$$

тогда

$$r = 2f_c L \Theta.$$

Определим величину логарифмического декремента затухания из рис. 29,

$$\Theta = \ln \frac{100}{80} = 0,223.$$

В результате получим

$$r = 2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,223 = 2,2 \text{ Ом.}$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11 ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ И ИНТЕГРИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

Цель работы – исследование свойств дифференцирующих и интегрирующих цепей и изучение взаимосвязи временного и частотного описания сигналов и цепей.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Схема лабораторной установки показана на рис. 40.

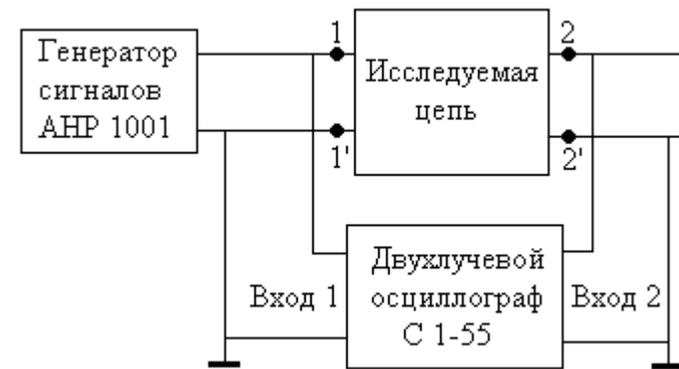


Рис. 40

В качестве исследуемой используется либо дифференцирующая цепь (рис.41а), либо интегрирующая цепь (рис. 41б).

Задайте **гармонический** входной сигнал с амплитудой от 1 до 1,5 В и частотный диапазон «10к», что соответствует интервалу частот до 22 кГц.

2. Исследование дифференцирующей цепи.

2.1. Выберите для исследования дифференцирующую RC цепь (рис. 41а), установите минимальное сопротивление R_2 .

С помощью осциллографа снимите АЧХ дифференцирующей цепи $H(f)$. Для этого, изменяя частоту генератора f с шагом не менее 1 кГц, определите размах входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ напряжений, вычислите коэффициент передачи, результаты внесите в табл. 26.

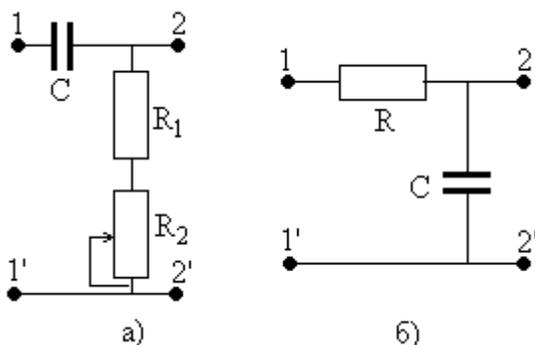


Рис. 41

Таблица 26.

АЧХ дифференцирующей цепи

F, кГц	1	2	3	20
$U_{вх}$, В							
$U_{вых}$, В							
H							

2.2. Постройте график АЧХ, определите граничную частоту полосы пропускания $f_{гр1}$.

2.3. Переведите генератор в режим формирования последовательности прямоугольных импульсов, установите скважность 2 и частоту f , равную граничной частоте полосы пропускания дифференцирующей цепи $f_{гр1}$. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений.

Установите частоту генератора $f = 0,1f_{гр1}$, повторите измерения, сравните временные диаграммы выходных сигналов.

2.4. Задайте на генераторе режим формирования треугольных импульсов с частотой $f = f_{гр1}$, зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений, сравните результаты.

2.5. Увеличьте сопротивление R_2 , переведите генератор в режим формирования последовательности прямоугольных импульсов при скважности 2 и частоту $f = f_{гр1}$. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений. Проанализируйте результаты.

3. Исследование интегрирующей цепи.

3.1. Подключите в качестве исследуемой интегрирующую цепь (рис. 41б).

3.2. Снимите АЧХ интегрирующей цепи (как в пункте 2.1), результаты запишите в табл. 27.

Таблица 27

АЧХ интегрирующей цепи

F, кГц	1	2	3	20
$U_{вх}$, В							
$U_{вых}$, В							
H							

Постройте график АЧХ, определите граничную частоту полосы пропускания $f_{гр2}$.

3.3. Переведите генератор в режим формирования последовательности прямоугольных импульсов, установите скважность 2 и частоту f , равную граничной частоте полосы пропускания дифференцирующей цепи $f_{гр2}$.

Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений.

Установите частоту генератора $f = 10f_{гр2}$, повторите измерения, сравните временные диаграммы выходных сигналов, сделайте выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

3.4. Задайте на генераторе режим формирования треугольных импульсов с частотой $f = f_{гр2}$, зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений, сравните результаты.

4. Анализ цепей со спектральной точки зрения.

4.1. Применительно к дифференцирующей цепи оцените ширину спектра входной последовательности прямоугольных импульсов со скважностью 2 и частотами $f = f_{гр1}$ и $f = 0,1f_{гр1}$, проанализируйте влияние цепи на спектр выходного сигнала и его временные диаграммы. Сравните результаты с полученными в пункте 2.3 осциллограммами.

