

О.Е. Глухова, Д.А. Колосов, В.В.Шунаев

## ПРАКТИКУМ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК [621.37]

БКК

Глухова, О.Е., Колосов Д.А., Шунаев В.В.

ПРАКТИКУМ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ: учебное пособие для студентов, обучающихся по направления подготовки бакалавров «Конструирование и технология электронных средств», «Радиофизика», «Компьютерная безопасность», «Педагогическое образование», «Информатика и вычислительная техника», «Химическая технология», «Техносферная безопасность»/ О.Е. Глухова. – Саратов: 2019. – 86 с.: ил.

ISBN

Для студентов физического, геологического и химического факультетов, а также факультета компьютерных наук и информационных технологий и факультета нелинейных процессов.

В учебном пособии представлены указания по выполнению лабораторных работ, посвященных ознакомлению с измерительными приборами, линейными электрическими цепями, методами расчетов гармонических токов и напряжений в электрических цепях. Представлены теоретические основы электротехники, электрорадиоизмерений, теории линейных электрических цепей, матричных методов анализа электрических цепей

Рекомендуют к печати:

кафедра радиотехники и электродинамики физического факультета  
Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского

Проф. д.ф.-м.н. Осипов Владимир Андреевич

УДК [621.37]

БКК

ISBN

© Глухова О. Е., 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Работа 1. Измерительные приборы. Часть 1.	10
Работа 2. Измерительные приборы. Часть 2.	19
Работа 3. Методы расчета токов и напряжений в линейных электрических цепях	40
Работа 4. Анализ гармонических процессов в линейных электрических цепях	53
Работа 5. Методы расчета гармонических токов и напряжений в линейных электрических цепях	69
Работа 6 Методы расчета токов и напряжений в линейных электрических цепях	72

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. При подготовке к лабораторной работе необходимо ознакомиться с заданием к работе, с экспериментальной установкой и измерительной аппаратурой, изучить теоретический материал в соответствии с приведенными в задании вопросами, используя лекции, теоретические разделы пособия и рекомендованную литературу, выполнить необходимые расчеты.

2. Сдать преподавателю предварительный теоретический отчет, в ходе которого студент должен показать, что он твердо уяснил цель работы, методику эксперимента, знает теорию, схему установки и физические процессы в ней, умеет обращаться с измерительными приборами.

3. Выполнить экспериментальную часть работы. Перед началом эксперимента правильность сборки схемы должна быть обязательно проверена преподавателем либо лаборантом, после чего дается разрешение на включение источников питания. По окончании работы источники питания выключаются, и результаты измерений представляются преподавателю для проверки и отметки о выполнении работы. Если полученные результаты верны, то студент разбирает схему, приводит свое рабочее место в порядок и сдает установку лаборанту.

4. По проделанной работе студент оформляет письменный отчет в специальной тетради и представляет его преподавателю.

Отчет должен содержать следующее:

наименование, цель и содержание работы;

краткие теоретические сведения, рабочие формулы, необходимые расчеты;

схему экспериментальной установки с обозначением величин параметров элементов схемы, указанием напряжений;

результаты экспериментальных наблюдений, измерений и вычислений;

анализ полученных результатов, краткие пояснения и выводы.

Полученные результаты должны быть оформлены в виде таблиц, схем и графиков с указанием размерностей и режимов, при которых производились измерения, с соблюдением принятых условных обозначений и в удобном (целочисленном) масштабе.

Графики, отображающие зависимости нескольких величин, полученные от одной и той же переменной, так же, как теоретические и экспериментальные кривые, целесообразно наносить на один чертеж, выбрав соответствующие масштабы для каждой величины.

Вычисления должны быть сделаны с точностью, соответствующей точности получения экспериментальных данных и расчетов с учетом разброса величин параметров элементов схемы.

Графический материал и осциллограммы подклеиваются к отчету.

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ

1. Перед началом практических работ в лаборатории каждый студент должен получить у преподавателя инструкцию по технике безопасности, **изучить правила электробезопасности при работе в лаборатории и расписаться об этом в специальном журнале.**

2. Категорически запрещается включать установку без проверки преподавателем или лаборантом правильности сборки схемы.

3. Каждая работа выполняется только с помощью предназначенного для нее оборудования. Брать приборы с других рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта запрещается.

4. Приборы и элементы схемы надо располагать так, чтобы удобно было вести эксперимент и наблюдать за показаниями приборов.

В первую очередь следует собрать рабочую часть цепи (цепь токов), а затем измерительные цепи (цепи напряжения).

При сборке схемы необходимо соблюдать полярность зажимов, избегать излишнего скрещивания проводов, соединения нескольких проводов под один зажим. Необходимо добиваться достаточной плотности контактов.

5. Перед началом эксперимента все измерительные приборы должны быть включены на максимальные пределы измерений, а стрелки приборов, установленные на нуль; все имеющиеся в цепи реостаты должны быть полностью введены, а потенциометры – выведены.

6. Во время эксперимента необходимо внимательно следить за тем, чтобы токи и напряжения не превышали допустимых значений для установленного предела измерений.

7. Все переключения в схеме, необходимые по ходу работы (переход на новые пределы измерений приборов, присоединение или отключение тех или иных элементов исследуемой схемы и т.д.), надлежит производить только после отключения схемы от источников питания.

Если схема находится под напряжением, нельзя касаться руками изолированных частей цепи.

8. При возникновении каких-либо отклонений в режиме работы схемы или исчезновении напряжения в питающей сети следует немедленно отключить установку и сообщить это преподавателю или лаборанту.

9. Источники питания приборов и экспериментальной установки должны быть включены только во время измерений.

10. Нельзя оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.

11. Категорически запрещается самостоятельно производить какие-либо переключения на общих лабораторных распределительных щитках.

12. Не разрешается держать на рабочих столах и лабораторном оборудовании посторонние предметы (портфели, сумки, предметы одежды и т.п.), находиться в пальто и раздеваться в лаборатории.

13. Запрещается работать в лаборатории одному. Обязательно присутствие второго лица для оказания помощи при несчастном случае.

14. По окончании работы на лабораторной установке необходимо уменьшить до минимальных значений напряжения и токи в электрических цепях и приборах, затем отключить источники питания и демонтировать схему установки, исключая цепи постоянных соединений и заземлений.

15. При аварии, несчастном случае необходимо немедленно обесточить лабораторию рубильником аварийного выключения или рубильником на силовом щите комнаты.

## ОПИСАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка предназначена для выполнения лабораторных работ по электротехнике, радиотехнике и радиоэлектронике.

В комплект установки входят: универсальная панель, на которой монтируется исследуемая схема и кассета с набором элементов схем; генератор сигналов; осциллограф; электронный вольтметр.

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 0.1., общий вид панели – на рис. 0.2., принципиальная схема на рис. 0.3.




Рис. 0.1. Функциональная схема экспериментальной установки

На универсальной панели размещены:

- Входной трансформатор  $T_r$ , имеющий средний вывод на вторичной обмотке. При использовании выходного напряжения с половины вторичной обмотки коэффициент трансформации  $K_{Tr} = 2:1$ ;
- Формирователь прямоугольного напряжения типа «меандр», представляющий собой схему двустороннего ограничения синусоидального напряжения генератора сигналов, собранную на кремниевом стабилитроне Д 814 А и резисторе R;
- Наборное поле из  $\Pi$  клемм, на котором исследуемая схема монтируется из отдельных элементов, соединяемых непосредственно или перемычками. Каждый элемент представляет собой гетинаксовую пластинку с расположенными на ней конденсатором, катушкой индуктивности, резистором (параметры элементов, которыми укомплектованы кассеты, указаны далее и в табл. 0.1; 0.2);
- Входные клеммы K12, K13, K14 для подключения напряжения генератора сигналов;
- Кнопочный переключатель  $\Pi$  на 3 положения для подключения к клеммам K1-K2-K9 наборного поля синусоидального напряжения либо прямоугольного напряжения к клемма K1-K2. В первом случае к клеммам K1 и K9 подводятся два противофазных напряжения с концов вторичной обмотки входного трансформатора относительно ее средней точки, соединенной с клеммой K2. Эти два переменных синусоидальных напряжения используются при исследовании целей переменного тока.

Для подачи на вход исследуемой цепи синусоидального напряжения выход генератора сигналов соединяют с левой парой входных клемм на панели K12, K13, обозначенных « $\sim$ », и нажимают левую клавишу переключателя.

Для подачи на вход исследуемой цепи прямоугольного напряжения выход генератора сигналов соединяют с парой входных клемм на панели K13, K14, обозначенных «», и нажимают правую клавишу переключателя.

Корпус генератора сигналов необходимо подключать к средней клемме входа K13, которая постоянно соединена с клеммой K11 наборного поля. Клемма K2 соединяется с корпусом генератора сигналов только при получении прямоугольного напряжения. При необходимости корпус осциллографа соединяют с клеммой K11 наборного поля. При нажатии средней клавиши переключателя клеммы K1 и K2 от источников напряжений отключаются.

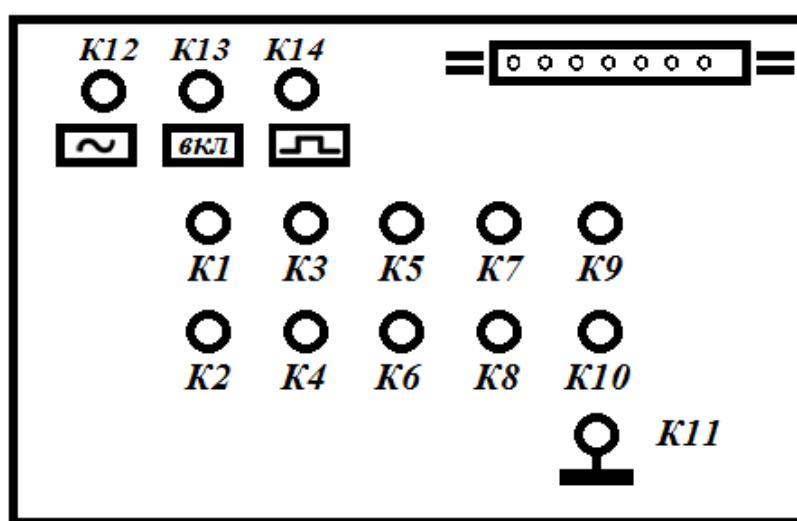


Рис. 0.2. Общий вид универсальной панели

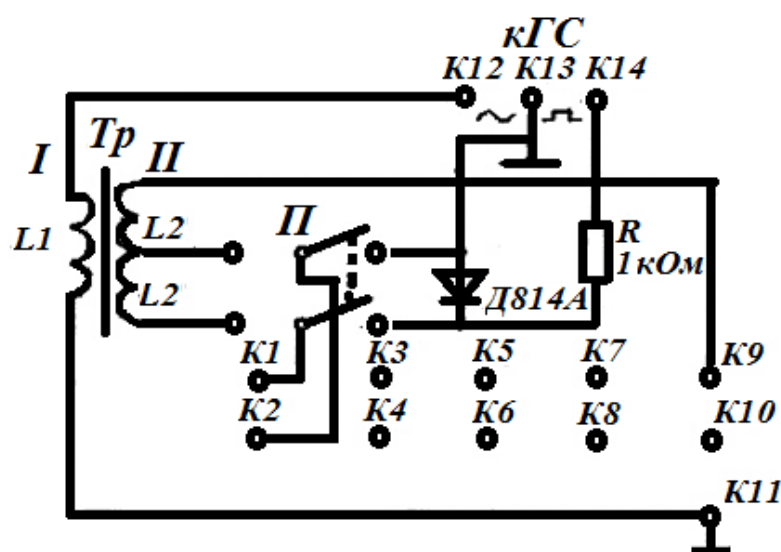


Рис. 0.3. Принципиальная схема универсальной панели

Порядок работы с универсальной экспериментальной установкой



1. Получить задание на лабораторную работу у преподавателя.
2. Вывинтить головки клемм наборного поля на универсальной панели, установить элементы согласно монтажной схеме и закрепить их головками.
3. Подключить выход генератора сигналов к входным клеммам на панели.

При укомплектовании экспериментальной установки генератором типа ГЗ-7В в работах по исследованию одиночного и связанных контуров использовать выход генератора на 2В, с выходным сопротивлением 75 или 51 Ом (точное значение выходного сопротивления уточнить у преподавателя).

Для получения прямоугольного напряжения в формирователе импульсов выходное напряжение генератора устанавливается равным 30 В. Частота прямоугольного напряжения  $f = 1/T$  равна частоте синусоидального напряжения на входе формирователя и устанавливается по шкале частоты генератора сигналов.

4. При измерении напряжений в узловых точках схемы, вывод корпуса осциллографа или электронного вольтметра должен подключаться к соответствующим точкам схемы с более низким потенциалом.

## **РАБОТА 1**

### **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ЧАСТЬ 1.**

Цель работы: освоение методики работы с измерительным генератором и электронным вольтметром. Проведение измерений выходных напряжений генератора.

#### **1.1 Общие сведения**

##### **1.1.1. Классификация измерительных приборов**

Все приборы разделены на группы, обозначаемые буквами русского алфавита. Каждая группа делится на подгруппы, обозначаемые арабскими цифрами. Внутри подгруппы конкретные приборы имеют свои порядковые номера. Таким образом, обозначение прибора состоит из трех или четырех элементов.

Первый элемент – буква, указывающая группу. Например, приборам для измерения напряжения присвоена буква В, измерительным генераторам – Г, осциллографам – С и так далее.

Второй элемент – цифра подгруппы. Например, в группе В цифра 3 означает вольтметры переменного тока, 4 – импульсные вольтметры, 7 – универсальные вольтметры.

Третий элемент – порядковый номер прибора в своей подгруппе (номер разработки), например, С1-19, В3-38 и так далее.

Четвертый элемент – буква А, указывает, что прибор подвергся модернизации или усовершенствованию (например, В3-2А).

##### **1.1.2. Общая характеристика измерительных приборов**

Выходное сопротивление – сопротивление прибора со стороны выходных зажимов. Эта величина служит важной характеристикой источников сигналов – измерительных генераторов, которую необходимо знать для согласования генераторов с нагрузкой.

Входное сопротивление – сопротивление прибора со стороны его входных зажимов. От его величины зависит степень влияния прибора на работу схемы, к которой он подключается. Чаще всего радиоэлектронные измерительные приборы подключаются параллельно к участку цепи, в котором производятся измерения (вольтметр, осциллограф). В таких случаях входное сопротивление прибора должно быть велико, иначе подключение прибора будет нарушать режим работы схемы.

Диапазон рабочих частот – полоса частот, в пределах которой возможна эксплуатация прибора или измерения проводятся с погрешностью, не превышающей заданной величины.

## 1.2. Погрешности измерений

### 1.2.1. Классификация погрешностей

Результат измерения физической величины всегда отличается от истинного значения на некоторую величину, называемую погрешностью измерений. В зависимости от способа выражения различают абсолютные, относительные, приведенные, среднеарифметические и т.п. погрешности измерений.

Абсолютная погрешность – разность между результатом  $A$  и истинным значением  $A_0$  измеряемой величины:

$$\Delta A = A - A_0.$$

Абсолютная погрешность измерения выражается в единицах измеряемой величины. Она включает в себя систематическую  $\Delta A_c$  и случайную  $\Delta A_{сл}$  абсолютные погрешности, т.е.

$$\Delta A = \Delta A_c + \Delta A_{сл}.$$

Систематическая погрешность может быть определена с помощью, например, средств измерений более высокого класса точности. Как правило, при измерениях истинное значение измеряемой величины неизвестно. Поэтому при вычислении абсолютных погрешностей измерений за истинное значение измеряемой величины принимается либо результат измерения этой величины образцовым прибором, либо – при большом числе измерений, проведенных с одинаковой точностью, и при условии исключения систематической погрешности – среднее арифметическое результатов измерений:

$$\Delta A_{cp} = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots + \Delta A_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta A_i,$$

где  $A_i$  – результат отдельных измерений;  $n$  – число измерений.

В большинстве случаев указание лишь абсолютной погрешности недостаточно для оценки точности измерений. Необходимо сопоставить величину абсолютной погрешности с самой измеряемой величиной.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{A - A_0}{A_0} = \frac{\Delta A}{A_0}$$

### 1.2.2. Оценка результатов измерений

Результат измерения физической величины из-за влияния случайных погрешностей (считаем, что систематические и грубые погрешности из результатов измерений исключены) всегда в большей или меньшей мере отличается от истинного значения, которое при проведении измерений остается неизвестным. Случайная погрешность проявляется при многократном повторении измерений физической величины в одних и тех же условиях. Результат каждого из ряда измерений несколько отличен от результатов других измерений. При этом за наиболее вероятное значение измеряемой величины принимается ее среднее арифметическое значение, вычисленное по результатам ряда измерений.

Наиболее широко используемой оценкой влияния случайной погрешности на результат измерений является среднеквадратичная погрешность, определяемая как корень квадратный из суммы квадратов абсолютных погрешностей отдельных измерений, деленный на количество измерений:

$$\delta_n = \pm \frac{\sqrt{(\Delta A_1 - \Delta A_{cp})^2 + (\Delta A_2 - \Delta A_{cp})^2 + \dots + (\Delta A_n - \Delta A_{cp})^2}}{n} = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i - \Delta A_{cp})^2}}{n}$$

Отношение среднеквадратичной погрешности к среднему арифметическому значению измеряемой величины, выраженное в процентах, называют относительной среднеквадратичной погрешностью:

$$W_n = \frac{\delta_n}{A_{cp}} \cdot 100\%$$

### 1.3. Измерительные генераторы

При испытаниях, исследованиях, измерениях режимов различных радиоэлектронных схем необходимы источники испытательных сигналов. С помощью этих источников снимают амплитудно-частотные и переходные характеристики различных устройств, имитируют сигналы, поступающие в исследуемую аппаратуру при реальных условиях ее работы. Подобные источники сигналов получили название измерительных генераторов.

Различают генераторы сигналов (ГС) и генераторы стандартных сигналов (ГСС). Последние имеют более высокую стабильность и точность калибровки выходного напряжения или мощности.

### 1.3.1. Генераторы звуковых частот

Генераторами звуковых частот принято называть низкочастотные измерительные генераторы, охватывающие либо диапазон звуковых частот (20 Гц – 20 кГц), либо диапазон звуковых и ультразвуковых частот (20 Гц – 200 кГц).

В измерительной технике с помощью таких генераторов осуществляют испытание и настройку низкочастотных усилителей (НЧ), градуировку электронных вольтметров, измерение частоты методом сравнения и так далее.

Генераторы звуковых и ультразвуковых частот должны генерировать во всем рабочем диапазоне частот сигналы чисто синусоидальной формы, стабильной частоты, постоянного уровня. Они должны иметь небольшое выходное сопротивление, величину которого можно регулировать для согласования с сопротивлением нагрузки.

Тип задающего генератора является основным признаком классификации, и в зависимости от его схемы различают три типа генераторов звуковых частот: *LC*-генераторы, генераторы на биениях и *RC*-генераторы.

*LC*-генераторы. Их задающий генератор представляет самовозбуждающуюся схему с колебательным контуром, состоящим из катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ . Подобные генераторы в НЧ диапазоне применяются весьма редко, так как для получения низких частот требуются большие величины емкостей и индуктивностей. Такие генераторы весьма громоздки и частота их трудно регулируема.

Генераторы на биениях. В них колебания низкой частоты получаются путем смешивания двух близких по частоте высокочастотных колебаний с последующим выделением напряжения разностной частоты колебаний. Таким генератором является ГЗ-18.

К достоинствам этих генераторов относятся плавность перестройки частоты, широкий диапазон частот, постоянство выходной мощности при изменении частоты колебаний. Основной недостаток их – сложность схемы.

*RC*-генераторы. Это наиболее распространенный тип генераторов звуковых частот.

К таким генераторам относятся ГЗ-7А, ГЗ-33, ГЗ-102, ГЗ-112. Задающий генератор представляет собой двухкаскадный резистивный усилитель с положительной обратной связью (рис. 1.1.).

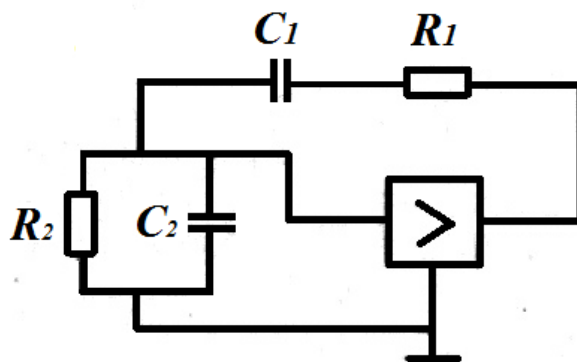


Рис. 1.1. Задающий RC-генератор.

Обычно выбирают  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$ . Условие самовозбуждения для этой схемы выполняется только на частоте  $\omega_0 = 1/RC$ , которая и является частотой гармонических колебаний RC-генератора.

### 1.3.2. Описание генератора ГЗ-7А и работа с ним

Блок-схема генератора типа ГЗ-7А приведена на рис. 1.2. В состав схемы входят: генератор ГЧ, широкополосный усилитель ШУ, ламповый вольтметр ЛВ, аттенюатор напряжения СА и выпрямитель В.

Сигнал с генератора ГЧ, представляющий собой генератор напряжения синусоидальной формы, поступает на широкополосный усилитель ШУ, усиливается им и подводится к гнезду «0-30 В 1000 Ом», напряжение на выходе которого плавно регулируется от 1 до 30 В, а также к гнезду «0-2 В 75 Ом», на котором с помощью ступенчатого аттенюатора СА и плавной регулировки напряжение изменяется от 100 мкВ до 2В.

Значение напряжения на выходе «0-30 В 1000 Ом», а, следовательно, и на входе аттенюатора измеряется ламповым вольтметром ЛВ, стрелочные индикатор которого проградуирован в действующих значениях напряжения с пределами шкал 3-10-30В.

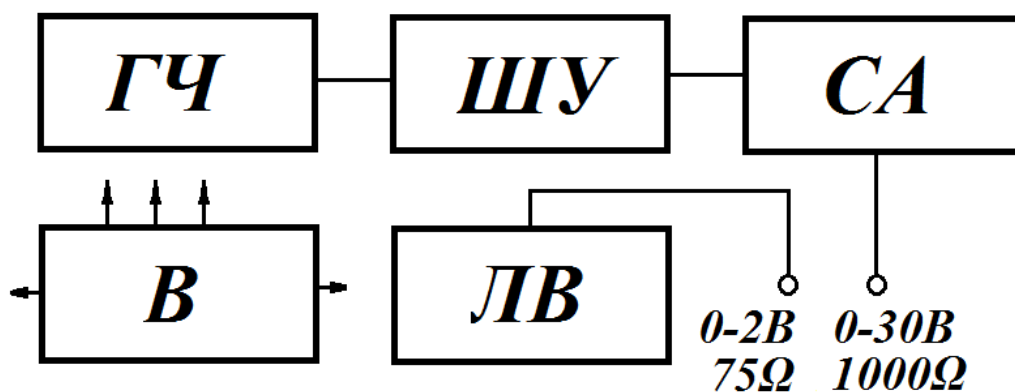


Рис. 1.2. Блок-схема генератора ГЗ-7А.

