

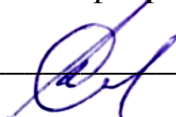
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра «Электротехника и электрооборудование»

Утверждено на заседании кафедры  
«Электротехника и электрооборудование»  
«21» января 2020 г., протокол № 5-1

Заведующий кафедрой

 \_\_\_\_\_ А.Э. Соловьев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Электротехника и электроника»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки *(специальности)*  
**09.03.01 Информатика и вычислительная техника**

с направленностью (профилем)  
*(со специализацией)*

**Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети**  
Формы обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 090301-01-20

Тула 2020 год

## **Разработчик(и) методических указаний**

Шпрехер Дмитрий Маркович, д.т.н., доцент

*(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)*



*(подпись)*

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**Д. М. Шпрехер, В. Е. Полевой, А. В. Чумаков**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

### **Часть 1**

**Исследование линейных электрических цепей  
постоянного и переменного тока**

**Лабораторный практикум**

**Тула**

**Издательство ТулГУ**

**2019**

УДК 621.31

Шпрехер Д.М., Полевой В.Е., Чумаков А.В. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Исследование линейных электрических цепей постоянного и переменного тока: лабораторный практикум. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – 84 с.

ISBN

В учебном издании изложены описание лабораторных работ, задания и методические рекомендации по их выполнению. Рассматриваются свойства, методы анализа и расчёта линейных однофазных цепей постоянного и переменного тока.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину Теоретические основы электротехники в объёме общеобразовательной дисциплины.

Библиогр. 5 наим.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета  
Тульского государственного университета

**Рецензент:** Минаков Е.И., докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры.  
«Радиоэлектроника».

ISBN

© Шпрехер Д.М., Полевой В.Е., Чумаков А.С. 2019  
© Издательство ТулГУ, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие требования к выполнению лабораторных работ .....	4
Описание комплекта лабораторного оборудования .....	5
Лабораторная работа № 1 Исследование разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока.....	11
Лабораторная работа № 2 Исследование цепи постоянного тока методами эквивалентного генератора и наложения.....	24
Лабораторная работа № 3 Исследование резонанса в последовательной цепи с $R$ -, $L$ -, $C$ -элементами.....	38
Лабораторная работа № 4 Исследование резонанса в параллельной цепи с $R$ -, $L$ -, $C$ -элементами.....	44
Лабораторная работа № 5 Исследование цепей с взаимной индуктивностью .	54
Библиографический список.....	83

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

К выполнению цикла лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждая лабораторная работа выполняется в три этапа:

1 этап. Расчётно-графическая часть выполняется студентом самостоятельно внеаудиторно, в ходе подготовки к лабораторным работам и включает в себя: изучение теоретических основ рассматриваемой темы, уяснение целей лабораторной работы и предстоящих исследований, аналитические расчёты режимов работы электрических цепей, подготовка формы протокола экспериментальной части отчёта.

2 этап. Экспериментальная часть выполняется в лаборатории кафедры под руководством преподавателя, в ходе которой осуществляется допуск к работе, сборка исследуемой электрической цепи, проведение экспериментов, согласование и утверждение полученных результатов у преподавателя.

3 этап. Самостоятельная обработка и анализ полученных в ходе экспериментов результатов, проверка их на адекватность с аналитическими расчётами 1-го этапа, формулировка выводов, оформление отчёта и его защита в объёме материала, обозначенного контрольными вопросами.

Отчёт по лабораторной работе оформляется каждым студентом самостоятельно с соблюдением требований существующих стандартов и методических указаний к оформлению отчётов. Форма и структура отчёта приведены в приложении к лабораторным работам.

# ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКТА ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## Компоновка оборудования

Общая компоновка комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении показана на рисунке 1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из мини-блоков, может устанавливаться и непосредственно на столе.

В выдвижных ящиках хранятся наборы мини-блоков и устройств, соединительные провода, перемычки и кабели, методические материалы. Один из наборов мини-блоков показан на столе (рисунок 1).