4.2. Применительно к интегрирующей цепи оцените ширину спектра входной последовательности прямоугольных импульсов со скважностью 2 и частотами $f = f_{гр2}$ и $f = 10f_{гр2}$, проанализируйте влияние цепи на спектр выходного сигнала и его временные диаграммы. Сравните результаты с осциллограммами, полученными в пункте 3.3.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

5. Для дифференцирующей RC цепи при $R_2=0$ и указанных на плате параметрах элементов рассчитайте ее комплексный коэффициент передачи и АЧХ, постройте график. С помощью программы Mathcad (функции fft) рассчитайте комплексный спектр входной последовательности прямоугольных импульсов со скважностью 2 и частотами $f = f_{гр1}$ и $f = 0,1f_{гр1}$, определите комплексный спектр выходного сигнала. Постройте графики спектров амплитуд входного и выходного сигналов.

Используя функцию ifft обратного преобразования Фурье, рассчитайте временные диаграммы выходного сигнала, сравните с экспериментальными результатами.

6. Проведите исследования по пункту 5 для интегрирующей цепи.

7.1. При каких условиях цепь на рис. 42а является интегрирующей, а цепь на рис. 42б - дифференцирующей. Получите выражения для их частотных характеристик.

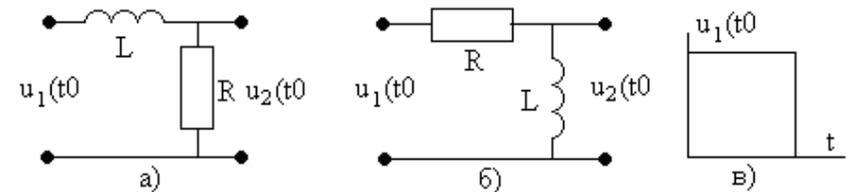


Рис. 42

7.2. Определите реакцию цепей на рис. 42а и рис. 42б на входное воздействие, показанное на рис. 42в.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12 ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛОЖНОГО СИГНАЛА НА ЛИНЕЙНУЮ ЦЕПЬ

Цель работы – изучение методов анализа воздействия сложных сигналов на электрическую цепь.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Схема электрической цепи показана на рис. 43. Положение ключей K_5, K_4, K_3, K_2, K_1 определяется двоичным кодом номера студента N в **списке группы** по модулю 32. Обратите внимание, что переключатели **сдвоены**.

Положение ключа K_6 определяется **номером группы** G – если он **четный**, то $K_6 = 0$, а если **нечетный**, то $K_6 = 1$. Приведите в отчете заданную схему.

Параметры элементов примите равными

$$R_0 = 1000[2 + \cos(N+G)] \text{ Ом}, \quad R = 1000[2 + \sin(N+G)] \text{ Ом}$$

$$C = [2 - \cos(N+G)] \text{ нФ}, \quad L = [2 - \sin(N+G)] \text{ мГн}.$$

2. Рассчитайте **аналитически** операторный коэффициент передачи (системную функцию цепи) $H(p)$. Значение $10000 \cdot H(10^6)$ введите в АКос **тема 29, ответ 1**.

3. В программе MicroCAP проведите схемотехническое моделирование заданной цепи, получите графики АЧХ $H(f)$ и ФЧХ $\varphi(f)$. Проведите расчет АЧХ $H(\omega)$ и ФЧХ $\varphi(\omega)$, определите их значения на частоте $\omega_0 = 10^6$ рад/с. Сравните результаты расчета и моделирования. Величины $10000 \cdot H(\omega_0)$ и $1000 \cdot \varphi(\omega_0)$ (в радианах) введите в АКос **тема 29, ответы 2 и 3 соответственно**.

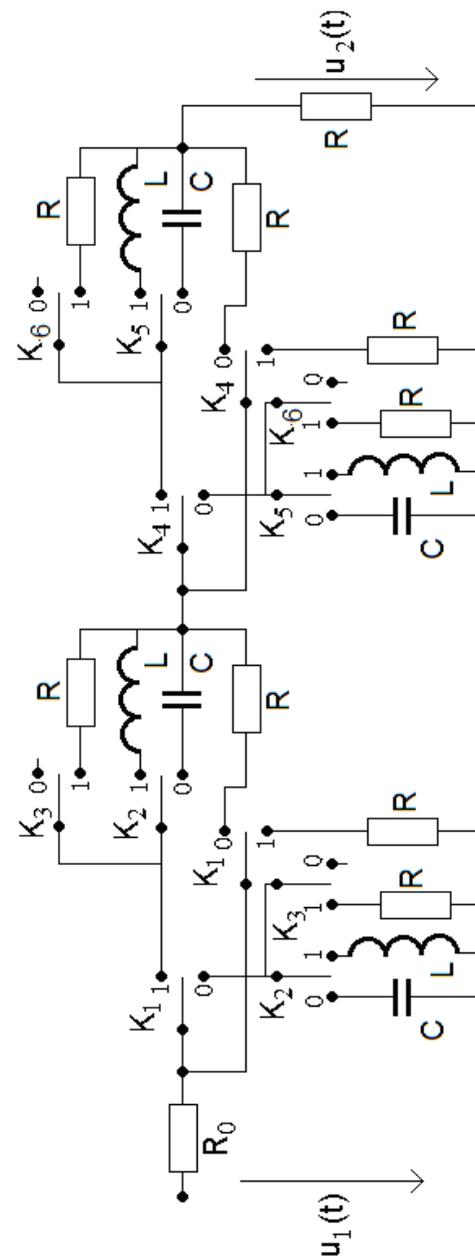


Рис. 43

4. В программе MicroCAP подключите к цепи импульсный источник напряжения и задайте последовательность прямоугольных импульсов, показанную на рис. 44.