Ламповые каскады генератора питаются от выпрямителя В, в котором применена электронная стабилизация напряжения питания задающего генератора и широкополосного усилителя.

Конструкция. На переднюю панель выведены ручки управления генератором.

В левой части панели находятся шкала, ручка установки частоты и переключателя диапазонов.

В средней части панели расположены ручки «Установка нуля» (вольтметра), регулировки выходного напряжения «Регулировка выхода» – «Грубо» и «Плавно», переключателя «Пределы вольтметра».

В правой части панели – ручка аттенюатора «Выход», выходные гнезда «0-2 В 75 Ом» и «0-30 В 1000 Ом», тумблер включения питания выходных каскадов генератора «Генератор», тумблер включения сети «Вкл.»

К прибору прилагаются кабель питания для включения прибора в сеть и выходной коаксиальный кабель.

Работа с прибором. Включение и предварительные регулировки. Ручки «Плавно», «Грубо» и «Регулировка выхода» устанавливаются в начальные положения – влево до упора;

Тумблер сети – в нижнее положение;

Тумблер генератор – в нижнее положение;

Ручка «Выход» – в положение «0,0001».

Генератор с помощью шнура питания подключается к питающей сети и выключатель сети устанавливается в положение «Вкл». При этом через некоторое время, необходимое для подогрева ламп, должна загореться сигнальная лампочка.

После прогрева в течение 3 минут следует установить стрелку вольтметра «V» на нулевую риску шкалы при положении переключателя «Пределы вольтметра» – «3 В».

Затем в соответствии с требуемой величиной выходного напряжения используется либо гнездо «0-2 В 75 Ом», либо гнездо «0-30 В 1000 Ом».

При использовании выхода «0-30 В 1000 Ом» производят следующие операции:

1. Переключатель аттенюатора «Выход» устанавливается в положение соответствующей нагрузки:

- «Внутренняя нагрузка 1000 Ом» – при работе на нагрузку, значительно превышающую 1 кОм;
- «Внешняя нагрузка» – при работе на нагрузку около 1000 Ом;

2. Переключатель «Пределы вольтметра» устанавливается в необходимое положение;

3. Переключатель «Диапазон» устанавливается на необходимый диапазон частот. Требуемое значение частоты в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц устанавливается по одной шкале «А» при соответствующем положении переключателя «Диапазоны» – «20-200 Гц», «X10» или «X100»;

4. Тумблер «Генератор» переводится в положение «Вкл»:

5. Ручкой «Частота» устанавливается нужная частота;

6. Ручками «Регулировка выхода» – «Грубо», «Плавно» по шкале лампового вольтметра устанавливается необходимое напряжение на выходе генератора.

При использовании выхода «0-2 В 75 Ом» после предварительных регулировок производят следующие операции:

1. Кабель вставляется в гнездо «0-2 В 75 Ом»;

2. Выполняются предыдущие пункты 2-5;

3. Ручками «Регулировка выхода» - «Грубо», «Плавно» по шкале лампового вольтметра устанавливается необходимое напряжение ступенчатого аттенюатора;

4. Переключатель аттенюатора «Выход» – устанавливается в требуемое положение.

Значение выходного напряжения определяется по формуле:

$$U_{вых} = V * n,$$

где  $V$  – отсчет по вольтметру;  $n$  – установка аттенюатора «Множитель».

Выключение генератора осуществляется в последовательности:

1. Тумблер «Генератор» переводится в нижнее положение;

2. Тумблер «Вкл» устанавливается в положение «Выключено»;

3. Шнур питания отключается от сети.



#### 1.4. Рабочее задание

- 1) Включить генератор и внутренний вольтметр. Дать им прогреться в течение 3х минут.
- 2) Собрать схему, показанную на рисунке 1.3: на ПУЛАРе между клеммами К1 и К2 установить сопротивление 75 Ом (либо 51 Ом – это значение нужно уточнить у преподавателя), между клеммами К1, К3, К5 и К2, К4, К6 – перемычки.

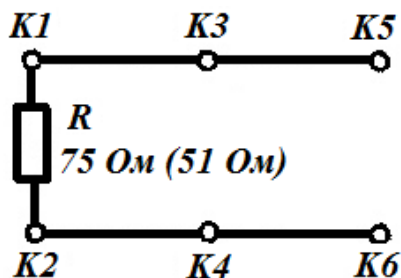


Рис. 1.3. Монтажная схема установки для измерения напряжений.

- 3) Соединить выход генератора кабелем с клеммами К1, К2, причем провод заземления подключить к клемме К2. Проводом заземления (или корпусным) будем считать либо длинный конец кабеля, либо черный при одинаковой длине кабелей.
- 4) Отрегулировать внешний и внутренний вольтметр.
- 5) Подключить внутренний вольтметр к клеммам К3, К4 (при этом корпусный кабель подключаем к клемме К4), внешний вольтметр – к клеммам К5, К6.
- 6) Установить частоту генератора 1000 Гц. Последовательно устанавливая выходное напряжение генератора  $U_0$  по внутреннему вольтметру 0,2; 0,5; 0,8; 1; 1,3; 1,5; 1,8; 2; 2,3; 2,8; 3,5; 4,2 В, проконтролировать его с помощью внешнего электронного вольтметра ( $U_{вн}$ ). Для каждого случая рассчитать абсолютную ( $\Delta A$ ) и относительную ( $\delta$ ) погрешности. Данные привести в виде таблицы 1.1.

Таблица 1.1. Сравнение показаний внешнего и внутреннего вольтметров.

$U_0, В$	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,8	3,5	4,2
$U_{вн}, В$												
$\Delta A, В$												
$\delta$												

- 7) Рассчитать среднеарифметическое значение, абсолютную и относительную среднеквадратичную погрешности измерения напряжения для любого из выше представленных случаев. Для этого нужно 5-7 раз выставить выбранное эталонное значение на внутреннем вольтметре и сравнить его со значением внешнего.
- 8) Установить значение внутреннего вольтметра 2 В. Последовательно устанавливая на генераторе частоты 20; 50; 100; 200; 500 Гц; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100 кГц, сравнить показания внешнего вольтметра с показаниями внутреннего. Результаты измерения должны быть представлены в виде графика в полулогарифмическом масштабе (рис. 1.4)

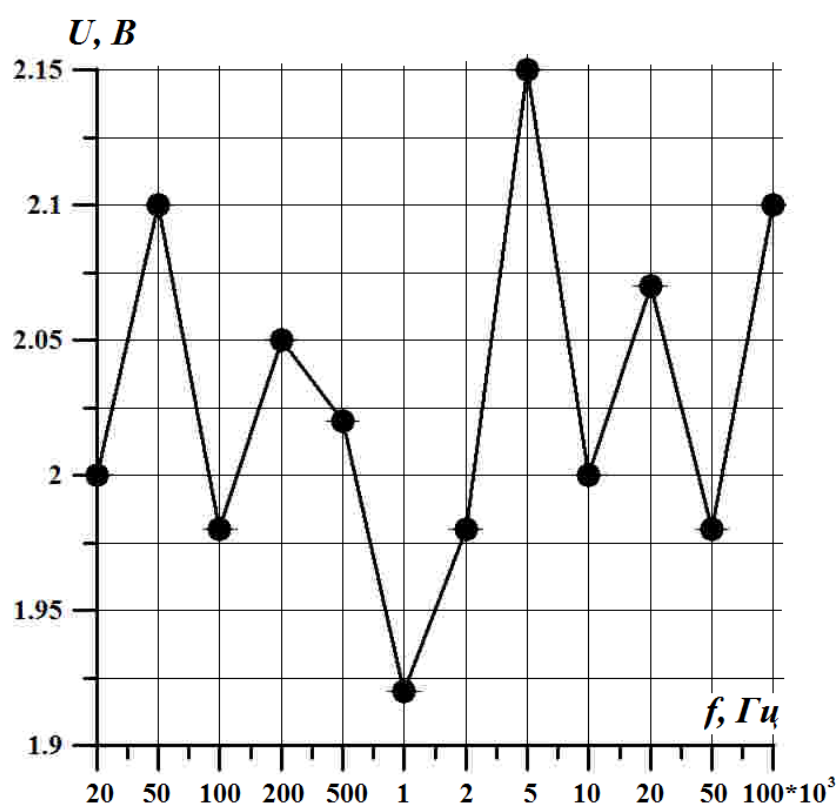


Рис. 1.4. График зависимости напряжения на внешнем вольтметре от частоты в полулогарифмическом масштабе.

- 9) Сформулировать выводы по проведенной работе, которые должны отвечать на следующие вопросы: а) каковы максимальная абсолютная и относительная погрешности измерения напряжения с помощью внешнего вольтметра? б) с чем связана погрешность измерения? в) наблюдается ли зависимость между частотой генератора и показаниями внешнего вольтметра?

## РАБОТА 2

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ЧАСТЬ 2.

Цель работы: освоение методики работы с осциллографом. Проведение измерений сдвига фаз на входе и выходе четырехполюсника.

#### 2. Электронные осциллографы

Основным и наиболее широко применяемым прибором для исследования формы напряжения служит электронный осциллограф. Он отличается большим входным сопротивлением, высокой чувствительностью и универсальностью. **Прибор мощный, высоковольтный!**

##### 2.1. Принцип действия электронного осциллографа

Функциональная схема осциллографа приведена на рис. 2.1. Изображение электрического сигнала на экране осциллографа получается следующим образом.

Исследуемое напряжение является функцией времени, отображаемой в прямоугольных координатах графиком  $U=f(t)$ . Две пары пластин электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) отклоняют электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях, которые можно рассматривать как координатные оси. Для наблюдения на экране ЭЛТ исследуемого напряжения необходимо, чтобы отклонение луча по горизонтальной оси было пропорционально времени, а по вертикальной оси – пропорционально исследуемому напряжению (в каждый момент времени). С этой целью к горизонтально-отклоняющим пластинам подводят пилообразное напряжение, которое заставляет луч перемещаться по горизонтальной оси с постоянной скоростью слева направо и быстро возвращаться обратно. Расстояние, проходимое при этом лучом вдоль горизонтальной оси, получается пропорциональным времени. Если оба отклоняющих напряжения имеют основные и кратные частоты, то на экране образуется неподвижное изображение. Устойчивость изображения на экране обеспечивается синхронизацией частоты развертки с частотой исследуемого процесса.

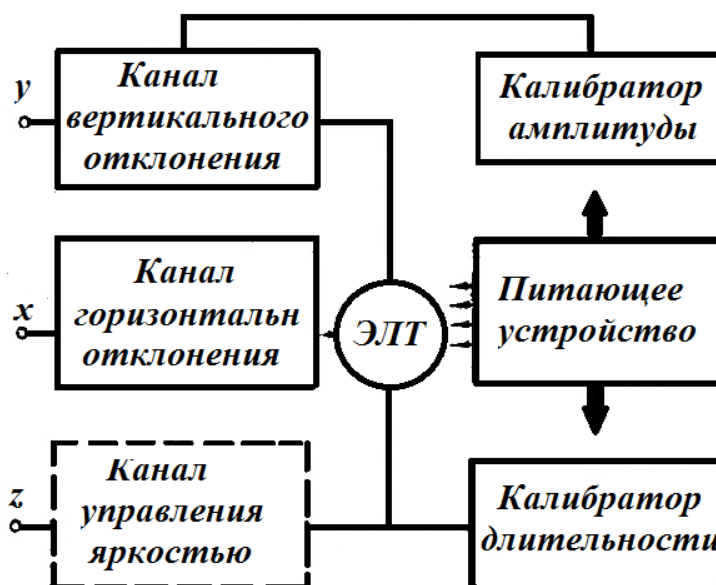


Рис. 2.1. Функциональная схема осциллографа

Для исследования импульсных процессов применяют ждущую развертку, обеспечивающую подачу пилообразного напряжения на отклоняющие пластины только на время действия импульса.

Канал вертикального отклонения служит для преобразования напряжения исследуемого сигнала в соответствующее ему вертикальное отклонение луча.

Канал горизонтального отклонения, или канал развертки, служит для создания и передачи напряжения, вызывающего горизонтальное перемещение луча, пропорциональное времени. Вторая функция этого канала – усиление сигнала, синхронизирующего горизонтальное отклонение.

Канал управления яркостью предназначен для передачи со входа Z на управляющий электрод ЭЛТ сигналов, модулирующих яркость свечения.

Калибраторы применяются для измерения параметров исследуемого сигнала. Как правило, ими являются устройства для измерения амплитуды и длительности сигнала.

Питающее устройство состоит из двух выпрямителей – высоковольтного, питающего высоким напряжением ЭЛТ, и низковольтного, питающего все узлы осциллографа.

## 2.2. Описание аналогового осциллографа С1-20

Осциллограф С1-20 допускает исследование синусоидальных сигналов в диапазоне от 20 Гц до 20 МГц и импульсных с длительностями от 0.05 мкс до 5 мс. Диапазон исследуемых напряжений от 0.03 до 500 В.

Калибратор чувствительности выдает симметричное прямоугольное напряжение (меандр) с частотой 1000-1200 Гц.

Осциллограф имеет 35 калиброванных поддиапазонов развертки от 0.025 мкс/см до 0.02 с. Калибратор длительности развертки представляет собой кварцевый генератор с частотой 100 кГц.

Экран трубки прибора снабжен прозрачной шкалой, разделенной на 4 сантиметровых деления по вертикали и 10 делений по горизонтали. Две крайние горизонтальные линии, расстояние между которыми равно 5 см, служат для калибровки чувствительности по вертикали. Прибор питается от сети переменного тока с частотой  $50 \pm 0.5$  Гц и напряжением  $220 \text{ В} \pm 10\%$ .

### 2.3. Управление осциллографом С1-20

На лицевой панели ручки управления: «Яркость», «Фокус» и «Астигматизм» – служат для установки необходимо яркости и четкости изображения; ручка «Подсвет шкалы» регулирует освещение шкалы экрана. Ручки, обозначенные двусторонними (вертикальной и горизонтальной) стрелками, служат для перемещения изображения по вертикали и горизонтали. Горизонтальная регулировка имеет сдвоенную ручку. Большая ручка служит для грубой установки луча по горизонтальной оси, а малая ручка – для точной установки.

Ручка «Усиление» служит для точной установки калиброванной чувствительности в соответствии со шкалой переключателя «V/см».

Большая ручка «V/см» принадлежит переключателю входного делителя, который имеет 2 положения. Она служит для установки необходимой чувствительности усилителя вертикального отклонения.

Малая цветная ручка, обозначенная снизу на панели надписью «Калибратор V», служит для установки напряжения калибраторов амплитуды в соответствии с ее положением относительно шкалы переключателя «V/см».

Ручка переключателя «Синхронизация» устанавливает вид запуска или синхронизации, а также полярность запускающего сигнала.

Переключатель «Синхронизация» имеет 5 положений: «+» и «-» «Внутр.», «+» и «-» «Внешн.» или «Ус.Х» и пятое положение «Синхр. ВЧ», которое используется для синхронизации высокими частотами (более 5 МГц). При использовании усилителя горизонтального отклонения эта ручка должна быть установлена в положение – «Внешн. Ус. Х».

Тумблер «Калибратор амплитуды» включает калибратор чувствительности усилителя вертикального отклонения. Выходное гнездо калибратора расположено под тумблером.

Тумблер «Калибратор 100 кГц» включает кварцевый генератор, используемый для контроля калибровки шкалы длительности развертки. Выходное гнездо калибратора расположено непосредственно под тумблером.

Длительности развертки устанавливается двумя ручками – «Длительность  $\mu\text{с}/\text{см}$ » и «Множитель». Верхний переключатель имеет 7 положений, обозначенных 0,1; 1; 10; 100; 1К; 2К; 10К. С его помощью устанавливается одна из 7 фиксированных длительностей развертки. Нижний переключатель имеет 6 положений, обозначенных  $\times 0.25$ ;  $\times 0.5$ ;  $\times 1$ ;  $\times 2$ ;  $\times 5$  и «Усил. X».

Действительная длительности развертки равна длительности, установленной верхним переключателе «Длительность  $\mu\text{с}/\text{см}$ », умноженной на коэффициент, установленный переключателем «Множитель». Комбинация различных положений обоих переключателей дает возможность установки 35 фиксированных длительностей развертки.

В положении «Усил. X» нижнего переключателя генератор развертки выключается. Вместо него в работу включается усилитель горизонтального отклонения.

Ручка «Режим запуска» регулирует режим запуска генератора развертки, устанавливая последовательно режим покоя, ждущий или автоколебательный режим развертки.

Ручка «Уровень запуска» регулирует уровень напряжения сигнала запуска, при котором происходит срабатывание генератора развертки и начинается рабочий ход луча по горизонтали.

Тумблер «Сеть» включает питание от сети. Во включенном состоянии тумблера при наличии питания горит расположенная рядом сигнальная лампочка.

Тумблер-переключатель делителя напряжения сигнала, поданного на входное коаксиальное гнездо усилителя горизонтального отклонения (для запуска или усиления), обозначен 1:1 и 1:10.

Два металлических зажима для заземления находятся внизу по краям передней панели.

#### **2.4. Подготовка прибора к работе**

Прибор во время работы должен быть установлен так, чтобы воздух свободно поступал и выходил из него. Сетки воздушных фильтров, расположенные в отверстиях обшивки приборов, не должны быть загрязненными, иначе они будут затруднять свободную циркуляцию воздуха. Перед первым включением прибора необходимо произвести предварительную установку ручек:

«Яркость» – против часовой стрелки до отказа;  
«Фокус» – в среднее положение;  
«Астигматизм» – в среднее положение;  
«Уровень запуска» – в среднее положение;  
«Режим запуска» – против часовой стрелки до отказа;  
«Синхронизация» – «+Внутр.»;  
«Длительности развертки» – 100 мкс/см x 2;  
«Чувствительность В/см» – 1 В/см;  
«Калибратор амплитуды» – 1 В/см;

Тумблеры калибраторов амплитуды и 100 кГц поставить в положение «Выкл».

Для включения прибора необходимо соединить кабель питания с источником переменного тока и тумблер сети поставить в положение «Вкл». При этом сигнальная лампочка должна загореться.

После разогрева в течение двух-трех минут следует отрегулировать яркость так, чтобы пятно было не особенно ярким, но хорошо видимым. Если пятна на экране и при максимальной яркости не будет видно, следует, руководствуясь неоновыми индикаторами луча, переместить луч в пределы экрана с помощью ручек установки по горизонтали.

Внимание! Во избежание прогорания экрана не оставлять яркое пятно долго на одном месте.

Далее необходимо отрегулировать фокусировку с помощью взаимодействия ручек «Фокус» и «Астигматизм» так, чтобы пятно было как можно более круглым, четким и маленьким. Соединить выход «Калибратор амплитуды» со входом Y. Включить тумблер калибратора. На экране установить с помощью ручки «Усиление» штрих величиной 50 мм. Медленно вращать вправо ручку «Режим запуска» до появления изображения развертки по горизонтали. Откорректировать положение ручки «Уровень запуска» и с помощью ручек «Фокус» и «Астигматизм» добиться на экране четкого изображения прямоугольного напряжения калибратора.

После проверки прибора и описанных предварительных регулировок можно приступить к выбору режима работы и проведению необходимых испытаний и измерений.

## **2.5. Работа с прибором**

При выборе режима работы необходимо определить длительность развертки, род запуска, чувствительность усилителя вертикального отклонения. Конкретный выбор условий работы прибора определяется обычно характером и величиной исследуемого напряжения и особенностями

исследуемой схемы. Если параметры исследуемого сигнала неизвестны, то следует путем пробы убедиться, какой режим является лучшим для данного исследования.

Ниже излагаются общие соображения и указания, которыми следует руководствоваться для более полного использования возможностей прибора.

### 2.5.1. Измерение напряжения с помощью осциллографа

Перед измерением амплитуды сигнала необходимо точно откалибровать чувствительность усилителя согласно значению, установленному большой ручкой переключателя «V/cm». Калибровка чувствительности производится с помощью собственного калибратора амплитуды. Выход калибратора соединяется с входным гнездом усилителя.

Калибровку производят следующим образом:

- 1) ручки «Калибратор V» и «V/cm» устанавливаются в положение «I»;
- 2) вход осциллографа соединяют с калибратором амплитуды;
- 3) включают тумблер калибратора амплитуды;

4) устанавливают один из диапазонов развертки, обеспечивающий две параллельные линии изображения прямоугольного напряжения калибратора. Совместными действиями ручек «Усиление» и смещения по вертикали добиваются совпадения на экране двух параллельных линий изображения с крайними линиями шкалы, расположенными по высоте на расстоянии 50 мм.

Для измерения напряжения сигнал подключается ко входу предварительно откалиброванного усилителя. С помощью ручки регулировки положения изображения по вертикали и горизонтали сигнал совмещается с нужными делениями шкалы и измеряется исследуемый размах изображения по вертикали в сантиметрах. Величина исследуемой амплитуды будет равна произведению замеренной величины изображения в сантиметрах, умноженной на цифровую отметку чувствительности, установленную переключателем входного делителя по шкале «V/cm».

При измерении синусоидального напряжения следует учитывать, что осциллографом обычно измеряют двойную амплитуду исследуемого сигнала  $2U_m$ . Исследователя, как правило, интересует величина эффективного значения входного напряжения  $U_{эф} = U_m / \sqrt{2}$ . Для его нахождения необходимо измеренное значение двойной амплитуды разделить на  $2\sqrt{2}$ . Таким образом, итоговая формула для измерения напряжения на осциллографе имеет следующий вид:



$$U_{эф} = \frac{A * мн}{2\sqrt{2}},$$

где  $A$  – амплитуда сигнала (рис 2.2),  $мн$  – цифровая отметка чувствительности, установленная переключателем входного делителя по шкале «V/cm».

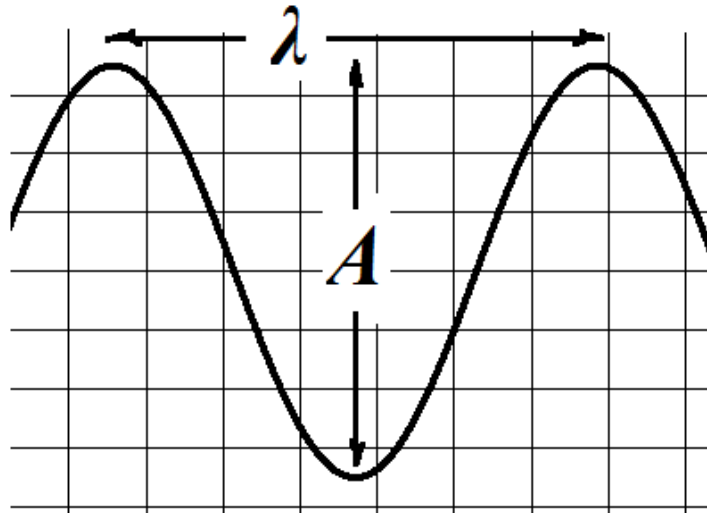


Рис. 2.2. Изображение синусоидального сигнала на экране осциллографа.