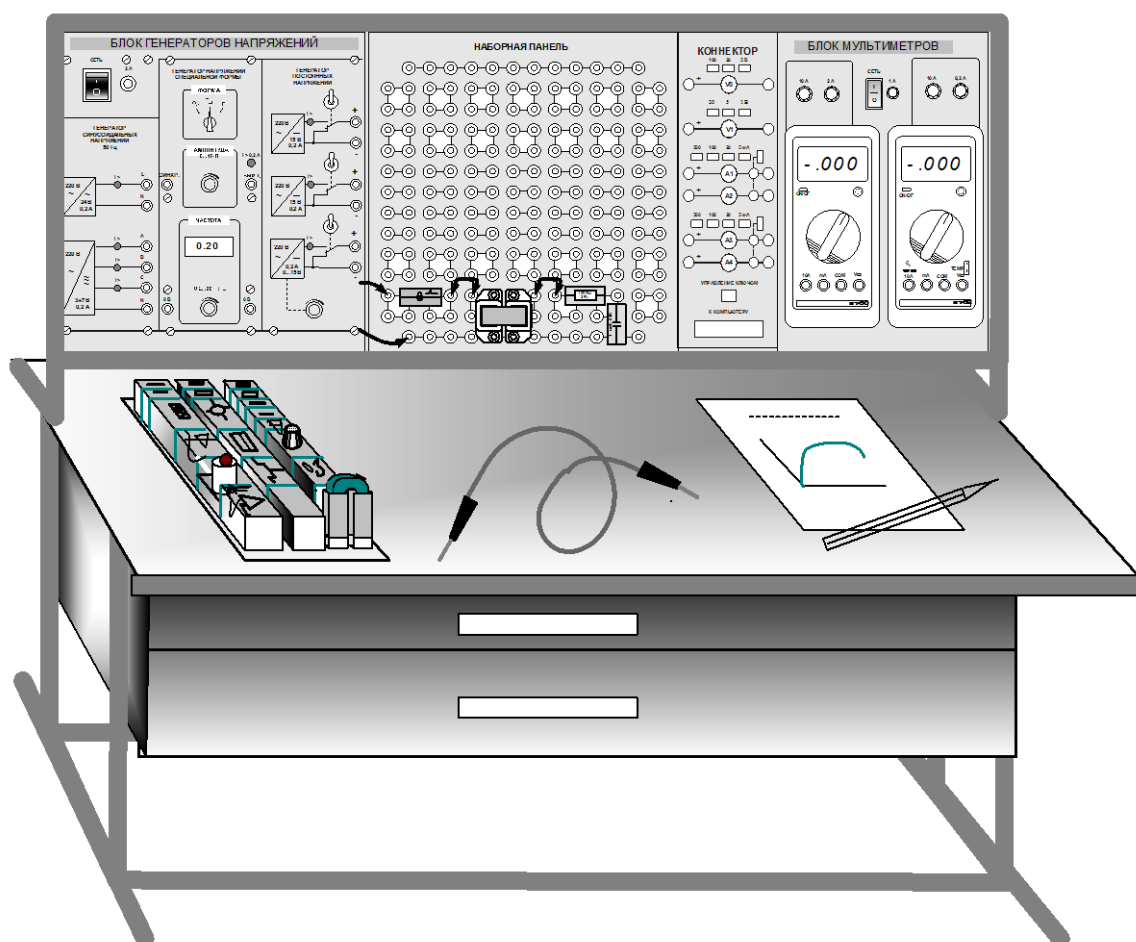


Рисунок 1 – Общая компоновка лабораторного оборудования

## Блок генераторов напряжений

Лицевая панель блока генераторов напряжений показана на рисунке 2. Генератор состоит из источника синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 2 А.