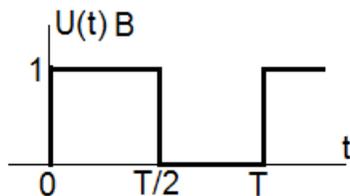


Рис. 44

Примите $T = 10 \text{ мс}$ и получите временную диаграмму напряжения $u_2(t)$, которая на интервале времени от 0 до $T/2$ будет соответствовать переходной характеристике цепи. Методом интеграла Дюамеля проведите расчет $u_2(t)$, постройте график, сравните результаты. Проанализируйте полученные результаты.

Величину $u_2(T/2)$ в милливольтах введите в АККОС, тема 29, ответ 4.

5. В программе MicroCAP рассмотрите временные диаграммы выходного напряжения при входном сигнале, показанном на рис. 44, для различных значений периода повторения $T = 5 \text{ мкс}$ и $T = 50 \text{ мкс}$. Сравните их между собой, сделайте выводы.

6. В программе MicroCAP при входном напряжении вида рис. 44 и $T = 10 \text{ мкс}$ получите спектры амплитуд входного и выходного сигналов, представьте в отчете их графики. Определите амплитуды первой и третьей гармоник входного $U_{ВХ1}, U_{ВХ3}$ и выходного $U_{ВЫХ1}, U_{ВЫХ3}$ напряжений, занесите их в табл. 28.

Таблица 28

Напряжение:	U_1 мВ	U_3 мВ
входное		
выходное (модель)		
выходное (расчет)		

7. По найденном при моделировании значениям амплитуд гармоник входного сигнала $U_{ВХ1}, U_{ВХ3}$ и соответствующим значениям АЧХ вычислите амплитуды гармоник выходного напряжения $U_{ВЫХ1}, U_{ВЫХ3}$, запишите их в табл. 29, сравните результаты.

Значения гармоник **выходного** напряжения $U_{ВЫХ1}, U_{ВЫХ3}$ в милливольтах, умноженные на 10, введите в АККОС, тема 29, ответы 5 и 6 соответственно.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

8. Повторите моделирование заданной цепи в программе WorkBench.

9. Рассчитайте переходную характеристику заданной цепи, постройте ее график, сравните с результатами моделирования.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13 СТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЛИННОЙ ЛИНИИ

Цель работы: исследование стационарных гармонических колебаний в длинной линии и различных режимов ее работы.

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Свойства длинной линии определяются ее распределенными (погонными) параметрами: погонной индуктивностью L_0 (Гн/м), погонной емкостью C_0 (Ф/м), погонным активным сопротивлением потерь R_0 (Ом/м) и погонной проводимостью утечки G_0 (Сим/м). Их часто называют первичными.

Комплексная амплитуда напряжения $U_m(x)$ и тока $I_m(x)$ на расстоянии x от конца (нагрузки) длинной линии определяется системой "телеграфных" уравнений вида:

$$\frac{dU_m(x)}{dx} = Z_0 I_m(x),$$

$$\frac{dI_m(x)}{dx} = Y_0 U_m(x),$$

где $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$, $Y_0 = G_0 + j\omega C_0$, ω - частота колебаний.

Волновые процессы в длинной линии характеризуются коэффициентом (постоянной) распространения $\gamma = \alpha + j\beta$, где α - коэффициент затухания, а β - коэффициент фазы.

Волновое (характеристическое) сопротивление Z_c длинной линии определяется соотношением

$$Z_c = \frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}.$$

Фазовая скорость V_ϕ перемещения точки фиксированной фазы падающей или отраженной волны вдоль линии равна

$$V_\phi = \frac{\omega}{\beta},$$

а коэффициент фазы связан с длиной волны колебаний λ в линии выражением

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Для длинной линии без потерь выполняются равенства:

$$\gamma = j\omega L_0 C_0, \quad \alpha = 0, \quad \beta = \omega L_0 C_0,$$

$$V_\phi = \frac{1}{L_0 C_0}, \quad Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Эти выражения приближенно справедливы и в длинной линии с потерями при условии $R_0 \ll \omega L_0$, $G_0 \ll \omega C_0$.

Соотношение между амплитудами стоячей и бегущей волн в длинной линии характеризуется коэффициентом бегущей волны (КБВ)

$$K_{БВ} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$$

или коэффициентом стоячей волны (КСВ)

$$K_{СВ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}},$$

где U_{\min} и U_{\max} - соответственно наименьшая и наибольшая амплитуды напряжения вдоль линии.

В длинной линии без потерь при активной нагрузке R_H можно записать

$$K_{BB} = \begin{cases} \frac{R_H}{Z_C} & \text{при } R_H < Z_C, \\ \frac{Z_C}{R_H} & \text{при } R_H > Z_C. \end{cases}$$

Входное сопротивление Z_{BX} линии в этом случае определяется выражением

$$Z_{BX} = \frac{R_H + j \cdot Z_C \operatorname{tg}(\beta x)}{Z_C + j \cdot R_H \operatorname{tg}(\beta x)}.$$

При $R_H = Z_C$ (в режиме бегущих волн) входное сопротивление линии равно характеристическому $Z_{BX} = Z_C$, а, например, при коротком замыкании линии ($R_H = 0$) входное сопротивление реактивно и равно

$$Z_{BX} = j \cdot Z_C \operatorname{tg}(\beta x).$$

При подключении к длинной линии реактивной нагрузки происходит смещение узлов и пучностей напряжения и тока вдоль линии. Если, например, в короткозамкнутой линии вместо замыкателя подключить индуктивность L , то узлы и пучности сместятся ближе к нагрузке на расстояние

$$l = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega L}{Z_C}\right).$$

Полученное выражение следует из того, что индуктивность L можно заменить отрезком короткозамкнутой линии длиной l .