Точность измерения амплитуды наибольшая при размахе изображения от 20 до 40 мм. Поэтому необходимо подбирать такой диапазон чувствительности, при котором амплитуда изображения находится в пределах 20-40 мм. Если измеряемое напряжение на экране имеет размах менее 20 мм, то погрешность измерения может увеличиться.

### 2.5.2. Измерение частоты с помощью осциллографа

Измерение временных интервалов. 24 калиброванные фиксированные длительности развертки приборов дают возможность путем измерения расстояния по горизонтальной шкале определять интервалы времени с погрешностью, не превышающей 5% при измеряемом размере изображения от 40 до 90 мм.

Методика измерения следующая: используя деления шкалы, измеряют горизонтальное расстояние между двумя точками, интеграл времени между которыми необходимо найти. При этом измеряемый участок необходимо с помощью ручки перемещения изображения по горизонтали установить в среднюю часть шкалы по возможности симметрично относительно центра экрана.

Измеряемое по шкале расстояние в сантиметрах умножается на цифровое значение индекса установленной длительности развертки на сантиметр, а затем на показания переключателя – «Множитель». Предположим, что верхний переключатель «Длительность  $\mu\text{с}/\text{см}$ » установлен в положение 1 мкс/см, а нижний переключатель – в положение  $\times 0.25$ . В этом случае, если измеренное по шкале расстояние равно 5.3 см, то длительность равна  $5.3 \times 1 \times 0.25 = 1.32$  мкс.

Точность измерения временных интервалов увеличивается при увеличении длины измеряемого расстояния на экране электронно-лучевой трубки (но не более 90 мм), поэтому при измерениях необходимо правильно выбирать рабочую длительность развертки.

Измерение частоты. Рассмотренным методом можно измерить период  $T$  периодических сигналов, а зная его длительность, определить частоту сигнала:  $f = 1/T$ . Тогда итоговая формула для измерения частоты сигнала будет иметь следующий вид:

$$f = \frac{1}{\lambda * \text{дл} * \text{мн}},$$

где  $\lambda$  – длина волны (рис. 2.2),  $\text{дл}$  – положение переключателя «Длительность  $\mu\text{с}/\text{см}$ » ( $\mu\text{с}$  – микросекунда),  $\text{мн}$  – положение нижнего переключателя «Развертка».

### 2.5.3. Измерение фазы с помощью осциллографа

Осциллограф дает возможность измерения фазового угла между двумя сигналами. Фазовый угол измеряется непосредственно на экране электронно-лучевой трубки. Если подобрать длительность развертки так, чтобы один период синусоидального сигнала, соответствующий  $360^\circ$ , занимал длину, например, 9 см, то на каждый сантиметр шкалы будет приходиться  $40^\circ$ . Измеряя расстояние в сантиметрах между соответствующими точками изображений двух фаз и умножая его на число градусов, приходящихся на один сантиметр развертки, получим искомый сдвиг фаз в градусах:

$$\frac{x}{360^\circ} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \rightarrow x = \frac{360^\circ * \Delta\lambda}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $\Delta\lambda$  – сдвиг волны (рис. 2.3).

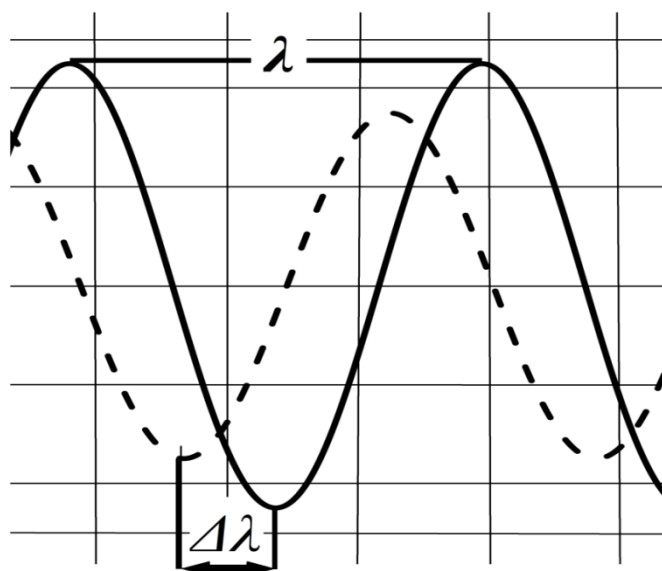


Рис. 2.3. Измерение фазового сдвига сигнала

## 2.6. Описание цифрового осциллографа DSO5102P

Модель DSO5102P представляет собой настольный, цифровой (DSO — Digital Storage Oscilloscope), запоминающий 2-канальный прибор для наблюдения, записи и анализа электрического сигнала с дальнейшим преобразованием в цифровой форме на экран в виде осциллограммы. Осциллограф 5102P исследует форму напряжения во времени и определяет процессы, происходящие в цепи, измеряет такие параметры, как: напряжение; ток; частота; угол сдвига фаз.

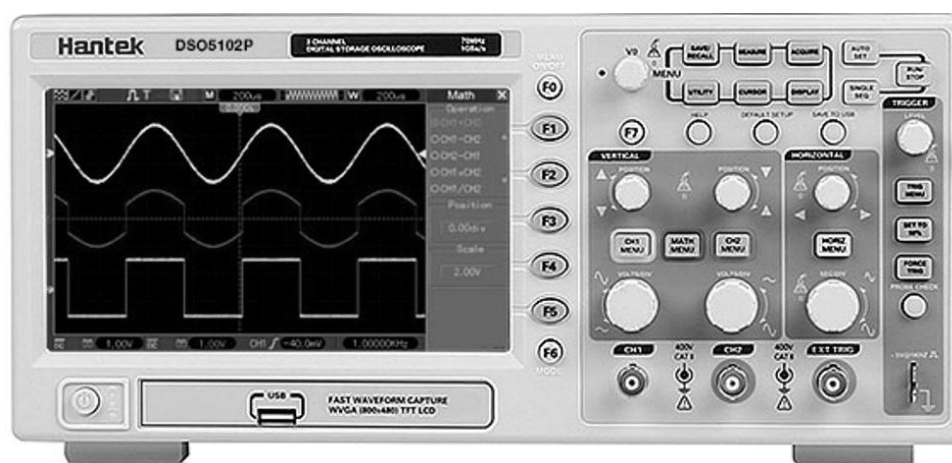


Рис. 2.4 Внешний вид осциллографа DSO5102P

Прецизионная диагностика сигналов проводится в полосе пропускания шириной 100 МГц со скоростью выборки до 1 млрд. замеров в секунду в режиме текущего времени и до 25 млрд. замеров в секунду в режиме

эквивалентной дискретизации, что позволяет обеспечивать точность изображения наблюдаемого процесса.

### 2.6.1. Подключение осциллографа DSO5102P

Установите переключатель на щупе на 1X и подключите щуп к Каналу 1 на осциллографе. Сначала выровняйте слот на коннекторе щупа с выступом на BNC-разъеме канала 1 и надавите, чтобы присоединить его; затем поверните вправо, чтобы закрепить щуп на месте; после этого соедините наконечник щупа и контрольный вывод к выходам компенсации щупа PROB COMP. На панели есть отметка Probe COMP ~5V @ 1кГц.



Рис. 2.5 Каналы для подключения осциллографа DSO5102P

### 2.6.2. Наблюдение формы сигнала осциллографа DSO5102P

Нажмите кнопку AUTOSET [АВТОНАСТРОЙКА], и в течение нескольких секунд на дисплее должен появиться прямоугольный сигнал с амплитудой колебаний около 5В при 1кГц. Нажмите кнопку меню канала 1 [CH1 MENU] дважды, чтобы очистить экран. Нажмите кнопку меню канала 2 [CH2 MENU] и повторите шаги 2 и 3, чтобы просмотреть Канал 2.

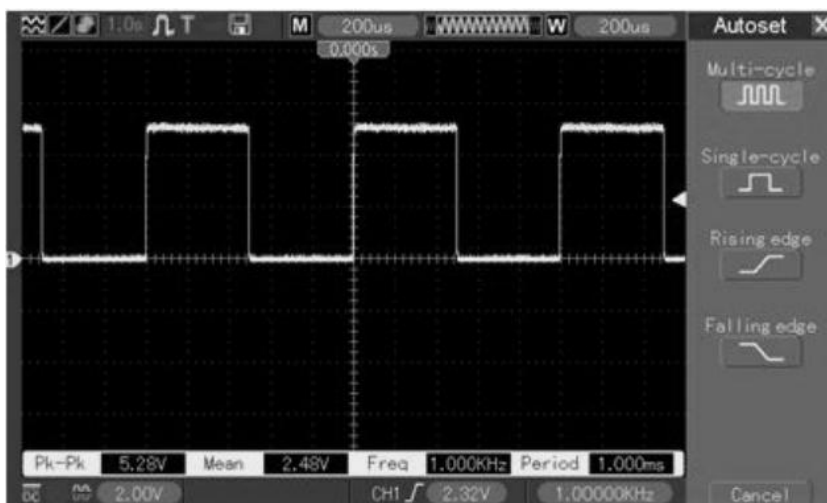


Рис. 2.6 Наблюдение формы прямоугольных импульсов с помощью осциллографа DSO5102P

## **2.7. Выполнение простых измерений с помощью осциллографа DSO5102P**

Для отслеживания неизвестного сигнала в определенной цепи, не имея параметров его амплитуды и частоты, необходимо использовать функцию AUTOSET для выполнения быстрого измерения частоты, периода и полного размаха амплитуды сигнала.

Следуйте процедуре ниже.

1. Установите переключатель на щупе осциллографа на 10X;
2. Нажмите кнопку CH1 MENU и установите угасание щупа на 10X;
3. Подключите щуп CH1 к точке испытания цепи;
4. Нажмите кнопку AUTOSET.

Осциллограф будет автоматически отстраивать осциллограмму для лучшего отображения. Если необходима дальнейшая оптимизация отображения сигнала, то необходимо настраивать вертикальные и горизонтальные показатели, пока осциллограмма не будет отвечать вашим конкретным требованиям.

### **2.7.1. Выполнение автоматических измерений**

Осциллограф DSO5102P может отображать большинство сигналов путем автоматических измерений. Для измерения таких параметров, как частота сигнала, период, амплитуда полного размаха, время нарастания и положительная ширина, следуйте процедуре, описанной ниже.

1. Нажмите кнопку MEASURE, чтобы выйти в меню Measure.
2. Поверните ручку V0, чтобы выбрать первую «неопределенную» опцию (отмеченную красной стрелкой), и затем выйдите в подменю, нажав V0 или F6.
3. Выберите CH1 для опции Source. Затем несколько раз нажмите F3 или F4, чтобы выбрать измеряемые показатели в меню Type. Нажмите назад, чтобы вернуться в интерфейс измерения. Или поверните и нажмите V0, чтобы выбрать измеряемый параметр и вернуться в интерфейс измерения. Соответствующее окошко под измеряемым показателем отображает измерения.
4. Повторите Шаг 2 и Шаг 3. Затем выберите другие измеряемые показатели. Всего может быть отображено 8 измеряемых показателей.

*Примечание: Все показатели меняются с измеряемыми сигналами.*

Рисунок ниже показывает три измеряемых показателя в качестве примера. Окошки под ними отображают измерения крупным шрифтом

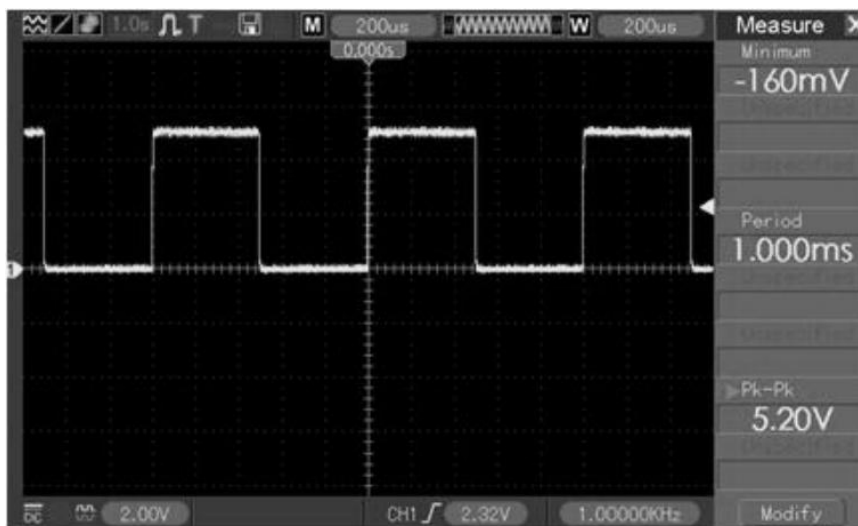


Рис. 2.7. Изменяемые показатели

### 2.7.2. Выполнение измерения курсором

Вы можете использовать курсор для быстрого измерения времени и амплитуды сигнала. Измерения времени цикла (конвертируемого в частоту) и амплитуды на нарастающем фронте импульса. Для измерения времени цикла в нарастающем фронте импульса, следуйте процедуре ниже.

1. Нажмите кнопку CURSOR, чтобы выйти в меню Cursor.
2. Нажмите кнопку F1 опции Type и выберите Time.
3. Нажмите кнопку F2 или F3 опции Source и выберите CH1.
4. Нажмите F4, чтобы выбрать курсор. Если выбран S, передвигайте Курсор S по экрану, вращая V0; если выбран E, передвигайте Курсор E, вращая V0; если выбраны оба, передвигайте их одновременно вращением V0.
5. Установите Курсор S на первый пик цикла.
6. Установите Курсор E на второй пик цикла.
7. Окошко Difference отображает измеренное время, а Cursor S и Cursor E отображают положение этих двух курсоров.
8. Нажмите кнопку опции Type и выберите Voltage.
9. Установите Курсор S в наивысший пик цикла.
10. Установите Курсор E в самый низкий пик цикла. Амплитуда цикла будет отображаться в окошке Difference.

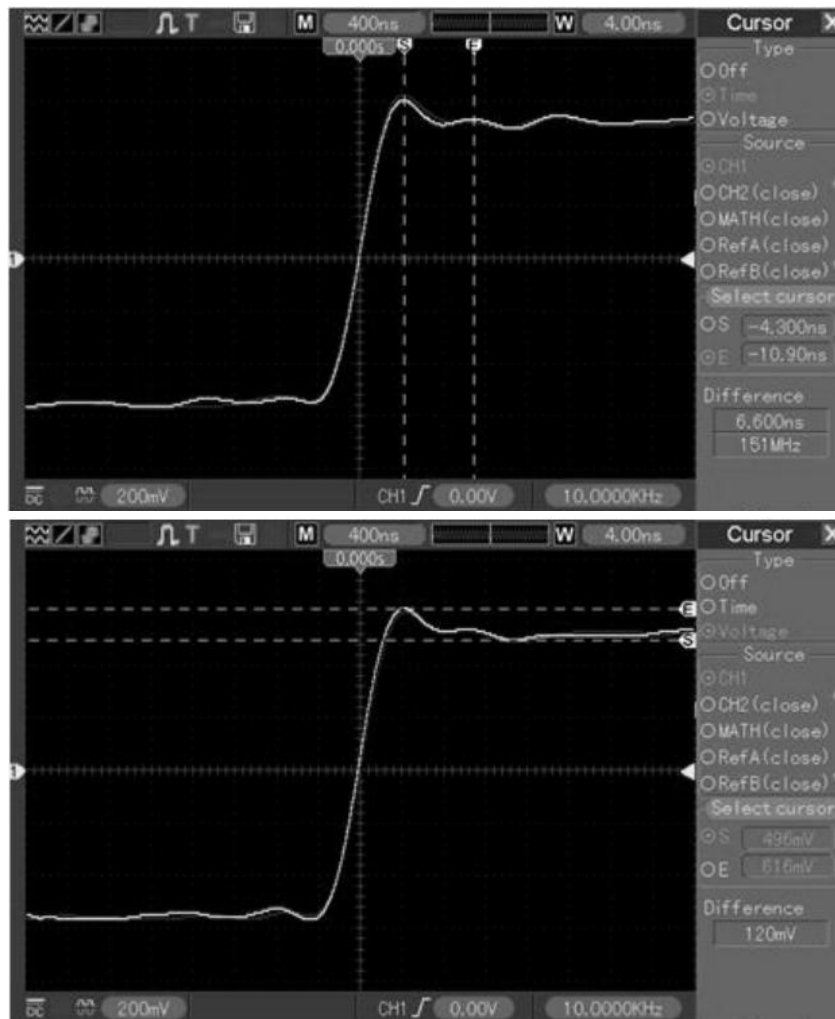


Рис. 2.8. Выполнение измерения курсором

### 2.7.3. Измерение ширины импульса

Для анализа импульсного сигнала, и чтобы узнать его ширину, следуйте шагам ниже.

1. Нажмите кнопку CURSOR, чтобы выйти в меню Cursor.
2. Нажмите кнопку F1 опции Type и выберите Time.
3. Нажмите кнопку F2 или F3 опции Source и выберите CH1.
4. Нажмите F4, чтобы выбрать курсор. Если выбран S, передвигайте Курсор S по экрану, вращая V0; если выбран E, передвигайте Курсор E, вращая V0; если выбраны оба, передвигайте их одновременно вращением V0.
5. Поместите Курсор S на нарастающий фронт импульса, а Курсор E на спадающий фронт.

6. Теперь Difference показывает измеренное время, а Cursor S и Cursor E показывают время относительно триггера.

#### **2.7.4. Измерение времени нарастания импульса**

Вам может понадобиться измерить время нарастания импульса во многих случаях применения, обычно, чтобы измерить время нарастания между уровнями в 10% и 90% импульсного сигнала. Чтобы это выполнить, следуйте шагам ниже.

1. Поверните ручку SEC/DIV, чтобы отобразить возрастающий фронт сигнала.

2. Поверните ручки VOLTS/DIV и Vertical position, чтобы настроить амплитуду сигнала на примерно 5 делений.

3. Нажмите кнопку CH1 MENU.

4. Нажмите кнопку опции VOLTS/DIV и выберите Fine. Поверните ручку Vertical position, чтобы точно разделить осциллограмму на 5 делений.

5. Поверните ручку Vertical position, чтобы отцентровать осциллограмму. Расположите основную линию осциллограммы на 2,5 деления ниже центра координатной сетки.

6. Нажмите кнопку CURSOR.

7. Нажмите кнопку опции Type и выберите Time. Нажмите кнопку опции Source и выберите CH1.

8. Выберите Cursor S и расположите его на уровне 10% сигнала, повернув V0.

9. Выберите Cursor E и расположите его на уровне 90% сигнала, повернув V0. 10. Показатель Delta в меню Cursor отображает время нарастания импульса.





Рис. 2.9. Измерение времени нарастания импульса

## 2.8. Анализ входных сигналов для устранения случайного шума

В определенных обстоятельствах для отображения шумного сигнала на осциллографе и получении его данных, вы можете выполнить следующую процедуру для анализа этого сигнала.

Отслеживание шумного сигнала

1. Войдите в меню Acquire, нажав кнопку ACQUIRE.
2. Нажмите кнопку опции Type и выберите Real Time.
3. Нажмите кнопку опции Peak Detect.
4. Если необходимо, войдите в меню DISPLAY и установите опцию Contrast, чтобы видеть шум более четко.

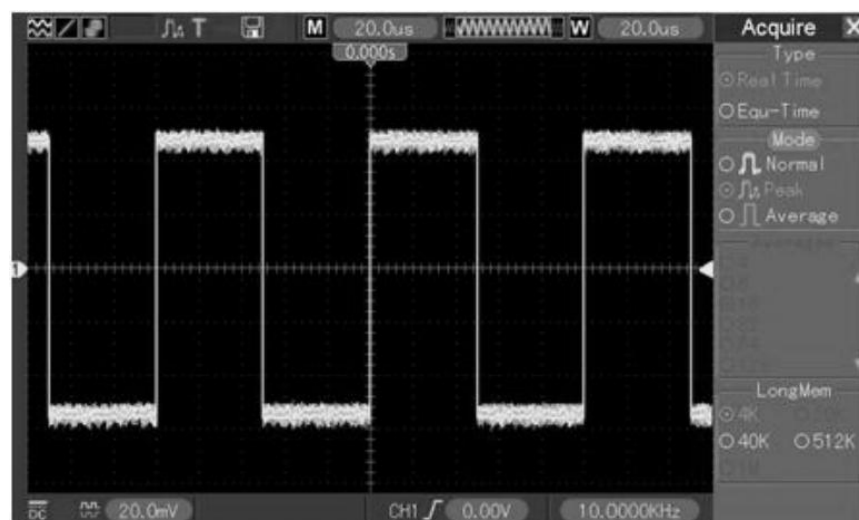


Рис. 2.10 Случайный шум

## Устранение случайного шума

1. Войдите в меню Acquire, нажав кнопку ACQUIRE.
2. Нажмите кнопку опции Type и выберите Real Time.
3. Нажмите кнопку опции Average.
4. Нажмите кнопку опции Average и настройте число проходящих средних значений, чтобы посмотреть изменение отображения осциллограммы.

*Примечание: Усреднение сокращает случайный шум и позволяет легче просмотреть данные сигнала.*

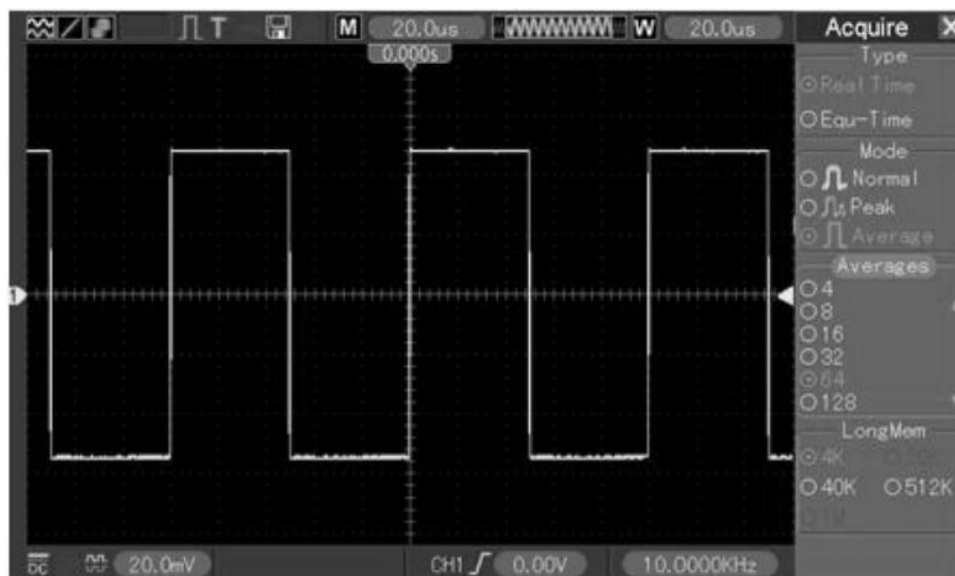


Рис. 2.11 Сигнал после функции усреднения

## 2.9. Использование режима XY

Измерение фазы в сети каналов. Подключите осциллограф к цепи и следите за входом и выходом цепи в режиме XY.