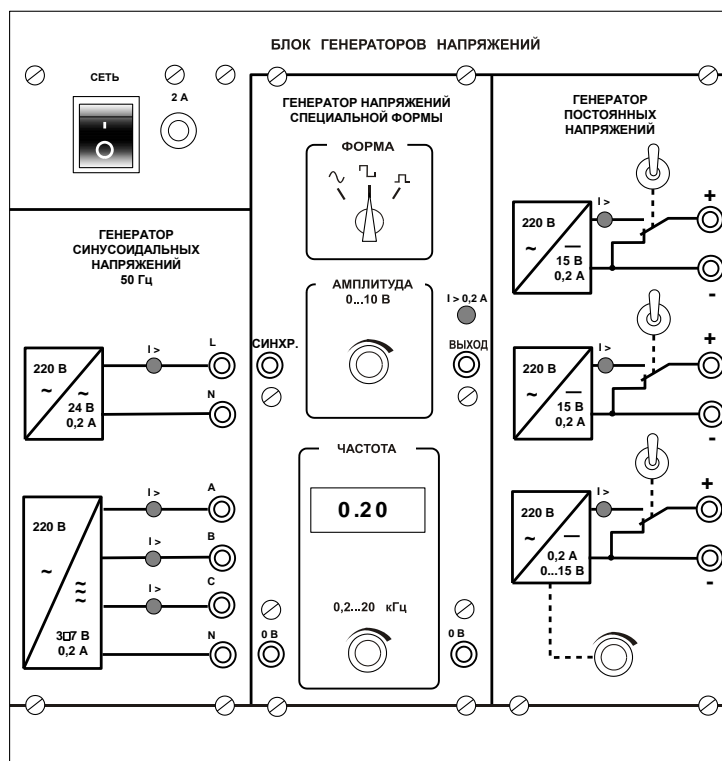


Рисунок 2 – Блок генераторов напрядений

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений гальванически изолированы друг от друга и от корпуса блока и защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Генератор синусоидальных напряжений содержит однофазный источник напряжения 24 В (вторичная обмотка питающего трансформатора 220/24 В) и трёхфазный стабилизированный по амплитуде выходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное. Выходное сопротивление трёхфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю.

Генератор напряжений специальной формы вырабатывает на выходе синусоидальный, прямоугольный двухполярный или прямоугольный однополярный сигнал в зависимости от положения переключателя «ФОРМА». Выходное сопротивление генератора в рабочем диапазоне токов также близко к нулю. Между гнездами «СИНХР» и «0 В» генератора при любом положении переключателя «ФОРМА» вырабатываются однополярные прямоугольные импульсы амплитудой 5 В, которые можно использовать для внешней синхронизации осциллографа. Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА» и не зависит, как от формы и амплитуды сигнала, так и от тока нагрузки.

Генератор постоянных напряжений содержит три источника стабилизированного напряжения 15 В, гальванически изолированных друг от друга. Вы-



ходное напряжение одного из этих источников регулируется от 0 до 15 В десятиоборотным потенциометром. Выходные сопротивления этих источников также близки к нулю и допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений больше 15 В они могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры).

### Наборная панель

Наборная панель (рисунок 3) служит для расположения миниблоков в соответствии со схемой исследуемого опыта.

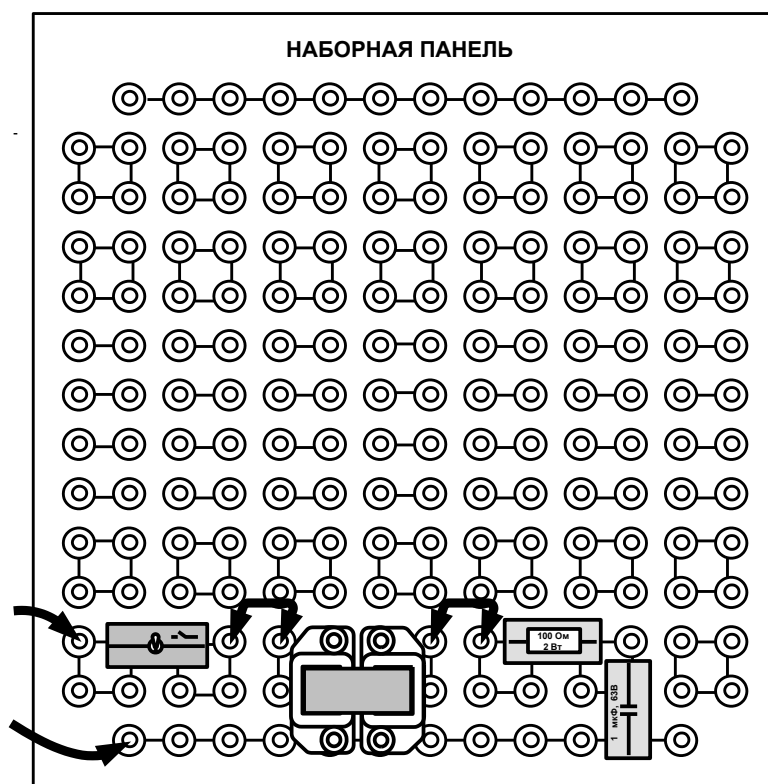


Рисунок 3 – Наборная панель лабораторного стенда

Гнёзда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнёзда панели. Остальные соединения выполняются соединительными проводами и перемычками. Так на фрагменте цепи, показанной на рисунке 3, напряжение подаётся проводами через выключатель к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно.

Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек и вместо неё в образовавшийся разрыв включается амперметр. Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр.

## **Набор миниблоков лабораторного стенда**

Мини-блоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые мини-блоки содержат несколько элементов, соединённых между собой в более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные графические обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики.

## **Набор трансформаторов**

Набор трансформаторов включает в себя четыре разборных трансформатора, выполненных на разъёмных *U*-образных сердечниках из электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На трёх трансформаторах установлены катушки 900/300 витков, на четвёртом 100/100 витков, однако, они легко переставляются.

## **Блок мультиметров**

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рисунке 4. В нём установлены 2 серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводится в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

- не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы;
- устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину, если порядок измеряемой величины неизвестен;
- отключайте щупы от проверяемой цепи перед тем, как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!);
- не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение;
- не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены;
- будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения имеющихся в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

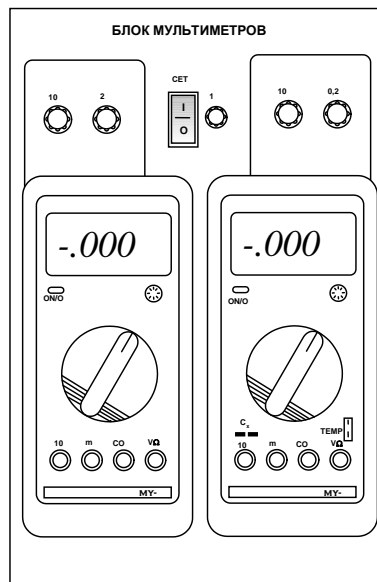


Рисунок 4 – Блок мультиметров лабораторного стенда

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины:  $-V$ ,  $\sim V$ ,  $-A$ ,  $\sim A$  или  $\square$ ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра в качестве вольтметра, амперметра и омметра показано на рисунке 5.

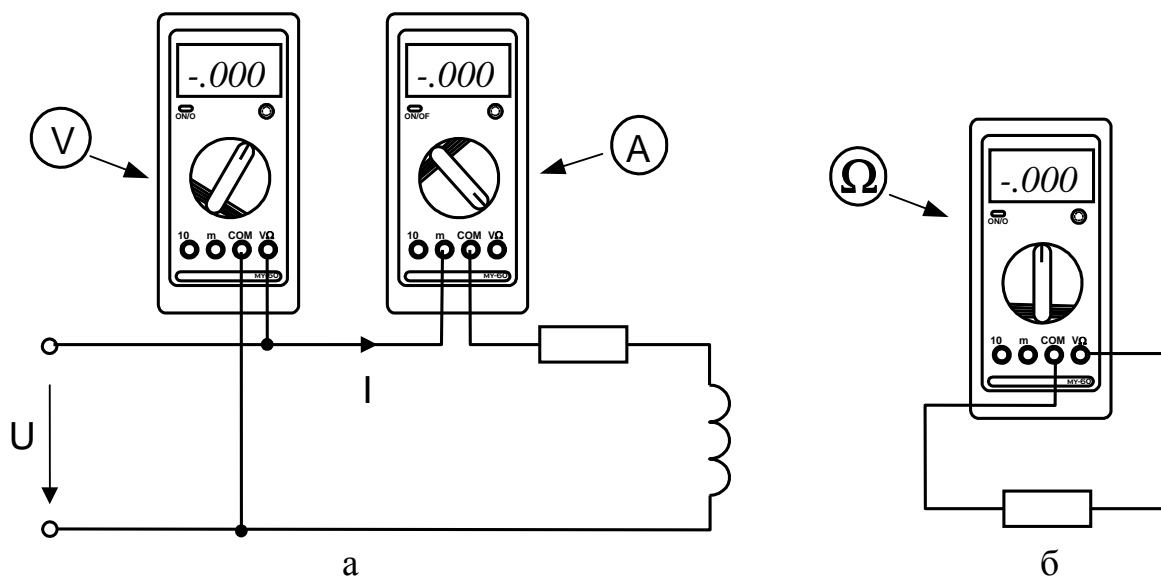


Рисунок 5 – Подключение мультиметра: а – в качестве вольтметра и амперметра; б – в качестве омметра

### Ваттметр учебного стенда

Ваттметр учебного стенда (рисунок 6) цифрового типа. На его дисплее отображается среднее значение произведения мгновенных величин тока и напряжения.