Волновое сопротивление двухпроводной длинной линии, размещенной в вакууме (в воздухе) равно

$$Z_C = 276 \cdot \lg(D/d) \quad [Ом],$$

где d - радиус проводов линии, D - расстояние между центрами проводов линии.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Пятиметровая двухпроводная длинная линия укреплена на растяжках, вмонтированных в противоположные стены лаборатории (рис. 45). С одной стороны с ней соединен генератор высокочастотных гармонических сигналов $e(t)$, а с другой подключается нагрузка Z_H . Для измерения расстояний вдоль линии укреплена линейка.

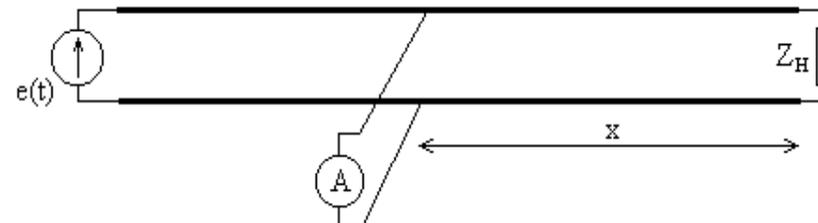


Рис. 45. Лабораторная установка

Измерение напряжения между проводами линии производится подвесным стрелочным индикатором А, перемещаемым электромеханическим приводом.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Рассчитайте волновое сопротивление лабораторной длинной линии с диаметром провода 3 мм и с расстоянием между ними 220 мм.

Начертите кривые изменения амплитуды тока и напряжения от расстояния от конца линии (нагрузки) для случаев:

- а) линии, разомкнутой на конце;
- б) линии, замкнутой на конце;
- в) линии, замкнутой на активное сопротивление, равное волновому;
- г) линии, замкнутой на активное сопротивление, большее волнового;
- д) линии, замкнутой на активное сопротивление, меньшее волнового.

Изложите методику практического определения с помощью длинной линии неизвестного активного сопротивления, полагая заданным ее волновое сопротивление.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Подготовьте длинную линию к работе. Для этого включите генератор высокочастотного сигнала, перемещая индикатор вдоль линии, убедитесь в наличии в ней колебаний, отключите нагрузку, обеспечив режим холостого хода.

2. Перемещая индикатор, измерьте длину волны колебаний в линии, определите частоту генератора.

3. В режиме холостого хода на участке линии, равном длине волны, снимите зависимость показаний индикатора A от расстояния x от конца линии. Измерения начинайте на расстоянии 80 см от нагрузки и перемещайте индикатор с шагом **10 см** по направлению к генератору.

Результаты занесите в табл. 29. Определите максимальное значение показаний индикатора A_{\max} , вычислите величины нормированного напряжения $U = A/A_{\max}$ и внесите их в табл. 30. Постройте график зависимости $U(x)$. Определите коэффициент бегущей волны $K_{\text{БВ}}$.

Таблица 29

Результаты измерения напряжения вдоль линии при $Z_{\text{н}} = \dots$

$K_{\text{БВ}} = \dots$	x						
	A						
	U						

4. Проведите измерения по предыдущему пункту для:
- а) линии, замкнутой на конце;
 - б) линии, замкнутой на активное сопротивление, равное волновому;
 - в) линии, замкнутой на активное сопротивление, большее волнового;
 - г) линии, замкнутой на активное сопротивление, меньшее волнового.

Результаты оформите в таблицах, аналогичных табл. 29.

5. На основании измерений в пунктах 4в и 4г определите величину сопротивления нагрузки, считая его неизвестным. Сравните результаты с номинальными значениями нагрузки. Измерьте величины сопротивлений на постоянном токе, сравните результаты.

6. Подключите к линии в качестве нагрузки емкость C . Измерьте смещения узлов и пучностей по отношению к замкнутой и разомкнутой на конце линии. По результатам измерений определите величины емкости, найдите ее среднее значение, сравните результаты с номинальным значением.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

Проведите измерения пункта 6 для подключенной в качестве нагрузки неизвестной индуктивности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование токов и напряжений в различных точках длинной линии в пакете MicroCAP не предусмотрено. С его помощью можно исследовать линию передачи как четырехполосник во временной области в режиме “Transient analysis” или в частотной области в режиме “AC Analysis”.

Проведите расчет погонных параметров используемой в работе линии и введите их в программу моделирования.

Проведите анализ временных диаграмм сигналов на входе и выходе линии, ее частотные характеристики.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

1. Используя данные табл. 30, определите амплитуды напряжения U_{m2} и тока I_{m2} в точке, расположенной на расстоянии x от конца линии, N - номер варианта, f - частота сигнала, λ - длина волны, Z - волновое сопротивление.