1. Подготовьте два щупа осциллографа и установите переключатели на обоих щупах в положение 10X.
2. Нажмите кнопку CH1 MENU и настройте ослабление щупа на 10x; нажмите кнопку CH2 MENU и установите ослабление щупа на 10X.
3. Подсоедините щуп CH1 к входу сети, а щуп CH2 к выходу сети.
4. Нажмите кнопку AUTOSET.
5. Поверните ручки VOLTS/DIV для отображения сигналов примерно одинаковой амплитуды на каждом канале.
6. Войдите в меню Display, нажав кнопку DISPLAY.

7. Нажмите кнопку опции Format и выберите XY.
8. Теперь осциллограф отображает фигуру Лиссажу, характеризующую вход и выход цепи.
9. Поверните ручки VOLTS/DIV и Vertical Position для соответствующего масштаба отображения осциллограммы.
10. Используйте осциллографический метод Лиссажу, чтобы отслеживать и рассчитывать сдвиги фазы по следующей формуле.

Так как  $\sin\theta=A/B$  или  $C/D$ , где  $\theta$  – это угол сдвига фазы между каналами, а  $A, B, C, D$  представляют то, что показано на рисунке ниже, вы можете подучить значение угла сдвига фазы по формуле:  $\theta=\pm\arcsin(A/B)$  или  $\pm\arcsin(C/D)$ . Если основные оси эллипса находятся в первом и третьем квадранте, угол сдвига фазы должен быть в первом и четвертом квадранте, а именно, в пределах  $(0\sim\pi/2)$  или  $(3\pi/2\sim2\pi)$ . Если основные оси эллипса находятся во втором и четвертом квадранте, угол сдвига фазы должен быть во втором и третьем квадрантах, а именно, в пределах  $(\pi/2\sim\pi)$  или  $(\pi-3\pi/2)$ .

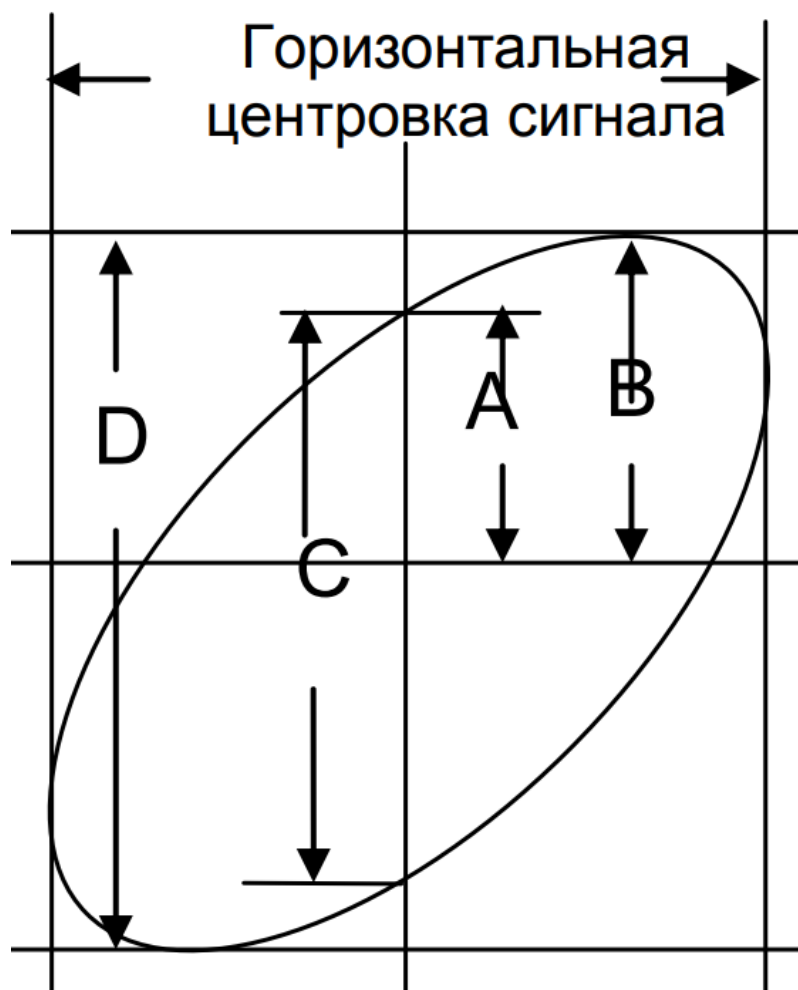


Рис. 2.12. Измерение фазы с помощью фигур Лиссажу

## 2.10. Рабочее задание

- 1) Включить генератор, осциллограф и внутренний вольтметр. Дать им прогреться в течение 3х минут.
- 2) Собрать схему, показанную на рисунке 2.13: на ПУЛАРе между клеммами К1 и К2 установить сопротивление 75 Ом (либо 51 Ом – это значение нужно уточнить у преподавателя), между клеммами К1, К3, К5 и К2, К4, К6 – перемычки.

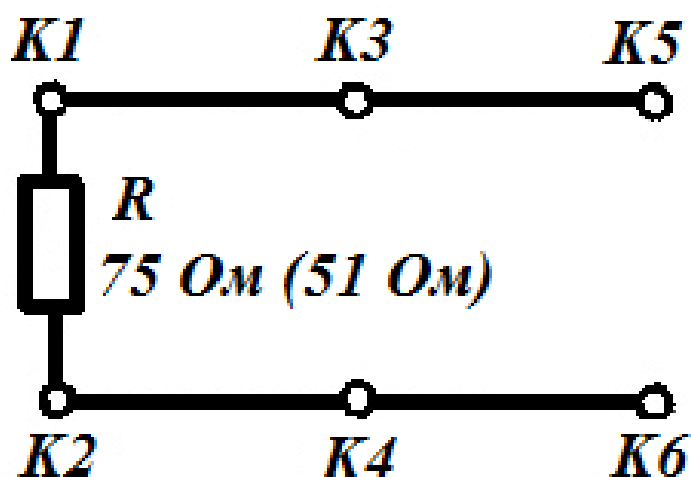


Рис. 2.13. Монтажная схема установки для измерения напряжений.

- 3) Соединить выход генератора кабелем с клеммами К1, К2, причем провод заземления подключить к клемме К2. Проводом заземления (или корпусным) будем считать либо длинный конец кабеля, либо черный при одинаковой длине кабелей.
- 4) Отрегулировать внутренний вольтметр и осциллограф.
- 5) Подключить внутренний вольтметр к клеммам К3, К4 (при этом корпусный кабель подключаем к клемме К4), вход «У» осциллограф – к клеммам К5, К6.
- 6) Установить частоту генератора 1000 Гц. Последовательно устанавливая выходное напряжение генератора по внутреннему вольтметру ( $U_0$ ) 0,2; 0,5; 0,8; 1; 1,3; 1,5; 1,8; 2; 2,3; 3,2; 3,8; 4,5 В проконтролировать его с помощью осциллографа ( $U_{осц}$ ). Для каждого случая рассчитать абсолютную ( $\Delta A$ ) и относительную ( $\delta$ ) погрешности. Данные привести в виде таблицы 2.1.

Таблица 2.1. Результаты измерения напряжения с помощью осциллографа.

$U_0, \text{В}$	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,8	3,5	4,2
$U_{осц}, \text{В}$												
$\Delta A, \text{В}$												
$\delta$												

- 7) Установить напряжение на внутреннем вольтметре 2 В. Последовательно устанавливая частоту на генераторе  $f_0$  20, 400, 1000, 20000,  $5 \cdot 10^4$ ,  $1 \cdot 10^6$  Гц, искать частоту с помощью осциллографа ( $f_{осц}$ ). Для каждого случая рассчитать абсолютную ( $\Delta A$ ) и относительную ( $\delta$ ) погрешности. Данные привести в виде таблицы.

Таблица 2.2. Результаты измерения частоты с помощью осциллографа

$f_0, \text{Гц}$	20	400	1000	20000	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$
$f_{осц}, \text{Гц}$						
$\Delta A, \text{Гц}$						
$\delta$						

- 8) На частотах 20, 25, 50, 100 кГц оценить погрешность установки частоты генератора путем измерения фигур Лиссажу. Для этого соединить выход калибратора «100 кГц» с входом «Y» осциллографа, а вход «X» подключить к клеммам К3, К4. Ручки «Синхронизация» и «Множитель» установить в положение «Усиление X». Установить ручку «Яркость» в максимальное положение. Вращая ручки «Влево» и «Вправо», добиться появления на экране осциллографа закрашенного прямоугольника. Регулируя мощность сигнала на генераторе и «Калибратор V», добиться, чтобы прямоугольник умещался на экране. Определить появление фигуры Лиссажу, медленно вращая малую ручку частоты генератора, и зафиксировать частоту, на которой она появилась. Сфотографировать полученную фигуру. Прodelать то же самое на оставшихся трех частотах.
- 9) Произвести измерения фазового сдвига сигнала, для чего собрать схему, приведенную на рис. 2.5. Подать на клеммы К1, К2 сигнал с генератора амплитудой 2 В (частота сигнала и параметры элементов

Ри С выбираются из таблицы 2.3, исходя из номера стола, за которым выполняется работа). Произвести измерения методом линейной развертки, описанной в пункте 2.5.3. Для этого вход «Y» осциллографа подключить к клеммам К5, К6. Вход «X» осциллографа перемещать с клеммы К3 на клемму К7. Ручку «Синхронизация» перевести в положение «Внешн». Величину фазового сдвига сравнить с величиной, измеренной теоретически по формуле:

$$tg\varphi = \frac{1}{\omega RC},$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

10)\* Провести измерения фазового сдвига с помощью осциллографа DSO 5102P.

11) Сделать выводы по проведенной работе, которые должны содержать ответы на следующие вопросы: а) каковы максимальные погрешности измерения напряжения и частоты с помощью осциллографа? б) как по внешнему виду фигур Лиссажу можно определить, на какой частоте они были получены? в) какова погрешность измерения фазового сдвига с помощью осциллографа по сравнению с теоретической? г) с чем связаны полученные в работе погрешности?

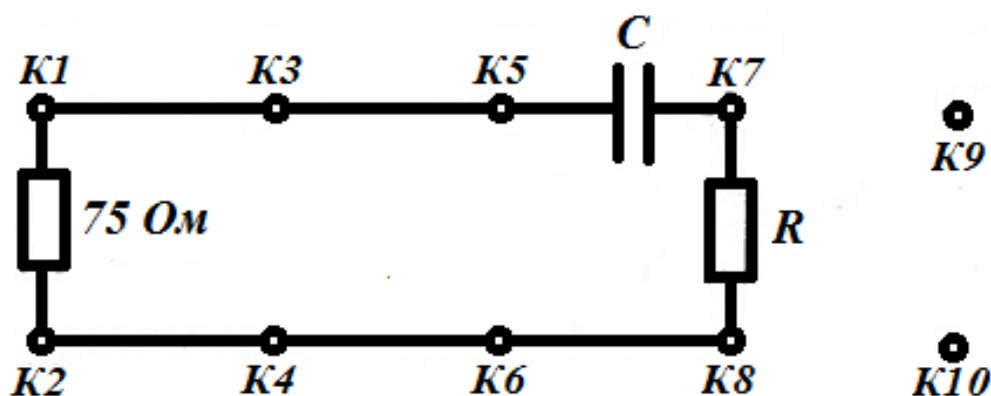


Рис. 2.5. Монтажная схема установки для измерения сдвига фазы

\* Задание для студентов физического факультета

Таблица 2.3. Таблица вариантов.

Задание	R, кОм	C		f, кГц
		пФ	мкФ	
1	1	-	0.022	12.5
2	1	-	0.01	16.0
3	1	-	0.01	9.2
4	2	-	0.01	13.7
5	2	4700	-	17.0
6	2	4700	-	9.8
7	3	-	0.01	9.2
8	3	4700	-	11.3

## РАБОТА 3

### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: ознакомление с основными понятиями теории линейных электрических цепей. Освоение расчета токов и напряжений по методам контурных токов и узловых напряжений.

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

##### 3.1.1. Основные понятия и законы электрических цепей

Электрическое напряжение определяется как разность потенциалов между соответствующими узлами электрической цепи. Поэтому если потенциал некоторого узла равен  $V_k$ , а потенциал другого узла этой же цепи равен  $V_l$ , можно записать:

$$U_{kl} = V_k - V_l,$$

или

$$U_{lk} = V_l - V_k.$$

При этом величины  $U_{kl}$  и  $U_{lk}$  отличаются только знаками. В последующем примем, что при графическом изображении электрических цепей положительное направление напряжения соответствует направлению от высокого потенциала к низкому. Положительное направление тока также соответствует направлению от высокого потенциала такой цепи к низкому.

При расчете токов и напряжений в реальных электрических цепях эта цепь заменяется некоторой идеализированной цепью из того или иного числа элементов. Токи и напряжения на элементах пренебрежимо мало отличаются от токов и напряжений в исходной цепи. Такую идеализированную цепь называют моделью реальной электрической цепи. Графическое изображение модели исходной цепи называют схемой замещения, или схемой цепи, в которой соединительные провода изображаются линиями. При этом считается, что соединительные провода не оказывают влияния на свойства модели цепи как имеющие нулевое сопротивление. Узел – это соединение нескольких элементов электрической цепи (соединение двух элементов – просто узел, а трех и более элементов – сложный узел). Ветвь – это часть электрической цепи между двумя узлами, которая обменивается энергией с остальной частью цепи через посредство этих узлов.



Сложной электрической цепью, называется такая цепь, которую нельзя свести путем эквивалентного преобразования к последовательному или параллельному соединению ветвей, содержащих элементы.

В основе методов расчета электрических цепей лежат законы, установленные Кирхгофом опытным путем. Первый из этих законов, отражающий принцип непрерывности токов, гласит: алгебраическая сумма мгновенных значений токов в любом узле электрической цепи и задающих токов, подключенных к нему источников, равна нулю. Общее число независимых уравнений, которое можно составить по первому закону Кирхгофа для заданной цепи, на единицу меньше числа узлов цепи ( $N_y - 1$ ). Можно считать, что резистор по своим свойствам не отличается от элемента активного сопротивления с сопротивлением  $R$  или проводимостью  $G = 1/R$ . На основе этого закона можно заменить цепь, состоящую из параллельного соединения элементов с активными проводимостями  $G_1, G_2, \dots, G_n$  эквивалентной цепью с проводимостью  $G = G_1 + \dots + G_n$ .

Второй закон Кирхгофа, отражающий закон сохранения энергии, сводится к следующему: алгебраическая сумма мгновенных значений напряжений в любом замкнутом контуре цепи равна алгебраической сумме ЭДС его источников напряжения. Общее число независимых уравнений, которое можно составить по второму закону Кирхгофа, на единицу больше разности числа ветвей и узлов ( $N_b - N_y + 1$ ). В случае последовательного соединения, например, активных сопротивлений  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , образующих контур, на основании второго закона Кирхгофа имеем эквивалентное активное сопротивление:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

Уравнения и соотношения, характеризующие электрические цепи, можно разбить на две группы, которые включают в себя соответственно источники тока и источники напряжения.

### Уравнения подобных электрических цепей

#### Уравнения Кирхгофа

1-я группа

$$\sum_{k=1}^n i_k + \sum_{k=1}^l J_k = 0$$

2-я группа

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{k=1}^p e_k$$

#### Уравнения пассивных элементов

$$i = Gu$$

$$u = Ri$$

$$i = C \frac{du}{dt}$$

$$u = L \frac{di}{dt}$$

$$i = \frac{1}{L} \int u dt$$

$$u = \frac{1}{C} \int i dt$$

#### Уравнения источников

$$j = j(t)$$

$$e = e(t)$$

$$G_{\text{вн}} = 0$$

$$R_{\text{вн}} = 0$$

Уравнения подобных электрических цепей сходны по форме и отличаются лишь обозначениями переменных и коэффициентов уравнений. Эти цепи называют дуальными. “Сходные” величины в уравнениях дуальных цепей называют дуальными величинами.

#### Дуальные величины

##### 1-я группа

##### 2-я группа

Ток –  $i$

Напряжение –  $u$

Напряжение –  $u$

Ток –  $i$

Активная проводимость –  $G$

Активное сопротивление –  $R$

Емкость –  $C$

Индуктивность –  $L$

Индуктивность –  $L$

Емкость –  $C$

Задающий ток –  $j$

Электродвижущая сила –  $e$

Принцип дуальности состоит в следующем: если какие-либо положения, теоремы и зависимости, верны для некоторой электрической цепи, то они будут верны и в дуальной электрической цепи. Например, последовательное (параллельное) соединение элементов в исходной электрической цепи переходит в параллельное (последовательное) соединение дуальных элементов в дуальной электрической цепи.

При анализе линейных цепей используется принцип суперпозиции (наложения), который вводится следующим образом. Напряжения и токи в электрической цепи можно рассматривать как “реакцию”, или “отклик” цепи на приложенное к ней воздействие. В линейных электрических цепях реакция пропорциональна воздействию. В соответствии с этим принципом реакция линейной электрической цепи на совокупность воздействий равна сумме реакций, вызываемых в той же цепи каждым из воздействий в отдельности.

Установившиеся состояния в линейных электрических цепях при гармоническом воздействии описываются уравнениями Кирхгофа, которые в символической форме могут быть записаны в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^n I_k + \sum_{k=1}^p Y_k = 0 \qquad \sum_{k=1}^m J_k R_k = \sum_{k=1}^l \varepsilon_k$$

$J_k$  – значение тока на сопротивлении  $k$  (всего их  $n$  штук);

$Y_k$  – значение задающего тока  $k$  (всего их  $p$  штук);

$R_k$  – полное сопротивление  $k$ -й ветви (всего  $m$  штук);

$\varepsilon_k$  – значение  $k$ -й электродвижущей силы (всего  $l$  штук).

Зная токи, проходящие через любую ветвь цепи, можно найти как напряжение на зажимах этой ветви, так и напряжение между любой парой узлов цепи, для чего следует взять алгебраическую сумму напряжений на ветвях, соединяющих эти узлы.

Метод расчета электрических цепей, когда неизвестными, подлежащими определению, являются токи в ветвях цепи, называют методом токов ветвей. Иногда его называют также методом уравнений Кирхгофа. Пусть цепь содержит  $N_B$  ветвей, включая и источники напряжений, и  $N_y$  узлов. Положим, что в цепи отсутствуют источники токов. Зададим произвольно направления токов в ветвях цепи и перенумеруем эти токи в произвольном порядке. Тогда по первому закону Кирхгофа можно составить для  $N_y - 1$  независимых узлов цепи такое же число уравнений относительно токов элементов. По второму закону Кирхгофа можно составить  $N_B - N_y + 1$  независимое уравнение. В эти уравнения будут входить как значения электродвижущих сил источников напряжений, так и падения напряжений на ветвях, пропорциональных протекающим через эти ветви токам. Следовательно, получаем совокупность уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, из которых вычисляем токи в ветвях цепи.

Если в результате расчета значение одного или значения нескольких токов имеют знак минус, то выбранные направления этих токов надо сменить на противоположные. Дуальным по отношению к изложенному методу токов ветвей является метод напряжений на зажимах ветвей. Здесь неизвестными, подлежащими определению, являются напряжения на зажимах ветвей цепи, зная которые, можно найти токи в ветвях цепи и напряжения между любой парой узлов цепи. Использование этих методов расчета электрических цепей приводит к максимальному числу уравнений и соответственно к громоздким вычислениям, затрудняет подготовку программ для расчетов на цифровых вычислительных машинах, поэтому на практике для расчета линейных цепей используются другие методы изложенные ниже.

### 3.1.2. Метод контурных токов

В случае, когда электрическая цепь содержит только источники напряжения и не имеет пересекающихся ветвей, токи в такой цепи целесообразно определять по методу контурных токов, представляющих собой математическую абстракцию. Применение этого метода предпочтительно, когда число узлов цепи превышает число ее контуров.

На рис. 3.1 изображена электрическая цепь с отмеченными контурами 1, 2 и контурными токами  $J_1, J_2$ , которые соответственно в элементах с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  совпадают с истинными токами, а в элементе с сопротивлением  $R_3$  ток равен разности контурных токов  $J_1 - J_2$ . Направления контурных токов обычно выбираются одинаковыми, например, по часовой стрелке.

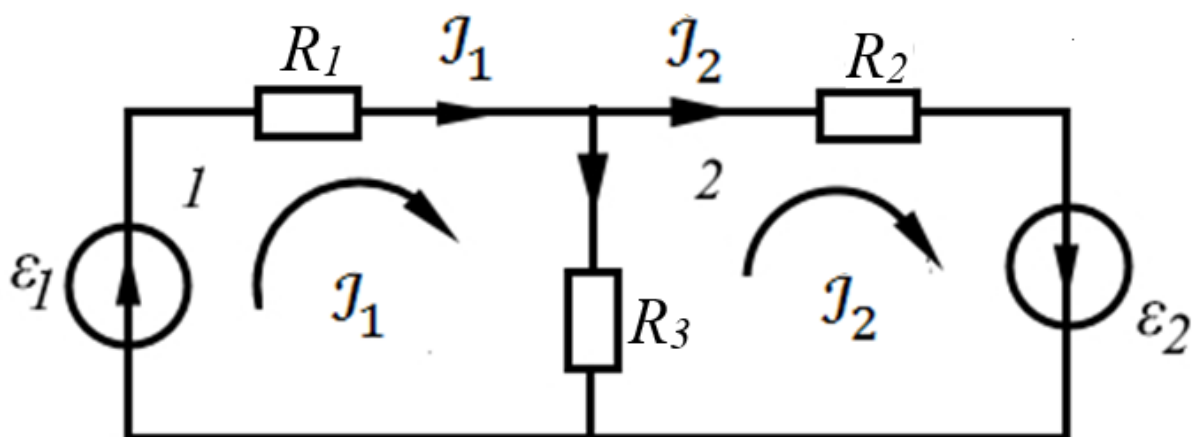


Рис. 3.1. Электрические цепи: контурные токи

Для первого контура, также при обходе по часовой стрелке, согласно второму закону Кирхгофа имеем

$$R_1 J_1 + R_3 (J_1 - J_2) = \varepsilon_1,$$

или

$$R_{11} J_1 + R_{12} J_2 = \varepsilon_1, \quad (3.1)$$

где  $R_{11} = R_1 + R_3$  – условно называемое собственным полное сопротивление первого контура, равное сумме сопротивлений, входящих в первый контур;  $R_{12} = -R_3$  – взаимное сопротивление между первым и вторым контурами.