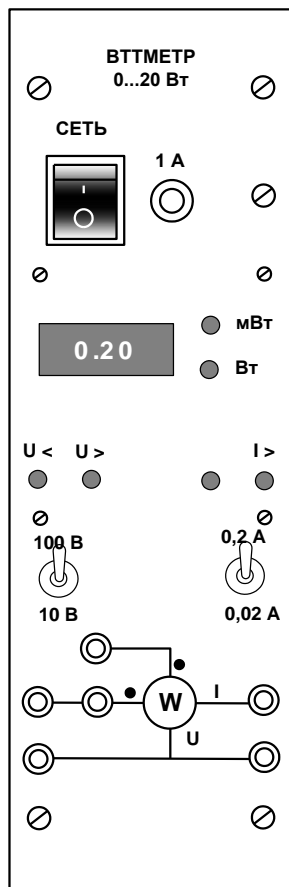


Рисунок 6 – Ваттметр стенда

Прибор включается в цепь согласно схеме, приведённой на лицевой панели. Для измерения активной мощности, гнезда, отмеченные символом «•», должны быть соединены перемычкой. После сборки схемы необходимо включить выключатель «СЕТЬ» и установить необходимые пределы измерения по току и напряжению тумблерами. Если выбран заниженный предел измерения, то включается сигнализация перегрузки «I >» или (и) «U >». В случае если предел превышен, то включается сигнализация «I <» или (и) «U <».

Справа от окошка цифровых индикаторов автоматически включаются светодиоды сигнализации размерности «Вт» или «мВт».

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1 Цели работы

1 Получение навыков сборки электрических цепей и пользования электроизмерительными приборами.

2 Экспериментальное исследование параметров цепи, построение потенциальной диаграммы, освоение основных расчётных способов по определению токов и напряжений на участках цепи.

### 2 Основные положения теории электрических цепей

#### 2.1 Основные понятия, законы Ома и Кирхгофа

*Электрической цепью* называют совокупность устройств и объектов (элементов), соединённых друг с другом, по которым может протекать *электрический ток*, и предназначенных для распределения, преобразования и передачи электрической энергии.

Для протекания тока необходимы *источники электрической энергии* – источники напряжения (ЭДС) или тока.

Электрическая цепь содержит также устройства, в которых энергия электрического тока преобразуется в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и т.д.). Эти устройства называются *приёмниками электрической энергии*, или *нагрузками*.

Если элемент цепи характеризуется линейными алгебраическими или дифференциальными уравнениями, то его называют *линейным*.

Цепи, содержащие только линейные элементы, называют *линейными* цепями. Основное свойство таких цепей – применимость принципа наложения (суперпозиции), заключающегося в том, что результирующая реакция линейной цепи на несколько приложенных одновременно возмущений равна сумме реакций, обусловленных каждым возмущением в отдельности.

Для замыкания и размыкания цепей используют *выключатели* (тумблеры) того или иного вида.

Ток, неизменный по величине и направлению, называют *постоянным* и обозначают символом  $I$ .

Каждая точка электрической цепи характеризуется потенциалом  $\varphi$ . Он определяется относительно какой-либо одной точки, потенциал которой условно принимают равным нулю.

Закон Ома математически выражает соотношение между напряжением  $U$ , током  $I$  и сопротивлением  $R$  на участке цепи и читается следующим образом: «Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к участку, и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка» (рисунки 7).

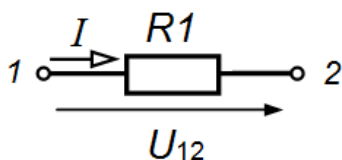


Рисунок 7

$$I = \frac{U_{12}}{R_1}, \quad (1.1)$$

где  $U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)$ .