Таблица 30

N	U_{m2} , В	I_{m2} , А	Режим в конце линии	f , МГц	λ , м	x , м	Z , Ом
1	250	-	разомкнута	-	20	2,5	500
2	-	1,5	замкнута	200	-	1,25	565
3	120	-	разомкнута	30	-	12	240
4	-	0,5	замкнута	-	20	2,5	500
5	100	-	разомкнута	1	-	40	250

2. Используя данные табл. 31, определите наименьшую длину короткозамкнутой либо разомкнутой линии, Z_{BX} - входное сопротивление.

Таблица 31

N	Режим в конце линии	Z_{BX} , Ом	Z , Ом	λ , м	f , МГц
1	замкнута	-j80	200	60	-
2	разомкнута	j60	180	-	70
3	замкнута	j140	120	-	110
4	разомкнута	-j120	120	.	100
5	замкнута	j125	600	-	1

Примеры решения задач

3. Амплитуда напряжения в конце разомкнутой линии равна 100 В, частота колебаний 100 МГц, волновое сопротивление линии 100 Ом. Определите амплитуды напряжения и тока в точке, находящейся от конца линии на расстоянии 0,5 м.

Решение

Известно, что в разомкнутой линии амплитуды напряжений и тока вдоль линии распределены по законам

$$\begin{cases} U_m(x) = U_{m2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} x, \\ I_m(x) = \frac{U_{m2}}{Z_B} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x, \end{cases}$$

где x – расстояние от заданной точки до конца линии.

Подставляя в систему уравнений данные условия задачи, получим

$$\begin{aligned} U_m(0,5) &= 100 \cos(2\pi / \lambda) \cdot 0,5, \\ I_m(0,5) &= (100/500) \sin(2\pi / \lambda) \cdot 0,5, \end{aligned}$$

где $\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} = 3 \text{ м},$

тогда

$$\begin{aligned} U_m(0,5) &= 100 \cos(360^\circ / 3) \cdot 0,5 = 100 \cos 60^\circ = 50 \text{ В}, \\ I_m(0,5) &= 100 \sin(360^\circ / 3) \cdot 0,5 = 0,5 \sin 60^\circ = 0,433 \text{ А}. \end{aligned}$$

4. Рассчитайте минимальные длины короткозамкнутой и разомкнутой линии, входные сопротивления которых носят индуктивный характер и равны 100 Ом каждое при $Z = 100 \text{ Ом}, \lambda = 0,4 \text{ м}.$

Решение

Входное сопротивление короткозамкнутой линии определяется из формулы

$$Z_{BX \text{ КЗ}} = jZ \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} l_1,$$

а входное сопротивление разомкнутой линии

$$Z_{BX \text{ XX}} = -jZ \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l_2.$$

Из условия задачи имеем

$$Z_{BX \text{ КЗ}} = Z_{BX \text{ XX}} = jX_{BX},$$

тогда

$$jX_{BX} = jZ \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} l_1,$$

$$jX_{BX} = -jZ \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l_2,$$

или

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} l_1 = \frac{X_{BX}}{Z}, \quad \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l_2 = -\frac{X_{BX}}{Z}.$$

Из первого уравнения получаем

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{X_{BX}}{Z} + k\pi = \frac{0,4}{2\pi} (\operatorname{arctg} 1 + k\pi) = \\ &= \frac{0,4}{2\pi} \left(\frac{\pi}{4} + k\pi \right) \Big|_{k=0} = 0,05 \text{ м}. \end{aligned}$$

Из второго уравнения находим

$$l_2 = \frac{\lambda}{2\pi} (\operatorname{arctg} 1 + k\pi) \Big|_{k=0} = 0,4 - 0,05 = 0,35 \text{ м}.$$

5. На конце линии с волновым сопротивлением $Z = 200 \text{ Ом}$ включена емкость $C_2 = 100 \text{ пФ}$. Определите место нахождения узла напряжения, ближайшего к концу линии, если $\omega = 10^8 \text{ 1/с}.$

Решение

Подключение емкости равносильно “удлинению” линии на величину l , определяемую из соотношения

$$Z_{BX\ XX} = -j \frac{1}{\omega C_2} = -j Z_{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l^1,$$

где $\lambda = c_0 / f = 2\pi c_0 / \omega = 18,84$ м при скорости света $c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с, тогда получим

$$l^1 = (\lambda / 2\pi) \arctg(1 / \omega C_2 z_B) = 3 \text{ м.}$$

В разомкнутой линии узел напряжения находился бы на расстоянии $x = \lambda / 4 = 4,71$ м, а емкость C_2 смещает узел к концу линии на расстояние $l^1 = 3$ м. Следовательно, ближайший узел напряжения будет находиться на расстоянии $x_1 = x - l^1 = 1,71$ м.

6. Амплитуда падающей волны напряжения в линии равна 100 В, коэффициент отражения в конце линии $\rho_u = 0,6$. Волновое сопротивление линии – 100 Ом. Определите амплитуду отраженной волны напряжения, а также максимальные и минимальные значения амплитуды напряжения в линии и коэффициент бегущей волны.