Для второго контура, также при обходе его по часовой стрелке, получаем:

$$R_2 J_2 + R_3 (J_2 - J_1) = \varepsilon_2,$$

или

$$R_{21} J_1 + R_{22} J_2 = \varepsilon_2 \quad (3.2)$$

где  $R_{22} = R_2 + R_3$  – условно называемое собственным полное сопротивление второго контура, равное сумме полных сопротивлений, входящих во второй контур;

$R_{21} = -R_3$  – взаимное полное сопротивление между вторым и первым контурами.

В силу непрерывности контурных токов первый закон Кирхгофа, в узлах выполняется автоматически.

Решение системы уравнений (3.1) и (3.2) по правилу Крамера для первого и второго контурных токов, имеет вид

$$J_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} \text{ и } J_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}.$$

В этом выражении

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{vmatrix} = R_{11} R_{22} - R_{12} R_{21}$$

представляет собой определитель этой системы уравнений, а

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & R_{12} \\ \varepsilon_2 & R_{22} \end{vmatrix} = \varepsilon_1 R_{22} - \varepsilon_2 R_{12}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} R_{11} & \varepsilon_1 \\ R_{12} & \varepsilon_2 \end{vmatrix} = \varepsilon_2 R_{11} - \varepsilon_1 R_{12},$$

определители, получаемые заменой столбца коэффициентов при определяемом неизвестном свободными членами.

В результате значения токов в ветвях рассматриваемой цепи могут быть вычислены из следующих выражений:

$$J_{R1} = J_1, \quad J_{R2} = J_2, \quad J_{R3} = J_1 - J_2 .$$

Для сокращения записи этой системы уравнений введем матрицы. Так, для рассматриваемой схемы имеем

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix}, \quad J = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix},$$

где  $R$  – квадратная матрица сопротивлений электрической цепи порядка  $2 \times 2$ ;  $J$  – матрица-столбец контурных токов, называемая искомым вектором, порядка  $1 \times 2$ ;

$E$  – матрица-столбец электродвижущих сил источников напряжения, называемая задающим вектором, порядка  $1 \times 2$ .

С учетом введенных обозначений матричное уравнение электрической цепи примет вид

$$J \times R = E . \quad (3.3)$$

Если электрическая цепь содержит  $n$  независимых контуров, то матрицы последнего уравнения имеют вид

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & \dots & R_{2n} \\ R_{n1} & \dots & R_{nn} \end{pmatrix} \quad J = \begin{pmatrix} J_1 \\ \dots \\ J_n \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \dots \\ \varepsilon_{nn} \end{pmatrix}$$

где  $\varepsilon_{kk}$  – алгебраическая сумма электродвижущих сил источников напряжения входящих в  $k$ -й контур.

Для решения подобных алгебраических уравнений используются стандартные программы (например, Wolfram и MathCAD), и задача сводится только к вводу коэффициентов матриц сопротивлений и задающего вектора. Также можно воспользоваться интернет-сайтами, введя поисковый запрос «решить систему уравнений онлайн».

### 3.1.3. Метод узловых напряжений

Если электрическая цепь содержит только источники тока, напряжения между узлами целесообразно определять по методу узловых напряжений, также представляющих собой математическую абстракцию.

При этом один из узлов принимается за опорный, обычно тот, к которому присоединено наибольшее количество элементов, и напряжения в узлах отсчитываются относительно опорного узла.

В качестве примера рассмотрим электрическую цепь, приведенную на рис. 3.2а. Очевидно, эта цепь эквивалентна электрической цепи, показанной на рис. 3.1 при выполнении следующих соотношений:

$$J_1 = \frac{\varepsilon_1}{R_1}, J_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2}, G_1 = \frac{1}{R_1}, G_2 = \frac{1}{R_2}, G_3 = \frac{1}{R_3}.$$

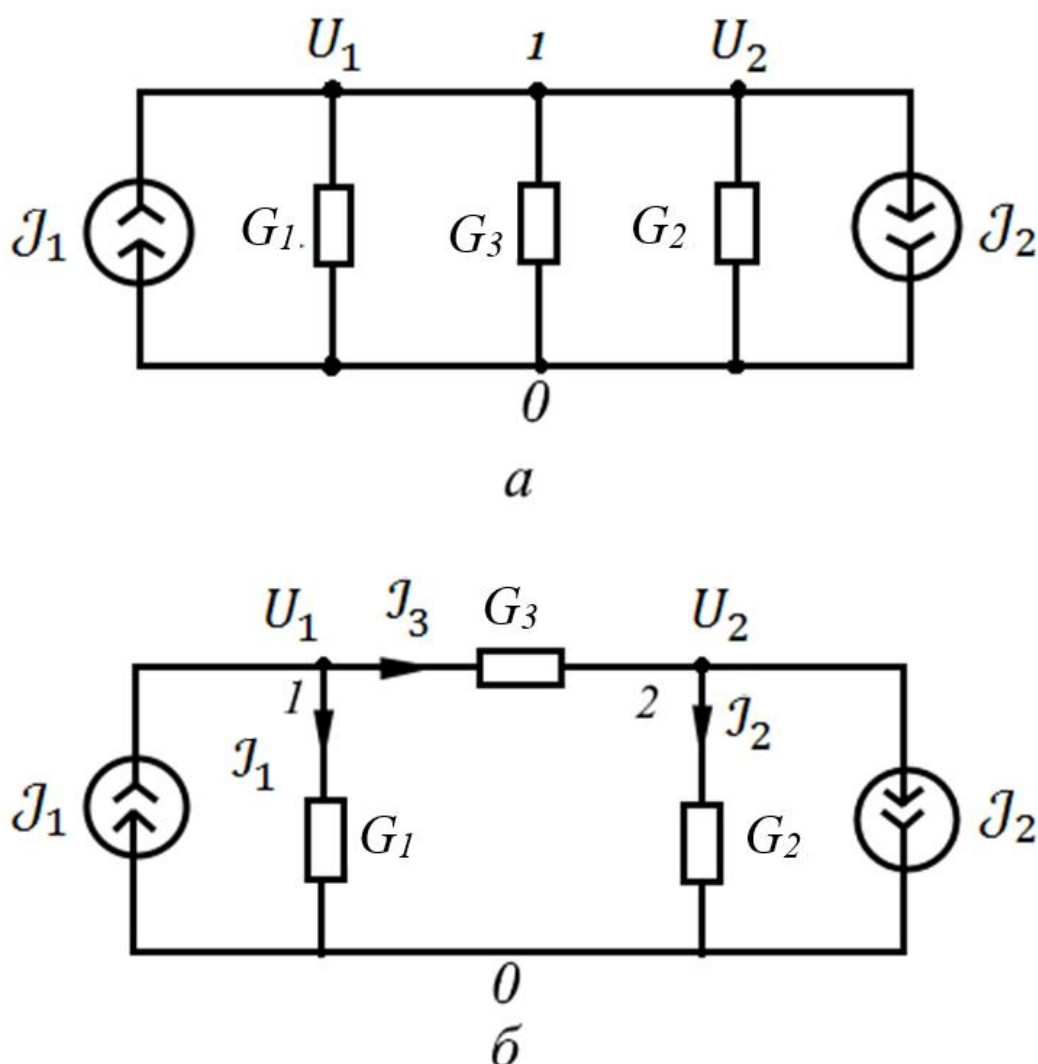


Рис. 3.2. а) Переход от источников напряжения к эквивалентным источникам тока; б) узловые напряжения.

Использование этих соотношений позволяет осуществить переход от источников напряжений к эквивалентным источникам токов. Однако для

идеальных источников, то есть при  $R_1 = 0; R_2 = 0$ , такой переход невозможен, так как будет иметь место деления на нуль.

Для рассматриваемой схемы (рис. 3.2,а), согласно первому закону Кирхгофа, имеем

$$U_1(G_1 + G_2 + G_3) = J_1 + J_2,$$

откуда

$$U_1 = \frac{J_1 + J_2}{(G_1 + G_2 + G_3)}, \quad (3.4)$$

а ток, например, в проводимости  $G_3$  равен:

$$J_3 = U_1 G_3 = \frac{U_1}{G_3}.$$

По методу узловых напряжений можно рассчитывать и объемные электрические цепи. Его целесообразно использовать в случае, когда число независимых контуров превышает число независимых узлов.

В электрической цепи, содержащей два независимых узла (рис. 3.2 б), для первого узла по первому закону Кирхгофа можно записать уравнение:

$$G_1 U_1 + G_3 (U_1 - U_2) = J_1,$$

или

$$G_{11} U_1 + G_{12} U_2 = J_1 \quad (3.5)$$

где  $G_{11} = G_1 + G_3$  – условно называемая собственной проводимостью первого узла, равная сумме проводимостей, присоединенных одним зажимом к первому узлу;

$G_{12} = -G_3$  – взаимная проводимость между первым и вторым узлами. Для второго узла, также используя первый закон Кирхгофа, получаем

$$G_2 U_2 + G_3 (U_2 - U_1) = J_2,$$

или

$$G_{21} U_1 + G_{22} U_2 = J_2, \quad (3.6)$$

где  $G_{22} = G_2 + G_3$  – условно называемая собственной проводимостью второго узла, равная сумме комплексных проводимостей, присоединенных одним зажимом ко второму узлу;

$G_{21} = -G_3$  – взаимная проводимость между вторым и первым узлами.



Из уравнений (3.5) и (3.6) можно вычислить значения узлов напряжений и затем определить токи в этой цепи. Например, в элементе с проводимостью  $G_2$  исходной цепи этот ток равен

$$J_2 = G_2 U_2.$$

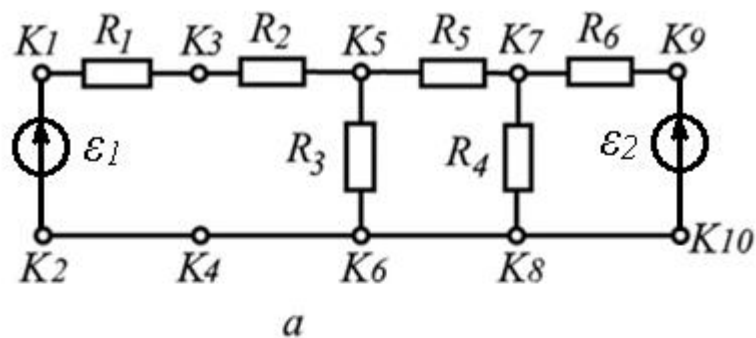
А в элементе с проводимостью  $G_3$

$$J_3 = G_3(U_1 - U_2)$$

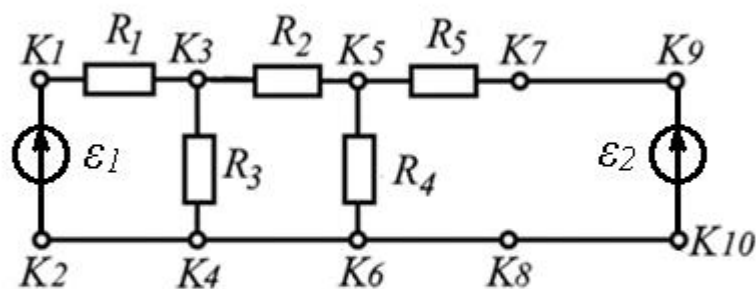
В силу дуального характера записи уравнений, составленных по методам контурных токов и узловых напряжений, для расчета электрической цепи, содержащей  $n$  независимых узлов, можно использовать матричное уравнение (3.3). При замене соответственно сопротивлений на проводимости, контурных токов на узловые напряжения, электродвижущих сил источников напряжений на задающие токи источников тока.

### 3.2. Рабочее задание

1. Рассчитать цепь (рис. 3.3) по методу контурных токов (п. 3.1.2). Принять значение индуктивности катушки, емкостей конденсаторов, активных сопротивлений и частоты генератора по табл. 3.1 в соответствии с номером задания и индексом схемы. Определить силы тока в контурах и падения напряжения на всех элементах.



a



б

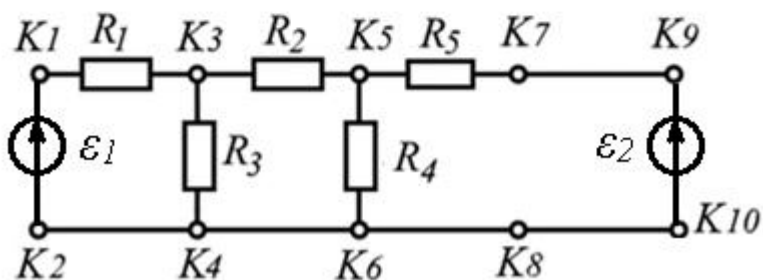


Рис. 3.3. Варианты (а, б, в) электрических цепей.

2. Собрать рассчитанную электрическую цепь на универсальной панели. В качестве примера расположения элементов электрической цепи, собранной по заданию «а» (рис. 3.4), приведена монтажная схема (рис. 3.3). Следует учитывать, что клеммы  $K_1$  и  $K_9$  находятся под гармоническим напряжением, а клеммы  $K_2, K_4, K_6, K_8, K_{10}$  и  $K_{11}$ , соединенные перемычками, имеют нулевой потенциал относительно корпуса универсальной панели.

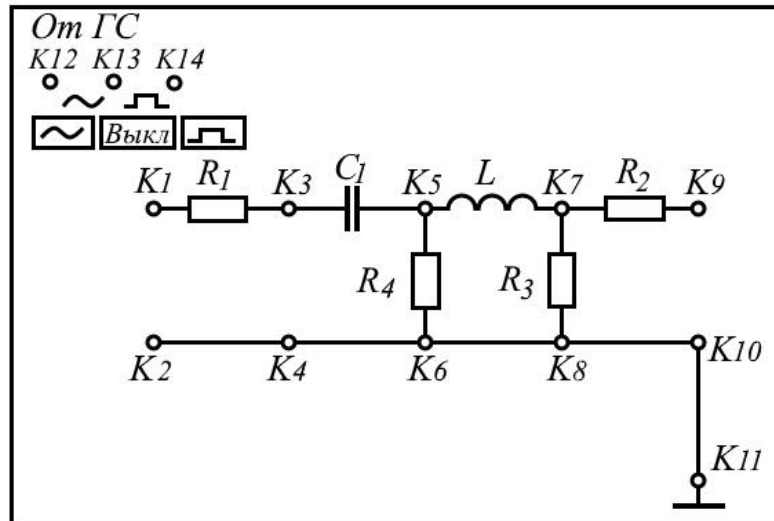


Рис. 3.4. Монтажная схема электрической цепи.

4. Подключить к универсальной панели генератор гармонических колебаний, причём к клемме  $K_{12}$  подключается потенциальный зажим генератора, а к клемме  $K_{13}$  – провод, соединённый с его корпусом. Провод электронного вольтметра, соединённый с его корпусом, подключить к клемме  $K_{11}$ . Клавиша  $\sim$  на универсальной панели нажата.
5. Включить генератор и вольтметр. По шкале генератора установить заданное значение частоты. По вольтметру установить необходимое напряжение источника  $\mathcal{E}_1$ . С этой целью потенциальный зажим вольтметра соединить с клеммой  $K_1$ . Подключая последовательно потенциальный зажим вольтметра к клеммам  $K_3, K_5, K_7, K_9$ , измерить модули узловых потенциалов  $U_{K3}, U_{K5}, U_{K7}$ , а так же напряжение  $U_{K9} = -\mathcal{E}_2$ . Для измерения их фаз, кроме напряжений на клеммах  $K_3, K_5, K_7, K_9$  использовать напряжение на клемме  $K_1$ .
6. Составить сводную таблицу измеренных узловых потенциалов и сопоставить с расчетными значениями.
7. Сделать выводы по проведенной работе.

Таблица 3.1

## Номинальные значения параметров элементов

Задание	Индекс схемы	Частота , кГц	$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , В	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , кОм	$R_4$ , кОм	$R_5$ , кОм	$R_6$ , кОм
1	а	1	5	10	1.5	7.5	3.0	2.0	0.3
2	б	1	5	7.5	1.0	5.1	2.0	3.0	0.75
3	в	1	5	7.5	1.0	5.1	2.0	3.0	0.3
4	б	1	6	7.5	1.5	5.1	2.0	3.0	0.75
5	а	1	6	7.5	1.5	5.1	2.0	3.0	0.3
6	б	1	6	10	1.5	5.1	3.0	2.0	0.75
7	в	1	5	10	1.5	5.1	2.0	3.0	0.3
8	а	1	5	10	1.5	5.1	2.0	3.0	0.75

## Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности линейных электрических цепей?
2. Что называют сложной электрической цепью?
3. Формулировка законов Кирхгофа. Число независимых уравнений.
4. В чем состоят особенности записи законов Кирхгофа в символической форме?
5. В чем состоит метод контурных токов?
6. В чем состоит метод узловых напряжений?

## РАБОТА 4

### АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: ознакомление с двухполюсными элементами электрической цепи. Изучение методики построения векторных диаграмм. Освоение символического метода анализа установившихся процессов в линейных электрических цепях при гармоническом воздействии.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

##### 4.1.1. Элементы электрических цепей

Элементом электрической цепи называется идеализированное устройство, обладающее каким-либо одним из следующих свойств: способностью вносить энергию в электрическую цепь (такие элементы играют роль источников электрической энергии) или ее рассеивать (элемент активного сопротивления), запасать энергию магнитного поля (элемент индуктивности) или электрического (элемент емкости). В дальнейшем для краткости будем опускать полные наименования элементов и называть их, соответственно, источником напряжения, источником тока, активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ . Линейными называются элементы, связь между током и напряжением на которых линейна. В линейной электрической цепи величины  $R$ ,  $L$ ,  $C$  не зависят от протекающих через эти элементы токов и приложенных к ним напряжений. В противном случае электрическая цепь является нелинейной.

Источником напряжения (Рис. 4.1, а) считается такой источник, у которого напряжение на выходных зажимах не зависит от свойств цепи, являющейся внешней по отношению к источнику. Источник напряжения имеет нулевое внутреннее сопротивление и полностью характеризуется законом изменения во времени его ЭДС  $e(t)$ . При гармоническом законе изменения имеем

$$e(t) = \varepsilon_m \cos(\omega t + \Psi_e),$$

где  $\varepsilon_m$  – амплитуда, измеряемая в вольтах;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота, рад/с;

$f$  – частота, измеряемая в герцах;

$\Psi_e$  – начальная фаза, которая может быть принята равной нулю.



Мгновенная мощность электрических колебаний в активном сопротивлении определяется соотношением:

$$p = uj = Rj^2$$

Между напряжением  $U$ , приложенным к линейной индуктивности (рис. 4.1, г) и током  $j$ , проходящим через нее, существует соотношение

$$u = L \frac{dj}{dt},$$

справедливое при условии существования производной. Из него можно получить

$$j = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u dt + j(t_0),$$

где  $t_0$  – значение времени, принятое за начало отсчета;

$j(t_0)$  – начальное значение тока, протекающего через индуктивность.

Полагая, что начальный ток через индуктивность равен нулю, для линейной индуктивности можно принять

$$j = \frac{1}{L} \int u dt.$$

При гармоническом воздействии имеем

$$u = -\omega L J_m \sin \omega t = U_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Следовательно, между амплитудами гармонических напряжений и токов выполняется зависимость

$$U_m = \omega L J_m,$$

а гармонические колебания напряжения на индуктивности опережают по фазе колебания тока в этом элементе на  $\frac{\pi}{2}$ .

Мгновенная мощность колебаний в индуктивности определяется соотношением

$$p = uj = Lj \frac{dj}{dt}$$

и может принимать как положительные значения (энергия накапливается), так и отрицательные (энергия, запасенная ранее в этом элементе, отдается во внешнюю по отношению к нему цепь). Энергия, запасаемая в линейно индуктивности, равна

$$W = l \int \left( j \frac{dj}{dt} \right) dt = L \int_0^j j dj = \frac{Li^2}{2}$$

и всегда положительна.

Напряжение  $U$  на зажимах линейной емкости (рис. 2.1,д) и ток  $j$ , проходящий через нее, связаны между собой соотношением

$$u = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t j dt + u(t_0),$$

где  $t_0$  – значение времени, принятое за начало отсчета;

$u(t_0)$  – начальное напряжение на емкости.

Полагая, что начальное напряжение на емкости равно нулю, для линейной емкости можно принять

$$u = \frac{1}{C} \int j dt.$$

При гармоническом воздействии имеем

$$j = -\omega C U_m \sin \omega t = J_m \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Следовательно, между амплитудами гармонических токов и напряжений имеет место зависимость

$$J_m = \omega C U_m,$$

а гармонические колебания тока, протекающие через емкость, опережают по фазе колебания напряжения на его зажимах на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Мгновенная мощность колебаний в емкости определяется соотношением

$$p = uj = Cu \frac{du}{dt}$$

и может принимать как положительные значения (энергия накапливается), так и отрицательные (энергия, запасенная ранее в этом элементе, отдается во внешнюю по отношению к нему цепь).

Энергия, запасенная в емкости, равна



$$W = C \int_{t_0}^t \left( u \frac{du}{dt} \right) dt = C \int_0^u u du = \frac{Cu^2}{2}$$

и всегда положительна.

#### 4.1.2. Векторные диаграммы электрических цепей

Пусть вектор  $s$ , начало которого совмещено с началом прямоугольной системы координат (рис. 4.2 а), вращается в положительном направлении, то есть против часовой стрелки, с круговой частотой  $\omega$ , причем в каждый данный момент времени значение угла будет равно  $\theta = \omega t + \psi$ . Пусть длина вектора в выбранном масштабе численно равна амплитуде некоторого гармонического колебания. Тогда проекция рассматриваемого вращающегося вектора на ось абсцисс  $s = S_m \cos \theta = S_m \cos(\omega t + \psi)$  будет в том же масштабе численно равна мгновенному значению этого гармонического колебания. Чаще всего изображают положение вектора в момент времени  $t=0$ , когда угол  $\theta$  равен начальной фазе колебаний (рис. 4.2 б).

На одном и том же рисунке можно предоставить не один, а несколько векторов, изображающих в одном и том же масштабе гармонические колебания равных частот в один и тот же момент времени, обычно при  $t=0$ . Такой рисунок, называемый векторной диаграммой, позволяет наглядно судить о соотношении амплитуд и начальных фаз гармонических колебаний в электрической цепи. Кроме того, векторное представление гармонических функций, частота которых одинакова, облегчает операции сложения и вычитания этих функций. В виду того, что сумма проекций двух векторов равна проекции геометрической суммы исходных векторов, амплитуда и начальная фаза результирующего колебания легко находятся из векторной диаграммы геометрическим сложением векторов. Действительно, для двух колебаний, векторы которых  $S_{m1}$  и  $S_{m2}$  изображены на рис.4.2 в, построен и вектор  $S_m$ , являющийся суммой этих векторов. Проекции исходных векторов на координатные оси соответственно равны:

$$\begin{aligned} a_1 &= S_{m1} \cos \psi_1 & B_1 &= S_{m1} \sin \psi_1 \\ a_2 &= S_{m2} \cos \psi_2 & B_2 &= S_{m2} \sin \psi_2 \end{aligned}$$

Проекция на той же оси результирующего вектора составляет:

$$a = a_1 + a_2, \quad b = b_1 + b_2$$

Легко показать, что модуль  $S_m$  и аргумент результирующего вектора определяется из следующих выражений

$$S_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \operatorname{tg} \psi = \frac{b}{a}.$$

Векторная диаграмма соответствует заданному значению частоты. Если в той же электрической цепи возбудить гармонические колебания иной частоты, то все построения необходимо выполнить заново. Обычно на векторной диаграмме длины векторов выбирают равными действующим (эффективным) значениям, которые для гармонических колебаний в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных.