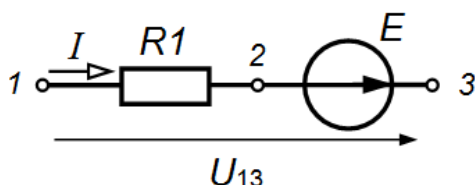


Рисунок 8

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС (рисунок 8):

$$\varphi_2 = \varphi_1 - IR_1;$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 + E.$$

Отсюда следует:

$$\varphi_3 = \varphi_1 - IR_1 + E;$$

$$\varphi_1 - \varphi_3 = IR_1 - E;$$

$$U_{13} = IR_1 - E;$$

$$IR_1 = U_{13} + E,$$

Тогда ток протекающий по участку цепи определяется выражением

$$I = (U_{13} + E)/R_1. \quad (1.2)$$

Для любого узла электрической цепи справедлив первый закон Кирхгофа, формулируемый следующим образом: *сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю*. Существует и другая, аналогичная по смыслу формулировка: *сумма значений токов, входящих в узел, равна сумме значений токов, выходящих из узла*.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (1.3)$$

При этом полагают, что токи, втекающие в узел, считаются положительными, а вытекающие – отрицательными.

Для любого замкнутого контура электрической цепи справедлив второй закон Кирхгофа, формулируемый следующим образом: *алгебраическая сумма ЭДС, действующих в контуре равна алгебраической сумме падений напряжения на элементах этого контура*.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m I_k U_k. \quad (1.4)$$

## 2.2 Методы расчёта электрических цепей

### 2.2.1 Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Классическим методом расчёта сложных электрических цепей является метод непосредственного применения законов Кирхгофа. Все остальные методы расчёта вытекают из этих фундаментальных законов.

Расчёт производится в следующей последовательности:

1. Произвольно задаются условно положительными направлениями токов во всех ветвях схемы.
2. Определяется количество уравнений системы для решения задачи (число уравнений равно числу неизвестных токов).
3. Определяется количество узлов в схеме.
4. Если в схеме  $n$  узлов, то количество независимых уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, равно  $n - 1$ .
5. Недостающее количество уравнений системы составляется по второму закону Кирхгофа для независимых контуров.

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. Обычно в задаче заданы значения ЭДС источников  $E_1$ ,  $E_2$  и сопротивлений всех резисторов  $R_1$ - $R_6$ . Требуется определить токи во всех ветвях схемы  $I_1$ - $I_6$ .

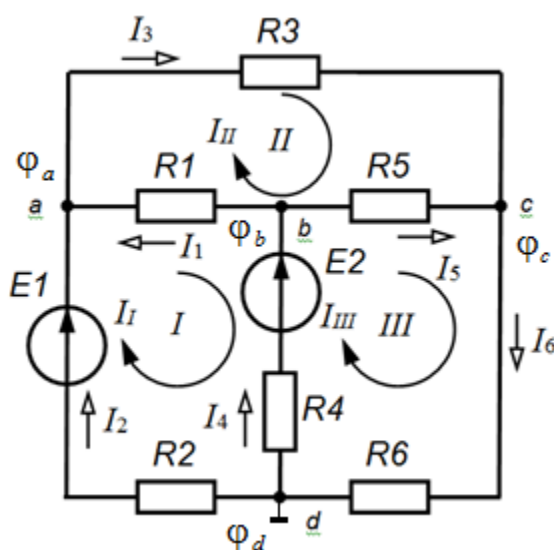


Рисунок 9 – Схема разветвлённой электрической цепи

Определим токи в ветвях схемы методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

1. Во всех ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов  $I_1$ - $I_6$ ;
2. Определяется количество уравнений, равное числу неизвестных токов (в данном случае их 6);
3. Определяется количество ( $n$ ) узлов в схеме ( $n = 4$ );
4. Составляются уравнения по первому закону Кирхгофа для количества узлов на один меньше ( $n-1$ ), чем в схеме:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- для узла } a: I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ \text{- для узла } b: -I_1 + I_4 - I_5 = 0; \\ \text{- для узла } c: I_3 + I_5 - I_6 = 0. \end{array} \right\} \quad (1.5)$$

5. Недостающие число уравнения записываются по второму закону Кирхгофа для 3-х независимых контуров:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- для контура } I: -I_1R_1 + I_2R_2 - I_4R_4 = E_1 - E_2; \\ \text{- для контура } II: I_1R_1 + I_3R_3 - I_5R_5 = 0; \\ \text{- для контура } III: I_4R_4 + I_5R_5 + I_6R_6 = E_2. \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

6. Решая совместно уравнения системы (1.5-1.6), находят значения иско-  
мых токов.

Если в результате решения системы уравнений некоторые токи получатся отрицательными, то это указывает на то, что истинное направление токов в этих ветвях противоположно выбранному нами (условно положительному).