Решение

Амплитуда отраженной волны напряжения равна

$$U_{m\text{-отп}} = \rho_u U_{m\text{-пад}} = 0,6 \cdot 100 = 60 \text{ В.}$$

Максимальная амплитуда в пучности напряжения равна

$$U_{m\text{-max}} = U_{m\text{-пад}} + U_{m\text{-отп}} = 160 \text{ В,}$$

а минимальная амплитуда в узле напряжения равна

$$U_{m\text{-mix}} = U_{m\text{-пад}} - U_{m\text{-отп}} = 40 \text{ В.}$$

Тогда коэффициент бегущей волны (КБВ) равен

$$\text{КБВ} = \frac{U_{m\text{-mix}}}{U_{m\text{-max}}} = \frac{40}{160} = 0,25.$$

7. Длинная линия с волновым сопротивлением 500 Ом нагружена на активное сопротивление. Наибольшая амплитуда напряжения в линии равна 100 В, а наименьшая – 50 В. Определите возможные величины сопротивления нагрузки.

Решение

Известно, что КБВ определяется соотношением

$$\text{КБВ} = \begin{cases} z_B / r_2, & \text{если } z_B < r_2, \\ r_2 / z_B, & \text{если } z_B > r_2, \end{cases}$$

Следовательно

$$r_2 = \begin{cases} z_B / \text{КБВ}, & \text{при } z_B < r_2, \\ r_2 \cdot \text{КБВ}, & \text{при } z_B > r_2. \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} 1000 \text{ Ом}, & \text{при } z_B < r_2, \\ 250 \text{ Ом}, & \text{при } z_B > r_2. \end{cases}$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение свойств линейного операционного усилителя и экспериментальное исследование его характеристик при гармонических воздействиях.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Приведите в отчете справочные параметры и характеристики ОУ КР544УД2. Проведите их анализ, оцените близость рассматриваемого ОУ к идеальному. Изучите рабочую плату, схема которой показана на рис. 46, и определите номиналы ее элементов.

2. К входу усилителя без разделительного конденсатора C_p (узел 2) и выходу (узел 3) операционного усилителя в инвертирующем включении (рис. 46), подключите левый и правый каналы электронного осциллографа соответственно. На вход (узел 1) подайте напряжение с действующим значением 0,1В и частотой 28 кГц от генератора гармонических сигналов.

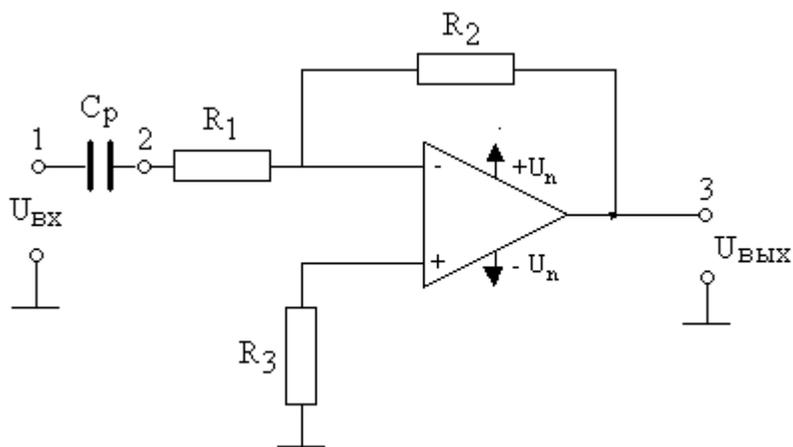


Рис. 46
93

3. При максимальном значении резистора обратной связи R_2 исследуйте амплитудную характеристику ОУ, увеличивая уровень входного сигнала $U_{вх}$ до появления заметных нелинейных искажений. По экрану осциллографа определите соответствующие амплитуды $U_{вых}$ выходного напряжения. Результаты измерения (10-15 точек) представьте в табл. 32. Постройте график амплитудной характеристики.

Таблица 32

Амплитудная характеристика

$U_{вх}, В$				
$U_{вых}, В$				

4. По осциллограммам входного и выходного сигналов проведите измерение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик усилителя, изменяя частоту генератора от 28 кГц до 300 кГц (20-30 значений). Для оценки АЧХ определите уровни $U_{вх}$ и $U_{вых}$, а затем их отношение K . Результаты внесите в табл. 33.

Таблица 33

Амплитудно-частотная характеристика

F, кГц				
$U_{вх}, В$				
$U_{вых}, В$				
K				
Δt , мкс				
φ , (°)				

Фазо-частотную характеристику можно определить, измеряя смещение по времени Δt выходного сигнала относительно входного. Сдвиг фаз φ вычисляется по формуле $\varphi = -2\pi \cdot f \cdot \Delta t$. Полученные значения внесите в табл. 33, постройте графики АЧХ и ФЧХ.

5. Повторите измерения по пункту 4 при минимальном значении резистора обратной связи R_2 .

6. Переключите генератор и осциллограф на вход усилителя через разделительный конденсатор C_p (узел 1). Повторите измерения по пунктам 4 и 5, представьте их результаты в таблицах и отобразите графически. Проведите сравнительный анализ частотных характеристик при наличии и отсутствии разделительной емкости. Объясните полученные результаты.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

7. Проведите имитационное моделирование исследуемого усилителя (рис. 46) с помощью программ MicroCAP или WorkBench. Сравните результаты моделирования и экспериментальных исследований.

8. Самостоятельно смонтируйте цепь на рис. 46 и экспериментально исследуйте ее характеристики.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15 АКТИВНЫЙ RC ФИЛЬТР

Цель работы: изучение свойств активного RC фильтра.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Приведите в отчете справочные параметры и характеристики ОУ КР544УД2. Проведите их анализ, оцените близость рассматриваемого ОУ к идеальному.