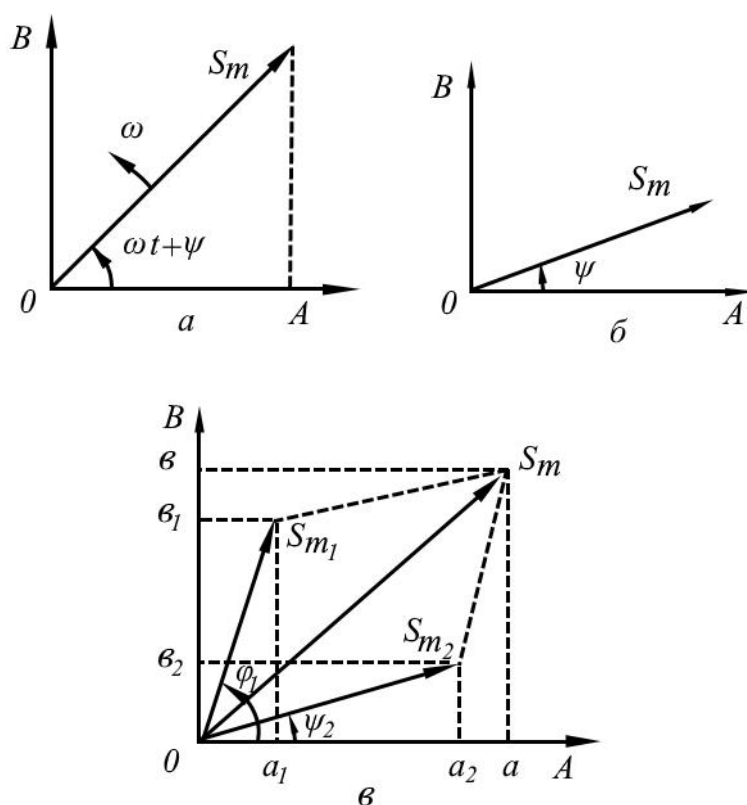


Рис. 4.2. Векторное представление гармонических функций: а) вращающийся вектор, б) вектор в начальный момент времени, в) суммирование векторов

На рисунке 4.3 а приведена электрическая цепь, содержащая источник гармонического напряжения и последовательно соединенные активное сопротивление, индуктивность и емкость. Очевидно, сумма мгновенных значений падений напряжения на элементах равна электродвижущей силе источника, то есть  $U_{R1} + U_{L1} + U_{C1} = \varepsilon_1$ . В такой цепи ток является общим, поэтому при построении векторной диаграммы (Рис 4.3 б) направление

вектора этого тока  $J$  выбирают за основу и проводят обычно в направлении оси абсцисс. Направление вектора падения напряжения на активном сопротивлении  $U_{R1}$  совпадает с направлением вектора тока. Направление вектора падения напряжения на индуктивности  $U_{L1}$  опережает направление тока на  $\frac{\pi}{2}$ , то есть сдвинуто против часовой стрелки на прямой угол. Направление вектора падения напряжения на емкости  $U_{C1}$  отстает от направления тока на  $\frac{\pi}{2}$ . Вектор электродвижущей силы источника напряжения  $\varepsilon$  является результирующим и сдвинут относительно вектора тока на угол  $\psi_1$ . Расчет значений тока и падений напряжений в такой цепи будет рассмотрен ниже.

На рисунке 4.3 в представлена электрическая цепь, в которой элементы  $C_2$  и  $R_2$  соединены параллельно, а к источнику напряжения эта цепочка подключена через элемент  $R_3$ . При построении векторной диаграммы такой цепи (рис. 4.3 г) целесообразно по оси абсцисс направить вектор  $U_{c2}$ . Очевидно, вектор  $U_{R2}$  совпадает с вектором  $U_{c2}$ . Вектор  $J_{c2}$  опережает последний на  $\frac{\pi}{2}$ . Вектор  $J_{R2}$  совпадает по направлению с вектором  $U_{R2}$ . Суммируя их, получим вектор  $J_{R3}$ . Прикладывая к концу вектора  $U_{c2}$  вектор  $U_{R3}$ , совпадающий по направлению с вектором  $J_{R3}$ , получим вектор  $\varepsilon$ , сдвинутый относительно вектора  $U_{R3}$  на угол  $\varphi_1$ .

На рис 4.3 д в электрической цепи элементы  $L_2$  и  $R_4$  соединены параллельно, а к источнику напряжения эта цепочка подключена через элемент  $R_5$ . При построении векторной диаграммы такой цепи (рис 4.3 е) целесообразно по оси абсцисс направить вектор  $U_{L2}$ , с которым совпадает вектор  $U_{R4}$ . Вектор  $J_{L4}$  совпадает по направлению с вектором  $U_{R4}=U_{L2}$ , в то время как вектор  $J_{L2}$  отстает от него на  $\frac{\pi}{2}$ . Суммируя вектора,  $J_{L2}$  и  $J_{L4}$ , получаем вектор  $J_{R5}$ . Прикладывая к концу вектора  $U_{L2}$  вектор  $U_{R5}$ , совпадающий по направлению с вектором  $J_{R5}$ , получаем вектор  $\varepsilon$ , сдвинутый относительно вектора  $U_{R5}$  на угол  $\varphi_2$ .

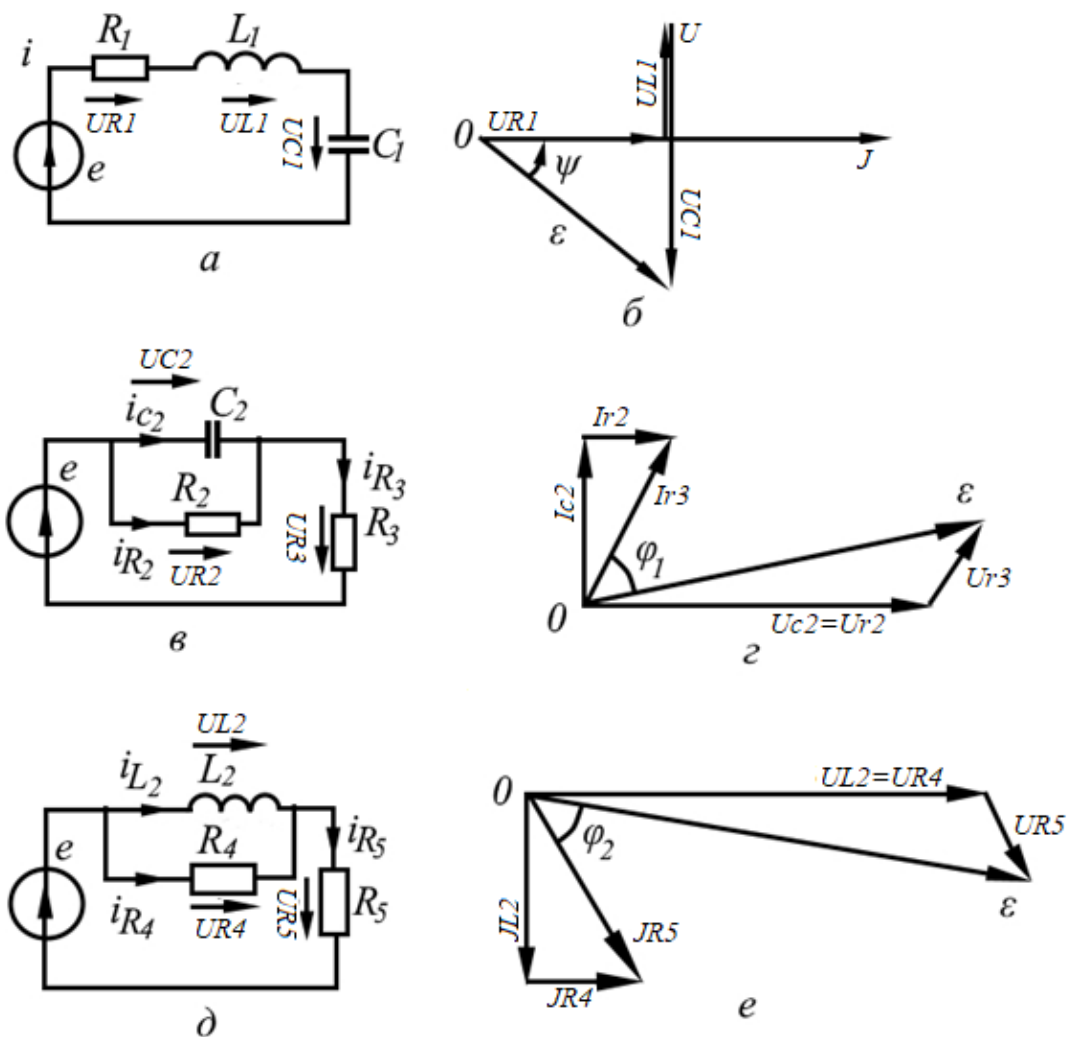


Рис 4.3. Электрические цепи и их векторные диаграммы:

*a* – последовательная цепь;

*б* – векторная диаграмма последовательной цепи;

*в* – параллельно-последовательная резистивно- емкостная цепь;

*г* – векторная диаграмма параллельно-последовательно резистивно- емкостной цепи;

*д* – параллельно-последовательная резистивно- индуктивная цепь;

*е* – векторная диаграмма параллельно-последовательной резистивно- индуктивной цепи

### 4.1.3 Символический метод анализа гармонических процессов в линейных электрических цепях

Гармоническая функция  $S(t) = S_m \cos(\omega t + \psi)$  известной круговой частоты полностью характеризуется двумя вещественными числами  $S_m$  и  $\psi$ , которые можно объединить в одно комплексное число  $\dot{S}_m = S_m e^{-i\psi}$ , называемое символическим изображением. Формально символическое

изображение является результатом Фурье–преобразования исходной функции. При  $T=2\pi/\omega$

$$\begin{aligned}\dot{S}_m &= \frac{2}{T} \int_0^t S(t) e^{-i\psi t} dt = \frac{2S_m}{T} \int_0^t \frac{i + e^{-i(\omega t + \psi)}}{2} e^{i\omega t} dt \\ &= \frac{S_m}{T} e^{i\psi} \int_0^t dt + \frac{S_m}{T} \int_0^t e^{i(2\omega t + \psi)} dt = S_m e^{i\omega t} \quad (4.1)\end{aligned}$$

Обратному преобразованию символического изображения в исходную функцию соответствует операция:

$$s(t) = \operatorname{Re} (S_m \dot{e}^{i\omega t}).$$

Действительно, используя формулу Эйлера

$$e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha,$$

имеем

$$\dot{S}_m e^{i\omega t} = S_m e^{i(\omega t + \psi)} = S_m \cos(\omega t + \psi) + i \sin(\omega t + \psi),$$

откуда следует, что вещественная часть этого выражения и есть исходная функция.

Если некоторая синусоидальная функция является суммой того или иного числа синусоидальных функций равных частот, то есть

$$S_m \cos(\omega t + \psi) = \sum_{k=1}^n S_{mk} \cos(\omega t + \psi_k),$$

то ее символическое изображение в силу линейности преобразования (4.1)

Равно сумме символических изображений исходных функций:

$$\dot{S}_m = \sum_{k=1}^n S_{mk}$$

Очевидно, операция умножения гармонической функции на вещественный постоянный множитель, которая приводит лишь к изменению амплитуды функции, соответствует операции умножения символического изображения функции на тот же множитель.

Дифференцируя гармоническую функцию, имеем

$$\frac{d}{dt} S(t) = -\omega S_m \sin(\omega t + \psi) = \omega S_m \cos\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Символическое изображение найденной гармонической функции будет таким:

$$\omega S_m e^{i(\psi + \frac{\pi}{2})} = \omega S_m e^{i\psi} e^{i\frac{\pi}{2}} = i\omega \dot{S}_m$$

и отличается от символического изображения исходной функции лишь множителем  $i\omega$ , называемым оператором. Интегрируя гармоническую функцию, имеем

$$\int S(t) dt = \frac{S_m}{\omega} \sin(\omega t + \psi) = \frac{S_m}{\omega} \cos\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Символическое изображение этой функции равно:

$$\frac{S_m}{\omega} e^{j(\psi - \frac{\pi}{2})} = \frac{S_m e^{j\psi}}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}} = \frac{\dot{S}_m}{i\omega}$$

Таким образом, операции интегрирования гармонической функции соответствует деление ее символического изображения на оператор  $i\omega$ . Следовательно, реактивное сопротивление на индуктивности и емкости будут равны:

$$X_L = i\omega L, \quad X_C = \frac{1}{i\omega C}, \quad \text{где } i - \text{ мнимая единица}$$

Таким образом, обращение к символическим изображениям позволяет переходить от интегро-дифференциальных уравнений во временной области к алгебраическим уравнениям в комплексной области и тем самым упрощать выкладки. При этом обратный переход осуществляется путем выделения вещественной части решения.

Для электрической цепи, приведенной на рис. 4.3 а, связь между падениями напряжений на элементах и ЭДС источника имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{R1} + U_{L1} + U_{C1} &= \varepsilon \\ JR_1 + J i\omega L_1 + \frac{J}{i\omega C_1} &= \varepsilon \end{aligned}$$

Пользуясь полученным соотношением, умножая числитель и знаменатель на комплексно сопряженное выражение последнего, можно получить выражения для модуля и аргумента амплитудного значения тока:

$$J = \frac{\varepsilon}{R_1 + i(\omega L_1 - 1/\omega C_1)} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1 - 1/\omega C_1)^2}}. \quad (4.2)$$

При известных параметрах рассматриваемой электрической цепи, заданной электродвижущей силой источника и частоте сигнала вычисляем ток и падения напряжений на элементах этой цепи, а также все необходимые данные для построения векторной диаграммы электрической цепи.

Знаменатель выражения (4.2) представляет собой комплексное сопротивление

$$Z = R_1 + i(\omega L_1 - 1/\omega C_1),$$

где  $r = R_1$  – активная составляющая сопротивления,

$x = (\omega L_1 - 1/\omega C_1)$  – реактивная составляющая сопротивления.

Для других цепей  $r$  и  $x$  могут иметь иной вид.

## 4.2. Рабочее задание

1. Исследовать последовательную цепь.

1.1. Принять значения индуктивности катушки  $L_1$ , емкости конденсатора  $C_1$ , активного сопротивления  $R_1$  и частоты сигнала  $f$  в соответствии с табл. 4.1 по номеру задания, указанному преподавателем. Рассчитать модули и фазы тока в цепи (Рис. 4.3, а) и падений напряжений на ее элементах. Построить теоретическую векторную диаграмму этой цепи.

1.2. Собрать данную электрическую цепь на универсальной панели в соответствии с монтажной схемой (Рис. 4.4, а). При этом выход генератора сигналов кабелем соединить с входными клеммами К1 и К2, причем к клемме К1 присоединить его потенциальный зажим, а к клемме К2 – провод земли. В качестве нагрузки генераторов сигналов заключают резистор (активное сопротивление)  $R_H = 75$  Ом (51 Ом), который является элементом цепи на выходе генератора сигналов ГЗ-7А. Кнопка «Выкл.» на универсальной панели нажата.

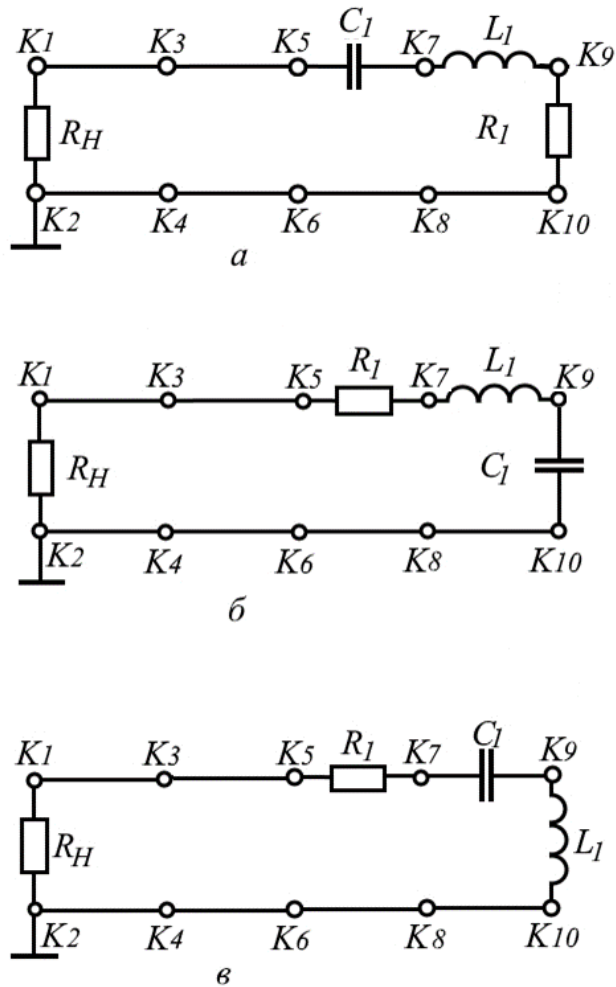


Рис. 4.4. Монтажные схемы последовательной электрической цепи. Измерение модуля и фазы напряжения на резисторе (а); на конденсаторе (б); на катушке индуктивности (в).

1.3. Измерить модуль падения напряжения и его фазу на активном сопротивлении  $R_1$ . С этой целью потенциальный вход вольтметра соединить с клеммой К3, землю – с К4. По шкале генератора установить заданное значение частоты. Включить генератор, вольтметр и осциллограф. По вольтметру установить напряжение, равное 2 В. Переключить потенциальный зажим вольтметра к клемме К9 и провести измерение напряжения на элементе  $R_1$ . Для измерения с помощью осциллографа фазы напряжения вход Хосциллографа подключить к клеммам К5 и К6, вход Уперемещать с К3 на К9. Полученный угол будет являться углом между ЭДС  $\varepsilon_T$  и напряжением  $U_{R1}$

1.4. Собрать электрическую цепь в соответствии с монтажной схемой (Рис. 3.4, б).

1.5. Измерить модуль напряжения и его фазу на конденсаторе  $C_1$ , как в п. 1.3.



- 1.6. Собрать электрическую цепь по схеме (Рис. 4.4, в).
- 1.7. Измерить модуль напряжения и его фазу на индуктивности  $L_1$ , как в п. 1.3.
- 1.8. Построить векторную диаграмму исследованной цепи и сопоставить с теоретической. Для этого по оси  $X$  отложить вектор  $\varepsilon_T$ . Вектора  $U_{R1}$ ,  $U_{L1}$ ,  $U_{C1}$  отложить от вектора в соответствии с масштабом и углом отклонения от  $\varepsilon_T$ . Сложить вектора  $U_{R1}$ ,  $U_{L1}$ ,  $U_{C1}$  и получить вектор  $\varepsilon_{np}$ .
2. Исследовать параллельно-последовательную резистивно-емкостную цепь.
- 2.1. Собрать последовательно-параллельную цепь в соответствии со своим вариантом (Рис. 3.5, а)

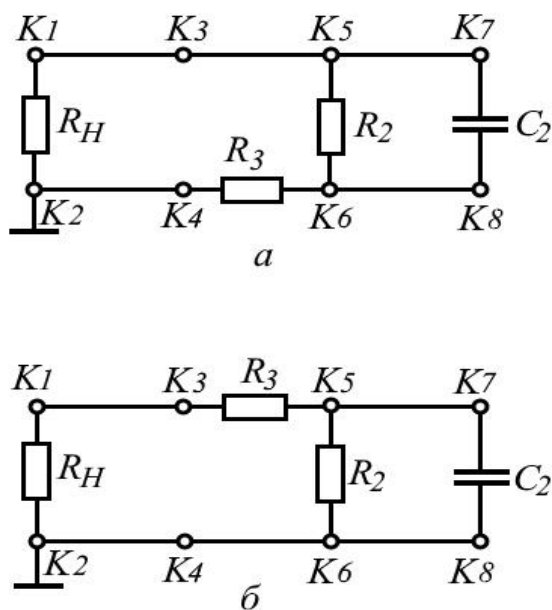


Рис. 4.5. Монтажные схемы параллельно–последовательно-резистивно-емкостной электрической цепи. Измерение модуля и фазы напряжения на а) последовательно включенном резисторе; б) на параллельной резисторно–ёмкостной цепочке.

- 2.3. Измерить модуль напряжения и его фазу на активном сопротивлении  $R_3$ . Установить напряжение на узлах  $K_3$ ,  $K_4$  2В. Подключить потенциальный зажим вольтметра к клемме  $K_6$ , и провести измерение модуля падения напряжения на этом элементе. Для измерения фазы с помощью осциллографа перемещать вход  $Y_c$  узла  $K_3$  на узел  $K_6$ .
- 2.4. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме (рис. 4.5, б)
- 2.5. Измерить модуль напряжения и его фазу на параллельной цепочке  $R_2$ ,  $C_2$ . Для этого подключить потенциальный зажим вольтметра к узлу  $K_3$  и

провести измерение модуля напряжения на узле  $K_5$ . Для измерения фазового сдвига перемещать вход  $Y$  с узла  $K_3$  на узел  $K_5$ .

2.6. Построить векторную диаграмму исследованной цепи.

3.<sup>†</sup> Построить векторную диаграмму цепи, проведя измерения сдвига фаз с помощью осциллографа DSO5102P.

Таблица 4.1  
Номинальные значения параметров элементов

Задание	Секции катушки индуктивности	$L, \text{мГн}$	$C_1=C_2$ мкФ	$R_1=R_3=R_5$ кОм	$R_2=R_4$ кОм	$f$ , кГц
1	1-2	13,58	0,022	0,3	2	5
2	1-3	172,6	0,033	0,3	2	3
3	1-4	188,9	0,033	0,3	2	2
4	1-5	269	0,047	0,3	2	1,5
5	1-6	299,9	0,05	0,3	2	1
6	1-7	350,2	0,068	0,3	2	1,5
7	1-8	375,1	0,022	0,3	2	2,5
8	2-4	125,1	0,033	0,3	2	3
1*	1-3	228,6	0,022	0,3	2	5
2*	2-6	237,6	0,033	0,3	2	3
3*	1-4	219,1	0,033	0,3	2	2
4*	1-5	415,2	0,047	0,3	2	1,5

#### Контрольные вопросы

1. Что такое гармонические процессы? Какие цепи являются линейными электрическими?
2. Перечислите элементы электрической цепи.
3. Объясните сдвиг фазы тока и напряжения в реактивных элементах.
4. Сущность векторного представления гармонических функций.
5. Векторные диаграммы цепи с последовательным соединением элементов.
6. Векторные диаграммы цепей с последовательно-параллельным соединением элементов.
7. Сущность символического метода расчетов токов напряжений линейных электрических цепях.
8. Комплексные сопротивления и проводимости.