### 2.2.2 Метод контурных токов

Этот метод применяется для расчёта сложных электрических цепей и позволяет уменьшить количество составляемых уравнений и тем самым упростить расчёт. При расчёте методом контурных токов полагают, что в каждом независимом контуре схемы течёт свой, так называемый, *контурный ток*. Уравнения составляются по второму закону Кирхгофа и определяются контурные токи. Затем от контурных токов переходят к токам в ветвях.

Расчёт схемы производится **в следующей последовательности**:

1. Во всех ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов.
2. Определяются независимые контуры в схеме.
3. Выбираются условно положительные направления контурных токов.
4. Составляется система уравнений на основании первого закона Кирхгофа с учётом обобщённого закона Ома для выбранных контуров:
5. Решая полученную систему уравнений, находят значения контурных токов.
6. По найденным значениям контурных токов определяются токи ветвей.

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. В задаче заданы значения ЭДС источников  $E_1$ ,  $E_2$  и сопротивлений всех резисторов  $R_1$ - $R_6$ . Требуется определить токи в ветвях схемы  $I_1$ - $I_6$  методом контурных токов.

1. Во всех ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов.
2. Определяются независимые контуры в схеме. На рисунке 9 они обозначены римскими цифрами.
3. Выбираются условно положительные направления контурных токов  $I_I$ - $I_{III}$ . В данной задаче – по часовой стрелке.
4. Составляется система уравнений на основании первого закона Кирхго-



фа с учётом обобщённого закона Ома для выбранных трёх независимых контуров:

$$\left. \begin{aligned} I_I R_{11} + I_{II} R_{12} + I_{III} R_{13} &= E_I; \\ I_I R_{21} + I_{II} R_{22} + I_{III} R_{23} &= E_{II}; \\ I_I R_{31} + I_{II} R_{32} + I_{III} R_{33} &= E_{III}, \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

где  $R_{11}, R_{22}, R_{33}$  – собственные сопротивления контуров:

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_4; \quad R_{22} = R_1 + R_3 + R_5; \quad R_{33} = R_4 + R_5 + R_6; \quad (1.8)$$

$R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}, R_{31}, R_{32}$  – сопротивления смежных ветвей контуров:

$$R_{12} = R_{21} = -R_1; \quad R_{13} = R_{31} = -R_4; \quad R_{23} = R_{32} = -R_5; \quad (1.9)$$

$E_I, E_{II}, E_{III}$  – контурные ЭДС;

$$E_I = E_1 - E_2; \quad E_{II} = 0; \quad E_{III} = E_2. \quad (1.10)$$

С учётом (1.8-1.10) система уравнений (1.7) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} - \text{ для контура } I: \quad I_I(R_1 + R_2 + R_4) - I_{II}R_1 - I_{III}R_4 &= E_1 - E_2; \\ - \text{ для контура } II: \quad I_{II}(R_1 + R_3 + R_5) - I_I R_1 - I_{III}R_5 &= 0; \\ - \text{ для контура } III: \quad I_{III}(R_4 + R_5 + R_6) - I_I R_4 - I_{II}R_5 &= E_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

При этом ЭДС, направления которых совпадают с направлением контурного тока, имеют знак «плюс», в противном случае – знак «минус».

5. Решая уравнения (1.11) совместно, определяются контурные токи  $I_I$  и  $I_{II}, I_{III}$ . затем от контурных токов переходим к токам в ветвях.

6. По найденным значениям контурных токов определяются токи ветвей.

Ветви схемы, по которым протекает один контурный ток, называются **внешними**, а ветви, по которым протекают несколько контурных токов, называются **общими**. Ток  $I_3$  во внешней ветви совпадает по величине и по направлению с контурным током  $I_{II}$

$$I_3 = I_{II}.$$

Аналогично

$$I_2 = I_I; \quad I_6 = I_{III}.$$

Ток в общей ветви равен алгебраической сумме контурных токов, протекающих в этой ветви.

$$I_1 = -I_I + I_{II}; \quad I_5 = -I_{II} + I_{III}; \quad I_4 = -I_I + I_{III}.$$

### Рекомендации при решении задач:

1. Контурные выбирают произвольно, но целесообразно выбрать контуры таким образом, чтобы их внутренняя область не пересекалась ни с одной ветвью, принадлежащей другим контурам.

2. Контурные токи желательно направлять одинаково (по часовой стрелке или против).