2. К входу и выходу фильтра (рис. 47) подключите левый и правый каналы электронного осциллографа соответственно. На вход подайте напряжение с амплитудой 0,5-1 В и частотой 28 кГц от генератора гармонических сигналов.

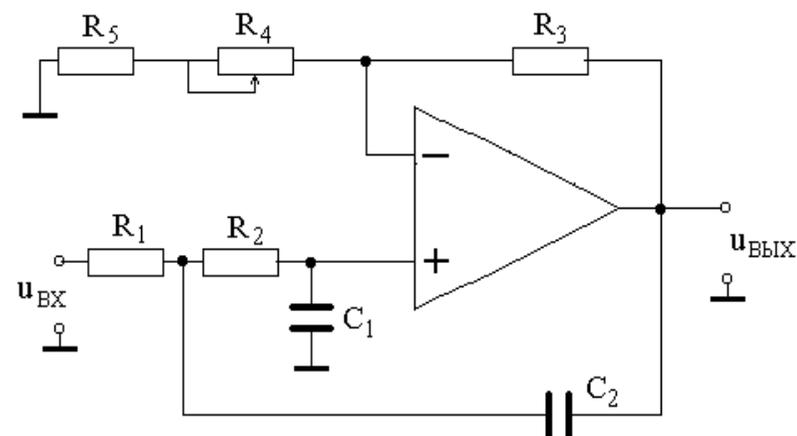


Рис. 47.

Изучите рабочую плату и определите номиналы ее элементов.

3. Установите резистор R_4 в крайнее правое положение (максимальное значение сопротивления). В этом случае глубина отрицательной обратной связи максимальна.

По осциллограммам входного и выходного сигналов проведите измерение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик фильтра, изменяя частоту генератора от 28 кГц до 300 кГц (15-20 значений). Для оценки АЧХ определите уровни $U_{вх}$ и $U_{вых}$, а затем их отношение K . Результаты внесите в табл. 34.

Фазо-частотную характеристику можно определить, измеряя смещение по времени Δt входного сигнала относительно выходного. Сдвиг фаз φ вычисляется по формуле $\varphi = -2\pi \cdot f \cdot \Delta t$. Полученные значения внесите в табл. 34, постройте графики АЧХ и ФЧХ.

По графику АЧХ определите полосу пропускания Π и коэффициент прямоугольности $K_{пр}$ фильтра. Результаты запишите в табл. 35.

Таблица 34

Амплитудно-частотная характеристика

F, кГц				
$U_{вх}$, В				
$U_{вых}$, В				
K				
Δt , мкс				
φ , (°)				

Таблица 35

Характеристики фильтра

Тип фильтра	R_4	Π , кГц	$K_{пр}$
R_4 - максимум			
Фильтр Баттерворта			
Фильтр Чебышева			

4. Уменьшая сопротивление R_4 , добейтесь максимально плоской АЧХ, так, чтобы отсутствовал ее подъем в области верхних частот, как показано на рис. 48 (кривая 2, фильтр Баттерворта). Кривая 1 соответствует максимальному значению R_4 . Измерьте величину сопротивления, отключив питание стенда.

По осциллограммам входного и выходного сигналов проведите измерение АЧХ фильтра в том же диапазоне частот (15-20 значений). Результаты внесите в табл. 36.

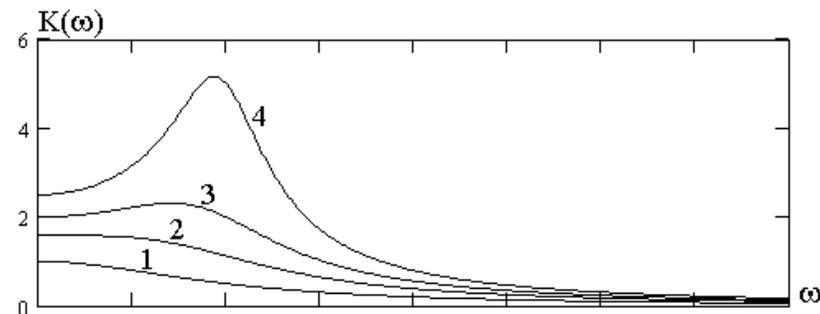


Рис. 48

Таблица 36

Амплитудно-частотная характеристика

F, кГц				
$U_{вх}$, В				
$U_{вых}$, В				
K				

По АЧХ определите полосу пропускания Π и коэффициент прямоугольности $K_{пр}$ фильтра Баттерворта. Результаты запишите в табл. 35.

5. Продолжая уменьшать сопротивление R_4 , добейтесь АЧХ, соответствующей фильтру Чебышева (кривая 3 на

рис. 48), у которого наибольший подъем в области верхних частот в 1,12 раза больше значения АЧХ на частоте 28 кГц. Измерьте величину сопротивления, отключив питание стенда.

По осциллограммам входного и выходного сигналов проведите измерение АЧХ фильтра в том же диапазоне частот (15-20 значений). Результаты внесите в таблицу, аналогичную табл. 36.

По АЧХ определите полосу пропускания П и коэффициент прямоугольности $K_{\text{ПР}}$ фильтра Чебышева. Результаты запишите в табл. 35. Сравните характеристики рассмотренных фильтров, сделайте выводы.