<sup>†</sup> Для студентов физического факультета

## РАБОТА 6. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГАРМОНИЧЕСКИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: ознакомление с основными понятиями теории линейных электрических цепей. Освоение расчета гармонических токов и напряжений по методам контурных токов и узловых напряжений.

### 6.1. Краткие теоретические сведения

Теория к данной работе в целом повторяет теорию к работе №3. Отличие состоит в том, что уравнения Кирхгофа здесь будут составлять для цепей, содержащих реактивные элементы – емкость и индуктивность. Следовательно, уравнения будут содержать комплексные величины, равно как и матрицы. Для нахождения определителя такой матрицы можно воспользоваться запросом в интернете «найти определитель матрицы комплексных чисел онлайн».

### 6.2. Рабочее задание

1. Рассчитать цепь (рис. 6.2) по методу контурных. Принять значение индуктивности катушки, емкостей конденсаторов, активных сопротивлений и частоты генератора по табл. 6.1 в соответствии с номером задания и индексом схемы. Определить силы тока в контурах и падения напряжения на всех элементах.
2. Собрать рассчитанную электрическую цепь на универсальной панели. В качестве примера расположения элементов электрической цепи, собранной по заданию «а» (рис. 4.4), приведена монтажная схема (рис. 6.1). Следует учитывать, что клеммы  $K_1$  и  $K_9$  находятся под гармоническим напряжением, а клеммы  $K_2, K_4, K_6, K_8, K_{10}$  и  $K_{11}$ , соединенные перемычками, имеют нулевой потенциал относительно корпуса универсальной панели.

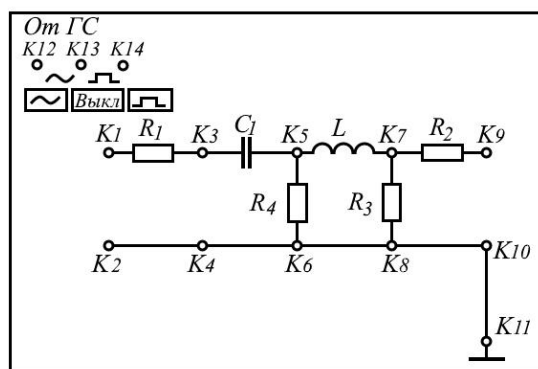
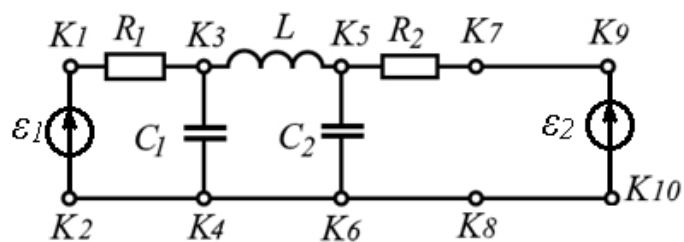
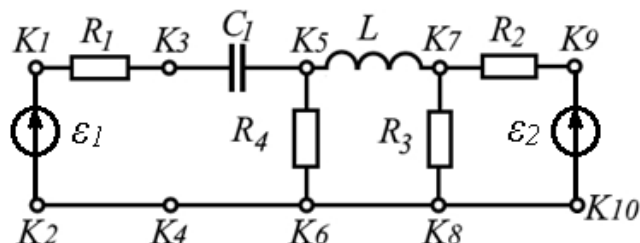


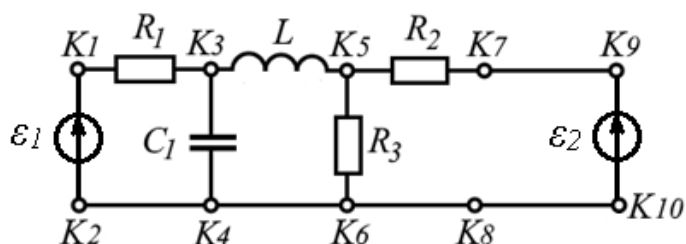
Рис. 6.1. Монтажная схема электрической цепи.



а



б



в

Рис. 6.2. Варианты (а, б, в) электрических цепей.

4. Подключить к универсальной панели генератор гармонических колебаний, причём к клемме  $K_{12}$  подключается потенциальный зажим генератора, а к клемме  $K_{13}$  – провод, соединенный с его корпусом. Провод электронного вольтметра, соединенный с его корпусом, подключить к клемме  $K_{11}$ . Клавиша  $\sim$  на универсальной панели нажата.

5. Включить генератор, вольтметр и осциллограф. По шкале генератора установить заданное значение частоты. По вольтметру установить необходимое напряжение источника  $\mathcal{E}_1$ . С этой целью потенциальный зажим вольтметра соединить с клеммой  $K_1$ . Подключая последовательно потенциальный зажим вольтметра к клеммам  $K_3, K_5, K_7, K_9$ , измерить модули узловых потенциалов  $U_{K3}, U_{K5}, U_{K7}$ , а так же напряжение  $U_{K9} = -\mathcal{E}_2$ . Для измерения их фаз, кроме напряжений на клеммах  $K_3, K_5, K_7, K_9$  использовать напряжение на клемме  $K_1$ .

6. Составить сводную таблицу измеренных узловых потенциалов и сопоставить с расчетными значениями.

Таблица 6.1

Номинальные значения параметров элементов

Задание	Индекс схемы	Частота, кГц	$E_1 = E_2,$ В	Секции катушки	$L,$ мГн	$R_1,$ кОм	$R_2,$ кОм	$R_3,$ кОм	$R_4,$ кОм	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ
1	а	1	5	1-2	13,58	10	1.5	7.5	3	0.01	0.022
2	б	0.7	5	1-3	172,6	7.5	1	5.1	2.0	0.022	0.01
3	в	0.8	5	1-4	188,9	7.5	1	5.1	2.0	0.022	0.01
4	б	0.9	6	1-5	269	7.5	1.5	5.1	2.0	0.022	0.01
5	а	1.2	6	1-6	299,9	7.5	1.5	5.1	2.0	0.01	0.022
6	б	1.4	6	1-7	350,2	10	1.5	5.1	3.0	0.01	0.022
7	в	1.5	5	1-8	375,1	10	1.5	5.1	2.0	0.01	0.022
8	а	1.6	5	2-4	125,1	10	1.5	5.1	2.0	0.01	0.022

## **РАБОТА 5**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНЫХ КОНТУРОВ**

Цель работы: исследование частотных (передаточных) характеристик линейных электрических цепей на примере последовательного и параллельного колебательных контуров. Расчет и измерение основных параметров и величин, характеризующих их резонансные свойства.

#### **5.1. Общие теоретические сведения**

##### **5.1.1. Частотные зависимости амплитуд и фаз гармонических колебаний в электрических цепях. Передаточные функции.**

Амплитуды и начальные фазы гармонических колебаний в заданной электрической цепи зависят в общем случае не только от амплитуды и начальной фазы воздействия, но и от частоты колебаний. Частотные зависимости колебаний в электрических цепях обусловлены частотной зависимостью сопротивлений реактивных элементов.

О свойствах электрической цепи как системы для передачи сигналов, энергия которых распределена по частотному диапазону, можно судить по ее амплитудно-частотным характеристикам. Применения символического метода анализа позволяет представить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики одной комплексной передаточной функцией.

Передаточная функция  $T(j\omega)$  представляет собой отношение комплексной амплитуды отклика электрической цепи к комплексной амплитуде воздействия или, что то же, отношение комплексных действующих значений отклика и воздействия.

Если передаточную функцию представить в показательной форме записи и обозначить ее модуль через  $|T(j\omega)|$ , а аргумент через  $\theta(\omega)$ , то есть  $T(j\omega) = |T(j\omega)|e^{j\theta(\omega)}$ , то модуль и аргумент передаточной функции определяют соответственно амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики цепи.

##### **5.1.2. Понятие о резонансе**

Параметрами электрической цепи являются индуктивность, взаимная индуктивность, емкость и активное сопротивление. Реактивные сопротивления и проводимости отдельных участков цепи принимают как положительные, так и отрицательные значения и могут компенсироваться.

Резонансом называется такой режим электрической цепи, при котором ее входное реактивное сопротивление или ее входная реактивная проводимость равны нулю. При резонансе ток на входе цепи, если он отличен от нуля, совпадает по фазе с напряжением. Резонанс достигается путем изменения либо частоты воздействия, либо параметров цепи.

## 5.2. Последовательный колебательный контур

В последовательном контуре генератор синусоидального напряжения вводится в контур последовательно с элементами R, L, C (рис. 5.1).

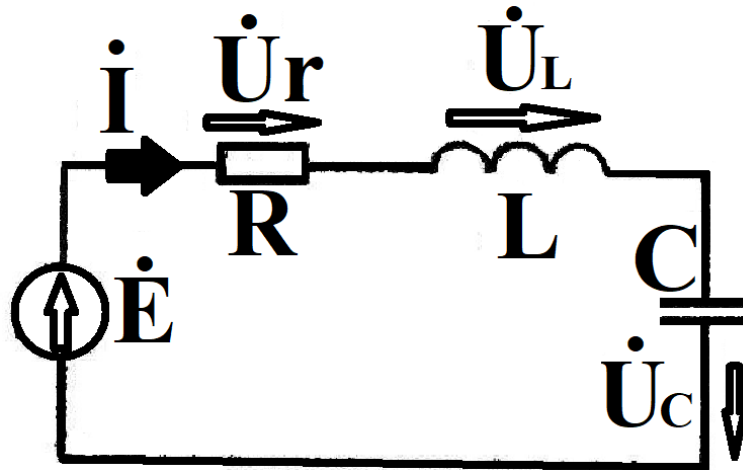


Рис.5.1. Последовательный колебательный контур

Передаточной функцией  $T(j\omega)$  часто называют отношение тока контура к приложенной разности потенциалов. Воспользовавшись символическим методом, запишем передаточную функцию через комплексные действующие значения тока  $i = i_m/\sqrt{2}$  и напряжения  $\dot{U} = \dot{U}_m/\sqrt{2}$ :

$$T(j\omega) = \frac{i}{\dot{U}} = Y(j\omega) = \frac{1}{Z(j\omega)} = \frac{1}{R + j(\omega L - 1/\omega C)}, \quad (5.1)$$

где  $Y(j\omega)$  – комплексная проводимость;

$Z(j\omega)$  – комплексное сопротивление

### 5.2.1. Резонансные явления в последовательном контуре

При некоторой круговой частоте

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (5.2)$$

называемой круговой резонансной частотой контура, реактивная составляющая комплексного сопротивления равна нулю, и сопротивление (и проводимость) имеет чисто активный характер:

$$Z_{\text{рез}} = R, \quad Y_{\text{рез}} = \frac{1}{R}$$

При постоянстве амплитуды приложенного напряжения ток  $I$ , а также активная мощность  $P$  в цепи в режиме резонанса будут максимальны:

$$I = I_0 = \frac{U}{R}; P = UI_0 = \frac{U^2}{R}$$

Этот же ток, протекая по реактивным элементам, модули сопротивлений которых равны, будет создавать на них напряжения:

$$U_L = U_C = \omega_0 L I_0 = \frac{1}{\omega_0 C} I_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} I_0 = \rho I_0$$

Ток создает следующие реактивные мощности:

$$P_L = P_C = \omega_0 L I_0^2 = \frac{1}{\omega_0 C} I_0^2 = \sqrt{\frac{L}{C}} I_0^2 = \rho I_0^2$$

Из последних соотношений следует, что характеристическое или волновое сопротивление контура  $\rho$  равно сопротивлению индуктивного и емкостного элемента в режиме резонанса:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

При резонансе в последовательном контуре происходит компенсация напряжений на зажимах реактивных элементов контура. Возможность подобной компенсации обусловлена тем, что при любой частоте напряжения на емкости  $U_C$  и на индуктивности  $U_L$  опережает ток по фазе на угол  $\pi/2$ . При резонансной же частоте оказываются равными амплитуды этих напряжений.

Заметим, что указанные значения напряжений не будут максимальными. Максимумы напряжений на индуктивности  $U_L$  и на емкости  $U_C$  имеют место на частотах, отличных от резонансной:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Максимум  $U_L$  имеет место на частоте

$$f_L = f \sqrt{\frac{2}{2 - R^2 C/L}} = f_0 \sqrt{\frac{2Q^2}{2Q - 1}}$$



где  $Q$  – добротность контура (физический смысл добротности рассмотрен ниже).

Максимум  $U_C$  имеет место на частоте

$$f_C = f_0^2 / f_L$$

Анализ этих выражений показывает, что лишь при очень малых значениях добротности ( $Q < 4$ ) частоты  $f_L, f_C, f_0$  могут отличаться достаточно сильно.

Если реактивные сопротивления  $X_L = X_C$  при резонансе превосходят по величине активное сопротивление  $R$ , то напряжения на емкости и индуктивности могут превосходить и иногда весьма значительно напряжение на зажимах цепи. Поэтому резонанс в последовательном контуре называют резонансом напряжений.

### 5.2.2. Добротность резонансного контура

Отношение:

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{I_0 \omega_0 L}{I_0 R} = \frac{\omega_0}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\rho}{R}, \quad (5.3)$$

определяет кратность превышения напряжения на зажимах индуктивного и емкостного сопротивлений над напряжением на зажимах всей цепи в резонансном режиме.

Добротность является энергетическим параметром и может быть оценена отношением полного запаса энергии  $W_{\Pi}$  к энергии  $W$ , расходуемой за период  $T$ . Действительно, полный запас энергии контура  $W_{\Pi}$  может быть определен через максимальное значение энергии магнитного или электрического поля:

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2} = W_{\Pi}$$

Энергия потерь  $W$  за период для электрической цепи в режиме резонанса может быть выражена следующим образом:

$$W = \int_0^T p dt = \int_0^T Ri^2 dt = RI^2 \int_0^T \sin^2 \omega t = \frac{RI^2}{2} T = \frac{RI^2}{2} \frac{2\pi}{\omega_0},$$

где  $p$  – мгновенная мощность.

Тогда соотношение, связывающее добротность резонансного контура с его энергетическими характеристиками, примет вид:

$$Q = 2\pi = \frac{W_{\Pi}}{W}$$

Наибольшие достигаемые на практике значения добротности контуров, состоящих из катушек индуктивности и конденсаторов, лежат в пределах 200-500.

Величина, обратная добротности, называется затуханием  $d$ :

$$d = \frac{1}{Q}$$

### 5.2.3. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики последовательного контура

Преобразуем передаточную функцию (5.1) последовательного контура, введя принятые ранее выражения для резонансной частоты (5.2) и добротности контура (5.3):

$$T(j\omega) = \frac{1}{R \left[ 1 + \frac{jL}{R} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0 \left( \omega - \frac{1}{\omega LC} \right)} \right]} = \frac{1}{R \left[ 1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]} \quad (5.4)$$

При  $\omega = \omega_0$  передаточная функция действительна и имеет максимум

$$T_{MAX} = \frac{1}{R}$$

Выражая передаточную функцию в долях ее максимального значения, получим так называемую нормированную частотную характеристику последовательного контура:

$$\widehat{T(j\omega)} = \frac{T}{T_{MAX}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (5.5)$$

Модуль и аргумент полученной передаточной функции определяют АЧХ и ФЧХ колебательного контура:

$$T(\omega) = |T(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}},$$

$$\theta(\omega) = \arg T(j\omega) = -\arctg Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

### 5.3. Параллельный контур, дуальный по отношению к последовательному

Передаточную функцию параллельного контура (рис. 5.2), который является дуальным по отношению к последовательному контуру, можно получить из (5.1), используя принцип дуальности:

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z(j\omega) = \frac{1}{Y(j\omega)} = \frac{1}{G - j\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)} \quad (5.6)$$

Резонанс в параллельном контуре наступит на частоте:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

На этой частоте проводимость контура (и сопротивление) имеет чисто активный характер:

$$Y = \frac{1}{Z_{\text{рез}}} = G = \frac{1}{R}$$

Отношение токов реактивных элементов к току в неразветвленной цепи, или отношение реактивных мощностей к активной мощности в режиме резонанса, равно отношению характеристической и активной проводимости, численно равно добротности контура:

$$Q = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 L G} = \frac{\xi}{G} = \frac{\sqrt{C/L}}{G},$$

где  $\xi$  — характеристическая или волновая проводимость.

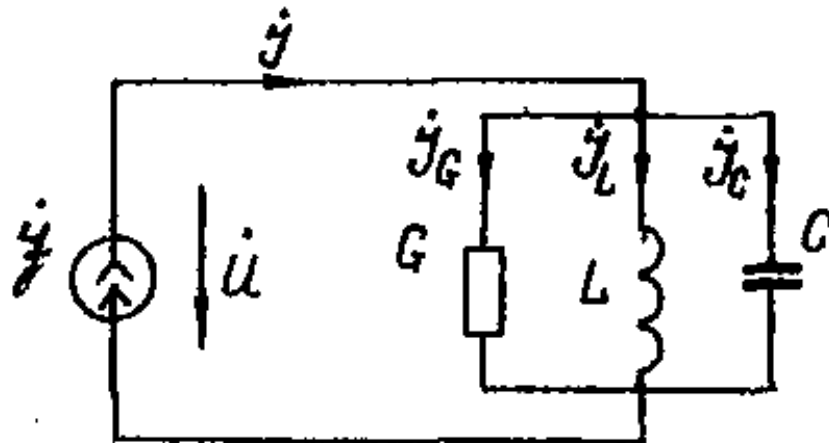


Рис. 5.2. Параллельный колебательный контур, дуальный по отношению к последовательному

При резонансе в параллельном контуре происходит компенсация токов реактивных элементов контура. Компенсация происходит потому, что при любой частоте токи через емкость и через индуктивность находятся в противофазе, поскольку один из них опережает, а другой отстает от напряжения по фазе на угол 90 градусов, а на резонансной частоте амплитуды этих токов становятся равными.

Если реактивные проводимости  $B_L = B_C$  при резонансе превосходят по величине активную проводимость  $G$ , то токи в индуктивной и емкостной ветви могут превосходить, иногда весьма значительно, ток в активной ветви,

а следовательно, и в неразветвленной части цепи. Поэтому резонанс при параллельном соединении называют резонансом токов.

Преобразуем передаточную функцию (5.6) аналогично преобразованию (5.4), учитывая значения резонансной частоты  $\omega_0$  и добротности  $Q$  параллельного контура:

$$T(j\omega) = \frac{1}{G[1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)]}$$

При  $\omega = \omega_0$  передаточная функция действительна и имеет максимум:

$$T_{MAX} = \frac{1}{G}$$

Выражая передаточную функцию в долях ее максимального значения, получим нормированную частотную характеристику параллельного контура:

$$\overline{T(j\omega)} = \frac{T}{T_{MAX}} = \frac{1}{1 + Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

Она не отличается от аналогичного выражения (5.4) для последовательного контура, что позволяет вести на основании ее анализ частотных и фазовых характеристик как последовательного, так и дуального к нему параллельного контура.

#### 5.4. Реальный параллельный контур

Параллельный контур, изображенный на рис. 5.2. в реальных устройствах почти не встречается, так как в большинстве случаев основное активное сопротивление контура определяется проводниками, образующими катушку индуктивности. Такой реальный параллельный контур представлен на рис. 5.3.

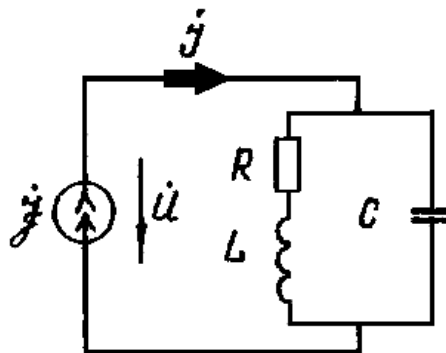


Рис. 5.3. Реальный параллельный контур

Если этот контур присоединить к источнику тока, то отношение комплексных амплитуд напряжения на зажимах контура и задающего тока источника определит его передаточную характеристику:

$$\begin{aligned}
T(j\omega) &= \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z(j\omega) = \frac{(R + j\omega L) \cdot 1/j\omega C}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} \\
&= \frac{R/\omega^2 C^2}{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} + j \frac{(\rho^2 \omega L - \rho^2 \cdot 1/\omega C + R^2/\omega C)}{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \\
&= r_{\Sigma} + jx_{\Sigma}
\end{aligned}$$

Из условия резонанса рассматриваемой цепи – равенство нулю реактивной составляющей полного сопротивления:

$$\rho^2 \omega_{\text{рез}} L - \rho^2 \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C} - \frac{R^2}{\omega_{\text{рез}} C} = 0$$

определим резонансную частоту реального контура

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - (R/\rho)^2},$$

где  $1/\sqrt{LC} = \omega_0$  – собственная резонансная частота идеального контура составленного из тех же  $L$  и  $C$ .

Таким образом, резонансная частота реального параллельного контура с потерями энергии в индуктивной ветви в общем случае отлична от  $\omega_0$ , но совпадает с последней при  $R = 0$  или  $R \ll \rho$ .

При резонансе полное сопротивление контура имеет активный характер и становится равным:

$$Z_{\text{рез}} = \frac{R/\omega_{\text{рез}}^2 C^2}{R^2 + (\omega_{\text{рез}} L - 1/\omega_{\text{рез}} C)^2}$$

если считать, что  $\omega_{\text{рез}} \cong \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , то

$$Z_{\text{рез}} = \frac{L}{RC} \quad (5.7)$$

Известные соотношения между параметрами контура позволяют представить  $Z_{\text{рез}}$  различными выражениями:

$$Z_{\text{рез}} = \frac{\omega_0^2 L^2}{R} = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 R} = Q\rho = \frac{\rho^2}{R}$$

Следует обратить внимание на то, что резонансное сопротивление реального параллельного контура определяется не только его активным сопротивлением, но и реактивными элементами  $L$  и  $C$ . Резонансное же сопротивление последовательного контура и дуального с ним параллельного равно активному сопротивлению  $R$ .

Добротность реального контура можно определить по формулам:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_{\text{рез}} L}{R} = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C R}$$

## 5.5 Сопоставление последовательного и параллельного контура

Для создания колебательного контура с возможно высокой добротностью и минимальными потерями надо стремиться свести в пределе активное сопротивление  $R$  к нулю. При этом резонансные сопротивления последовательного контура стремятся к нулю (рис. 5.1), параллельного контура – к бесконечности (рис. 5.3). Таким образом, идеальный параллельный контур обладает на резонансной частоте бесконечно большим сопротивлением.

Учтем теперь внутреннее сопротивление реальных генераторов  $R_i$ , питающих контуры. В схеме последовательного контура (рис. 5.4, а) полное сопротивление потерь находится как сумма:

$$R_{\text{потерь}} = R + R_i$$

Ясно, что генератор в этом случае должен иметь как можно меньшее внутреннее сопротивление, чтобы вносить в контур минимальные потери (в качестве источника возбуждения – генератор ЭДС).

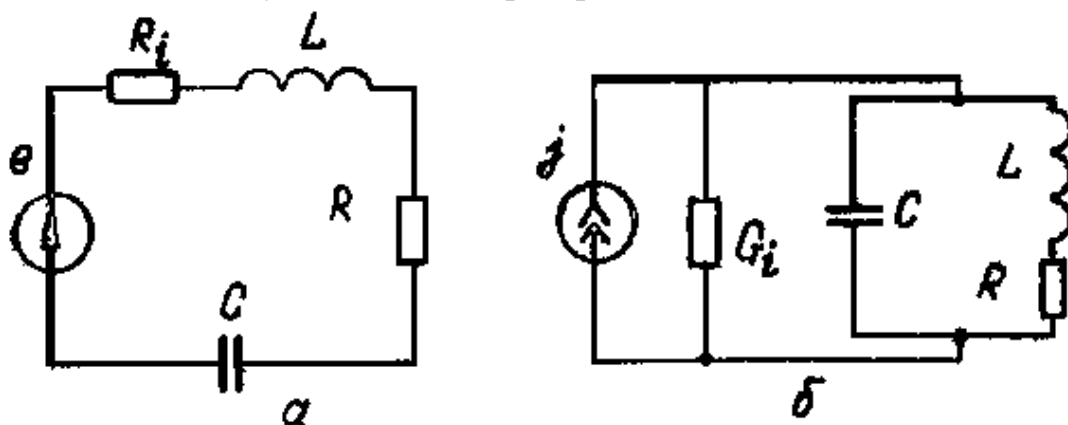


Рис. 5.4. Схемы возбуждения колебательных контуров:  
а - последовательного; б - параллельного

Для параллельного контура (рис. 5.4, б) полное сопротивление цепи выразим так:

$$Z_{\text{полное}} = \frac{R_i Z_{\text{э}}}{R_i + Z_{\text{э}}},$$

где  $Z_{\text{э}}$  – эквивалентное сопротивление контура.

Для упрощения подставим в последнее выражение значение  $Z_{\text{э}}$  при резонансе, и после преобразования найдем:

$$Z_{\text{полн.рез}} = \frac{L}{RC + L/R_i} = \frac{L}{C(R + L/R_i)C} = \frac{L}{C(R + R_{\text{доп}})}$$

Откуда видно, что дополнительное сопротивление потерь, вносимое за счет внутреннего сопротивления генератора в параллельный контур  $R_{\text{доп}} = L/R_i C$ , будет равно нулю только при  $R_i = \infty$  (в качестве источника возбуждения –

генератор тока). В общем случае, сопротивление, вносимое в контур, оказывается зависящим также от реактивных параметров контура.

Аналогичным расчетом вносимого в контур сопротивления, обусловленного каким-либо параллельным элементом, приходится часто пользоваться, и для этого приведем в общей форме “эквивалентный пересчет” сопротивления, включенного параллельно контуру в последовательно и обратно (рис. 5.5):

$$R_2 = \frac{L}{R_1 C} = \frac{\omega_0^2 L^2}{R_1}; \quad R_1 = \frac{L}{R_2 C} = \frac{\omega_0^2 L^2}{R_2};$$

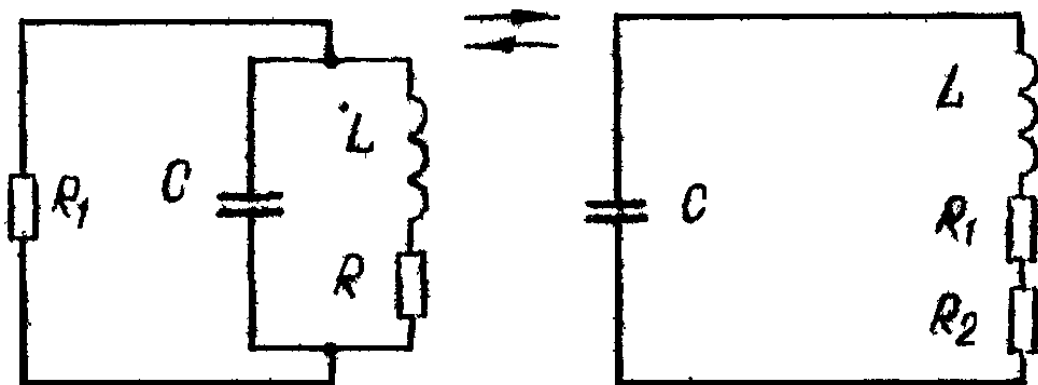


Рис. 5.5. К расчету эквивалентного сопротивления потерь

Используя эти формулы, можно рассчитать сопротивление при эквивалентном переходе от реального контура (рис. 5.3) к параллельному контуру, дуальному последовательному (рис. 5.2).

### 5.6. Обобщенная характеристика резонансного контура

При небольших расстройках от резонансной частоты можно использовать приближенные соотношения для резонансных характеристик колебательных контуров.

Обозначим:  $\omega - \omega_0 = \Delta \omega$  - расстройка,  $\omega + \omega_0 = 2\omega$

Тогда

$$\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega} = \frac{(\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0)}{\omega \omega_0} = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$$

– относительная расстройка.

Таким образом, при малых расстройках из (5.5) имеем

$$\widehat{T(j\omega)} = \frac{1}{1 + jQ2\Delta\omega/\omega_0}$$

Откуда амплитудно-частотная характеристика, которую при небольших расстройках принято называть резонансной кривой, запишется:

$$\widehat{T(j\omega)} = \frac{1}{\sqrt{1 + jQ^2(2\Delta\omega/\omega_0)^2}}$$

а фазо - частотная характеристика:

$$\theta(\omega) = -\arctg Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}.$$

Назовем величину

$$a = Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$$

обобщенной расстройкой. Тогда обобщенная резонансная характеристика будет выражаться так:

$$T(ja) = \frac{1}{1 + ja}.$$

Амплитудно – частотная характеристика:

$$T(a) = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}},$$

фазо-частотная характеристика:

$$\theta(a) = -\arctg a$$

Обобщенные резонансные характеристики колебательного контура изображены на рис. 5.6. Амплитудно – частотная характеристика контура при резонансной частоте, то есть при расстройке  $a = 0$ , а следовательно, при  $\Delta\omega = 0$ , проходит через максимум, фазо-частотная – через нуль. Вид полученной ачх (рис. 5.3) указывает на избирательные свойства контура, то есть на способность пропускать сигналы в некоторой полосе частот и значительно подавлять сигналы, частота которых лежит за пределами полосы пропускания.

Полоса пропускания определяется из условия, что ослабление сигнала на частота  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответствующих ее границам, происходит не более, чем в  $\sqrt{2}$  раз, то есть

$$T(\omega) \geq \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707,$$

Что соответствует обобщенной расстройке  $a \leq 1$ .



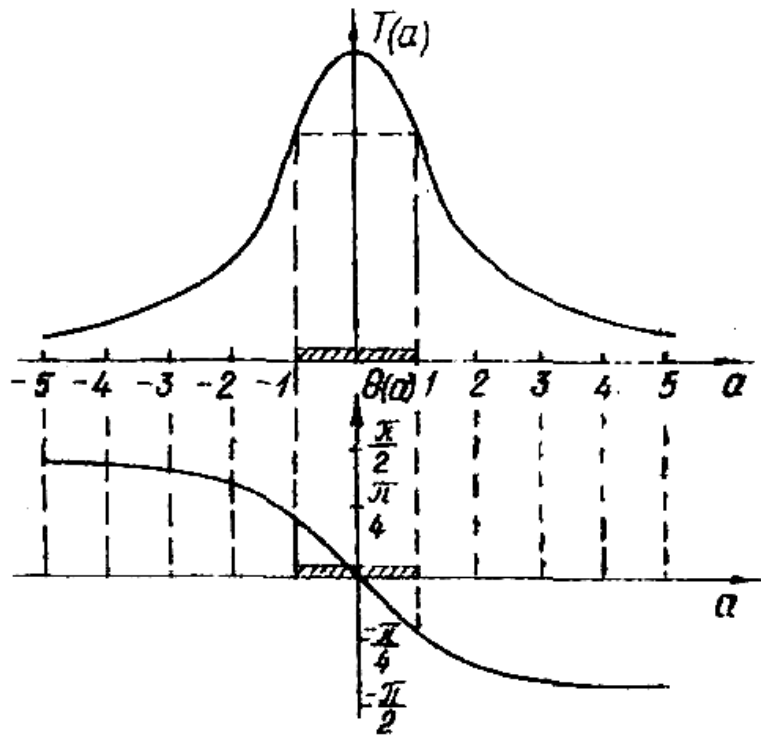


Рис. 5.6 Обобщенные резонансные характеристики колебательного контура

На границе полосы пропускания  $a = 1$ , следовательно,

$$Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = 1,$$

откуда абсолютная расстройка, для полосы пропускания контура равна:

$$\omega_2 - \omega_1 = 2\Delta\omega = \omega_0/Q, \text{ или } f_2 - f_1 = 2\Delta f = f_0/Q.$$

Полученные соотношения позволяют рассчитывать добротность контура

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega},$$

если известна его резонансная кривая (АЧХ). Полоса пропускания  $2\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  определяется на уровне  $T\omega = 0.707$ . Сдвиг фазы, вносимый контуром в пределах полосы пропускания, не превышает  $\pm 45^\circ$ .

Избирательность контура, определяющая способность подавлять сигналы, частоты которой отличаются от резонансной, количественно оценивается числом, которое показывает во сколько раз уменьшается сигнал в контуре при заданной расстройке  $\Delta\omega$ .

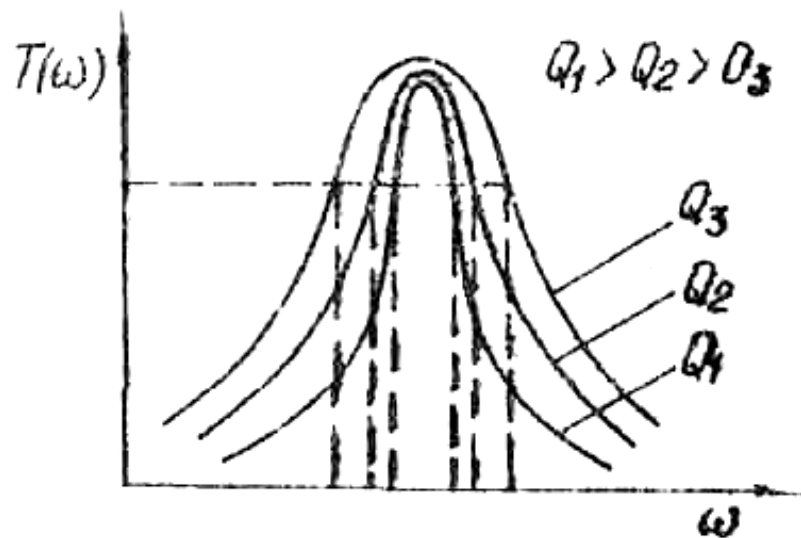


Рис. 5.7. Резонансные кривые

Очевидно, что избирательность тем выше, чем больше добротность контура. На рис. 5.7 изображены АЧХ контуров, имеющих одинаковую резонансную частоту, но разное значение добротности. Как видно из этого рисунка, с увеличением добротности контура резонансные кривые становятся все более 'острыми'. Иными словами, полоса частот, в пределах которой отношение амплитуд колебаний не меньше некоторой заданной величины, сужается с увеличением добротности контура.

Итак, увеличение добротности контура, с одной стороны, улучшает его избирательность, а с другой, - ухудшает (уменьшает) его полосу пропускания. И наоборот, увеличение полосы пропускания неизбежно связано с ухудшением избирательных свойств контура. Исключить это противоречие в рамках использования простых резонансных контуров в принципе невозможно.

#### 4.7. Рабочее задание

1. Исследовать последовательный контур.

1.1. Выбрать значения параметров элементов контура LC по табл. 5.5 в соответствии с номером, задания, указанным преподавателем.  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ .

1.2. Собрать схему (рис. 5.8). К клемме K1 – K2 подключить генератор (выходное сопротивление генератора  $R_{\text{вых}} = 75 \text{ Ом}$ ) так, чтобы клемма, соединенная с его корпусом, была подключена к клемме K2. Последовательный контур образован элементами  $R_2 L C$ . К клеммам K1 – K2 подсоединяется согласующее сопротивление  $R_1 = 75 \text{ Ом}$ . Таким образом, внутреннее сопротивление  $R_1$  реального источника последовательно соединено с элементами контура, следовательно, активное сопротивление контура равно:  $R_1 + R_2$

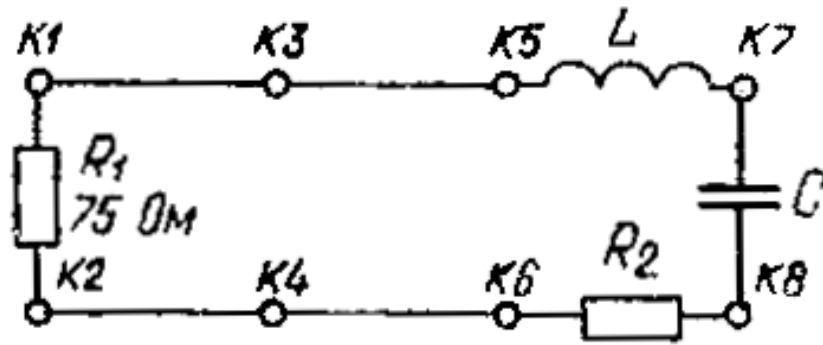


Рис. 5.8. Монтажная схема последовательного контура

1.3. По известным значениям параметров последовательного контура определить резонансную частоту  $f_0$ , добротность  $Q$ , рассчитать и построить АЧХ  $T(\omega)$  и ФЧХ.

1.4. Для определения напряжения в контуре вольтметр присоединить вольтметр к клеммам К3 – К4 (клемма К4 соединяется с корпусом вольтметра). Для определения тока контура измерить напряжение на резисторе  $R_2$  (для этого присоединить вольтметр к клеммам К8 – К4) и рассчитать значение тока:

$$I_{\text{конт}} = U_{R2}/R_2$$

Экспериментально определить резонансную частоту по максимальному напряжению на резисторе. Изменяя частоту генератора (по обе стороны относительно резонансной до тех пор, пока напряжение не примет  $0.1 U_0$ ) снять АЧХ контура.

*Внимание! Вблизи резонанса частотные промежутки выбирать меньшими, чем на краях резонансной кривой.*

Величину напряжения  $U_{\text{конт}}$  на контуре поддерживать постоянной. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 5.1.

$$U_{\text{конт}} = \text{const. } R1 + R2$$

$f$ , Гц	
$U_{R2}$ , В	
$I_{\text{конт}}$ , мА	
$T(f)$	

1.5. В схеме (рис. 5.8) вместо резистора  $R_2$  поставить резистор  $R_1$ .

Провести измерения в соответствии с п. 1.4. Данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2.

$$U_{\text{конт}} = \text{const. } R1 + R3$$

$f$ , Гц	
$U_{R3}$ , В	
$I_{\text{конт}}$ , мА	
$T(f)$	

1.6. Снять ФЧХ цепи, исследуемой в п.1.5, с помощью осциллографа следующим образом. К клеммам К1 – К2 (рис. 5.8) подключить генератор. Осциллограф должен работать в режиме с внешней синхронизацией. С клеммы К3 подать синхронизирующий сигнал на X – вход осциллографа, совмещенный с входом сигнала внешней синхронизации. Клемму К6 соединить с корпусом осциллографа. На у – вход осциллографа подать сигнал сначала с клеммы К8 (сигнал, пропорциональный току контура), затем с клеммы К5 (напряжение на контуре). Определить сдвиг фаз способом линейной развертки между этими сигналами для тех же значений частот, что и в п. 1.5.

Результат измерений занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

$f$ , Гц	
$l$ , мм	
$\Delta l$ , мм	
$\varphi^0$	

Здесь  $l$  – отрезок развертки, соответствующий периоду гармонического напряжения,  $\Delta l$  - смещение минимума или максимума.

1.7. Изобразить на одном графике приведенные (по отношению к резонансным значениям) АЧХ по п. 1.4 и п.1.5 и ФЧЗ по п. 1.6. Определить по характеристикам добротность  $Q$  и полосу пропускания  $2\Delta f$  контуров.

1.8. Сопоставить рассчитанные и экспериментально полученные передаточные функции последовательного контура, сделать выводы о причинах их расхождения.

1.9. Для контура (п.1.4) построить векторную диаграмму для случая резонанса.

2. Исследовать параллельный контур

2.1. Собрать цепь по схеме (рис. 5.9). К клеммам К1 – К2 подключить генератор (выходное сопротивление генератора  $R_{\text{ген}} = 1000 \text{ Ом}$ ). Так как

резистор  $R_4 = 20 \text{ кОм}$  то фактически к клеммам К5 - К6 подсоединяется источник тока с большим внутренним сопротивлением

$$R_{\text{шт}} = R_{\Gamma} + R_4$$

Эквивалентная схема этого соединения изображена на рис. 5.10.

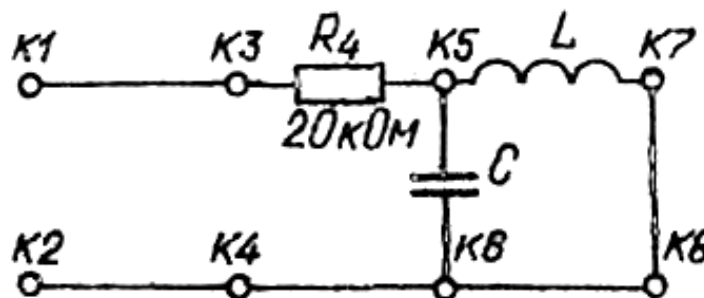


Рис. 5.9. Монтажная схема параллельного контура

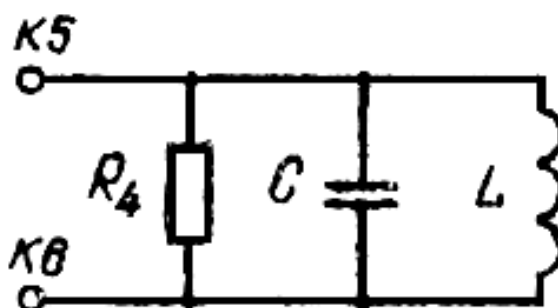


Рис.5.10. Эквивалентная схема последовательного контура

2.2. По заданным значениям параметров параллельного контура, с учетом шунтирующего влияния внутреннего сопротивления источника (рис. 5.9, 5.10) определить резонансную частоту  $f_0$ , добротность  $Q$ , рассчитать и построить АЧХ  $T(\omega)$  и ФЧХ  $\theta(\omega)$  контура.

2.3. Для измерения напряжения на контуре генератор подсоединить к клеммам К1 – К2 таким образом, чтобы клемма, соединения с корпусом генератора была подключена к К2. Вольтметр присоединить к клеммам К5 – К4. При этом его корпусной зажим должен быть присоединен к клемме К4.

2.4. Для измерения тока в неразветвленной части цепи резистор  $R_4$  подсоединить к К4 – К6 (корпусной зажим присоединить к К4). Значение тока получить, разделив значение напряжения на величину  $R_4$ .

2.5. Экспериментально определить резонансную частоту контура по максимальному значению напряжения  $U_0$  на нем (рис. 5.9). Изменяя частоту генератора (по обе стороны относительно резонансной до тех пор, пока напряжение не примет значение  $0.1 U_0$ ), снять АЧХ контура.

Внимание! Вблизи резонанса частотные промежутки выбирать меньшими, чем на краях резонансной кривой.

Величину тока на контуре  $I_{\text{конт}}$  поддерживать постоянной. Результаты измерений занести в таблицу 5.4.

Таблица 5.4.

$f$ , Гц	
$U_{\text{конт}}$ , В	
$T(f)$	

2.6. Собрать цепь по схеме (рис.5.11). По аналогии с п.2.5 снять АЧХ параллельного контура с потерями в индуктивной ветви. Данные занести в таблицу (аналогично табл. 5.4).

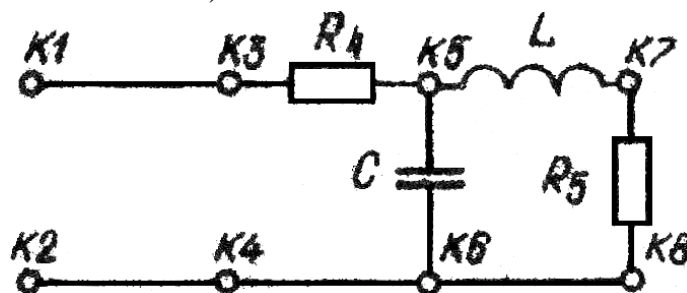


Рис. 5.11. Монтажная схема параллельного контура с потерями

2.7. Снять ФЧХ контура, исследованного в п. 2.6, с помощью осциллографа. К клеммам К1 - К2 подключить генератор (корпус генератора соединить с К2). Осциллограф должен работать в режиме с внешней синхронизацией. С клеммы К4 подать сигнал на вход X осциллографа, совмещенный с входом сигнала внешней синхронизации. Клемму К4 соединить с корпусной клеммой осциллографа. На у – вход подать сигнал с клеммы К5 (напряжение контура), затем с клемм К3 (сигнал, пропорциональный току). Определить сдвиг фаз между этими сигналами способом линейной развертки для тех же значений частот, что и в п. 2.6). Результаты измерений внести в таблицу (аналогично табл. 5.3).

2.8. Изобразить на одно графике приведенные (по отношению к резонансным значениям) АЧХ параллельного контура по данным п. 2.5, 2.6, ФЧХ – поданным п. 2.7. Определить по характеристикам резонансную частоту  $f_0$ , добротность  $Q$  и полосу пропускания  $2\Delta f$  контуров.

2.9. Сравнить теоретически рассчитанные и экспериментально полученные передаточные характеристики параллельного контура, сделать выводы о причинах их расхождения.

2.10. Для контура п.2.6 построить векторную диаграмму для случая резонанса.

Таблица 4.5 Номинальные значения параметров элементов.

Задание	Секции катушки индуктивности	C, мкФ
1	5-7	0,15
2	4-5	0,033
3	5-8	0,022
4	5-7	0,033
5	4-5	0,047
6	1-2	0,068
7	3-5	0,01
8	4-5	0,033
9	1-2	0,022
10	3-5	0,033
11	3-5	0,022
12	5-8	0,033
13	5-7	0,022
14	4-5	0,033
15	1-2	0,033

Примечание. Индуктивность секций определить с помощью RLC-метра.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение передаточной функции электрической цепи.
2. Что называется резонансом электрической цепи?
3. Чем характеризуется резонанс в последовательном контуре, резонанс напряжений?
4. Записать передаточную функцию последовательного контура, АЧХ и ФЧХ.
5. Дать определение добротности контура.
6. Записать выражение добротности последовательного контура, добротности параллельного контура, дуального по отношению к последовательному.
7. Чем характеризуется резонанс в параллельном контуре, резонанс токов?
8. Провести сопоставление последовательного и параллельного контура при резонансе.