6. Установите такое малое сопротивление R_4 , при котором в цепи возникают автоколебания. Зарисуйте осциллограммы напряжений, проанализируйте результаты.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

В качестве факультативного задания проведите имитационное моделирование исследуемого фильтра (рис. 47) с помощью, например, пакета программ MicroCAP. Сравните результаты моделирования и экспериментальных исследований.

Самостоятельно смонтируйте любой выбранный активный RC фильтр и исследуйте его характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии объединяются экспериментальные исследования электронных цепей в рамках лабораторного практикума и моделирование тех же устройств с использованием современных средств вычислительной техники.

Описаны основные измерительные приборы и правила их использования при выполнении лабораторных исследований. Изложены требования по оформлению отчетов по результатам исследований.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица двоичных кодов номера студента

N	N ₂						
1	00001	11	01011	21	10101	31	11111
2	00010	12	01100	22	10110	32	00001
3	00011	13	01101	23	10111	33	00010
4	00100	14	01110	24	11000	34	00011
5	00101	15	01111	25	11001	35	00100
6	00110	16	10000	26	11010	36	00101
7	00111	17	10001	27	11011	37	00110
8	01000	18	10010	28	11100	38	00111
9	01001	19	10011	29	11101	39	01000
10	01010	20	10100	30	11110	40	01001

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Оборудование лабораторного рабочего места питается от силовой сети переменного напряжения 220 В с частотой 50 Гц. При попадании на тело человека оно вызывает электрический удар, приводит к поражению нервной системы, головного мозга, дыхания, к мышечным судорогам. Опасным для человека является напряжение выше 36 В и ток более 10 мА.

Измерительные приборы и лабораторный стенд должны быть заземлены или подключены к нулевому проводу силовой сети. На их металлических корпусах не должно быть высокого напряжения и статического электричества.

Необходимо обратить внимание на исправность электропроводки, розеток и сетевых кабелей. При нарушении целостности изоляции, искрении и других неисправностях студент должен сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

На передних панелях исправных приборов и стенда высокие напряжения отсутствуют, и можно выполнять электрические соединения при включенном оборудовании. Запрещается касаться внутренних элементов стенда при снятых лабораторных панелях.

При выполнении студентом лабораторных работ он самостоятельно включает оборудование на рабочем месте, однако ему категорически запрещено включать силовую сеть в лаборатории.

При аварии оборудования, искрении или загорании запрещается отключать его от сети, вынимая вилки из розеток, гасить пожар водой и принимать другие подобные меры. Необходимо сообщить о происшествии преподавателю или лаборанту и, при необходимости экстренных действий, отключить электрическую сеть в лаборатории общим выключателем на силовом щите.

Если человек попал под действие напряжения и не может самостоятельно освободиться, необходимо оторвать его от токоведущих частей оборудования или обесточить рабочее место, отключив силовую сеть, а затем оказать потерпевшему первую медицинскую помощь и вызвать врача.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов В.П. Основы теории цепей / В.П. Попов. М.: Высш. шк., 2003.
2. Литвиненко В.П. Основы электротехники. Ч. 1. Цепи постоянного тока, линейные цепи при гармонических воздействиях. Воронеж: ВГТУ, 2007.
3. Литвиненко В.П. Основы электротехники. Часть 2. Частотно- селективные цепи. Спектральный анализ сигналов. ВГТУ, 2007.
4. Литвиненко В.П. Основы электротехники. Часть 3. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Нелинейные цепи. ВГТУ, 2008.
5. Литвиненко В.П. Литвиненко Ю.В. Расчет линейных электрических цепей. ВГТУ, 2009.
6. Карлацук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC : Программа Electronics Workbench и ее применение. М. : СОЛОН, 2003
7. Розевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования MicroCAP V , М.: «Солон», 1998.
8. Стандарт предприятия СТП 2007.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Требования к выполнению лабораторных работ	4
Измерительные приборы	7
Генератор гармонических сигналов Г4-42	7
Генератор сигналов АНР 1001	9
Вольтметр универсальный В7-26	10
Микровольтметр АВМ-1071	13
Электронный осциллограф С1-55	14
Лабораторный стенд	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. Ознакомление с измерительными приборами	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. Расчет и моделирование цепи постоянного тока	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. Гармоническое напряжение и ток в элементах цепи R, L, C и их последовательном соединении	26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. Расчет и моделирование цепи при гармонических воздействиях	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. Принцип наложения и теорема об эквивалентном источнике	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. Последовательный колебательный контур	43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. Схемотехническое моделирование резонансных цепей	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. Спектральный анализ периодических сигналов	53
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. Свободные процессы в линейных электрических цепях	61
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. Схемотехническое моделирование переходных процессов	65

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. Дифференцирующие и интегрирующие цепи	72
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12. Воздействие сложного сигнала на линейную цепь	77
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13. Стационарные процессы в длинной линии	81
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14. Исследование операционного усилителя	93
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15. Активный RC фильтр	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Таблица двоичных кодов номера студента	100
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Инструкция по технике безопасности	101
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	102

Учебное издание

Литвиненко Владимир Петрович
Литвиненко Юлия Владимировна

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

В авторской редакции

Компьютерный набор В.П. Литвиненко

Подписано в печать 15.01.2014.

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 6,8. Уч.-изд. л. 5,6. Тираж 250 экз.

Зак. №

ГОУВПО Воронежский государственный технический
университет
394026 Воронеж, Московский просп., 14