3. Если нужно определить ток в одной ветви сложной схемы, необходимо сделать его контурным.

4. Если в схеме имеется ветвь с известным контурным током, этот ток следует сделать контурным, благодаря чему количество уравнений становится на единицу меньше.

### 2.2.3 Метод узловых потенциалов

Этот метод также применяется для расчёта сложных электрических цепей и позволяет уменьшить количество составляемых уравнений и упростить решение задачи. Суть метода узловых потенциалов заключается в том, что один из узлов схемы заземляется и его потенциал принимается равным нулю. Далее определяются потенциалы остальных узлов, что дает возможность определить напряжения на зажимах каждой ветви. Затем, используя закон Ома (1.2), определяются токи в ветвях.

Расчёт схемы производится по следующему алгоритму.

1. В схеме определяется число узлов, узлы нумеруются.

2. Потенциал любого узла, чаще последнего по номеру принимается равным нулю (заземляется).

3. Составляется система уравнений на основании первого закона Кирхгофа с учётом обобщённого закона Ома для полученного числа узлов (за исключением заземленного узла) следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 G_{11} + \varphi_2 G_{12} + \varphi_3 G_{13} + ..\varphi_n G_{1n} &= I_{11}; \\ \varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} + \varphi_3 G_{23} + ..\varphi_n G_{2n} &= I_{22}; \\ \varphi_1 G_{31} + \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} + ..\varphi_n G_{3n} &= I_{33}; \\ ..... \\ \varphi_1 G_{n1} + \varphi_2 G_{n2} + \varphi_3 G_{n3} + ..\varphi_n G_{nn} &= I_{nn}. \end{aligned} \right\}$$

4. Решается система уравнений, и находятся потенциалы узлов.

5. Используя закон Ома для ветвей не содержащих источники ЭДС (1.1) и обобщенный закон Ома, для ветвей, содержащих источники ЭДС (1.2) по найденным потенциалам вычисляются токи в ветвях

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. Известны значения ЭДС источников  $E_1, E_2$  и сопротивлений всех резисторов  $R_1-R_6$ . Требуется определить токи в ветвях схемы  $I_1-I_6$  методом узловых потенциалов.

1. Обозначим на схеме узлы  $a, b, c, d$ . Потенциал узла  $d$  принимаем равным нулю ( $\varphi_d = 0$ ).

2. Составляем систему уравнений на основании первого закона Кирхгофа с учётом обобщённого закона Ома для узлов  $a, b, c$ .

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a G_{11} + \varphi_b G_{12} + \varphi_c G_{13} &= I_{11}; \\ \varphi_a G_{21} + \varphi_b G_{22} + \varphi_c G_{23} &= I_{22}; \\ \varphi_a G_{31} + \varphi_b G_{32} + \varphi_b G_{33} &= I_{33}, \end{aligned} \right\}$$

где  $G_{11}$ ,  $G_{22}$ ,  $G_{33}$  – собственные проводимости ветвей, подсоединённые соответственно к узлам  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (всегда со знаком «плюс»):

$$G_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad G_{22} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}; \quad G_{33} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}.$$

$G_{12}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{31}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{32}$  – взаимные проводимости ветвей, соединяющие соответствующие узлы (всегда со знаком «минус»).

$$G_{12} = G_{21} = -\frac{1}{R_1}; \quad G_{13} = G_{31} = -\frac{1}{R_3}; \quad G_{23} = G_{32} = -\frac{1}{R_5}.$$

$I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$  – узловые токи, токи в ветвях, содержащие источники ЭДС и подключенные к соответствующему узлу. Вычисляются, как отношение источника ЭДС, действующего в данной ветви к сопротивлению данной ветви.

При этом источник ЭДС, направленный к узлу, принимается со знаком «плюс», в противном случае – со знаком «минус».

$$I_{11} = \frac{E_1}{R_2}; \quad I_{22} = \frac{E_2}{R_4}; \quad I_{33} = 0.$$

## 2.3 Энергетический баланс в электрических цепях

При протекании токов по резисторам в них выделяется теплота. На основании закона сохранения энергии количество теплоты, выделяющееся в единицу времени в резисторах схемы, должно равняться энергии, доставляемой за то же время источником питания. То есть, в любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс – баланс мощностей, который читается так: алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии (в частности, источников тока и источников ЭДС) равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии (в частности, резистивных элементов).

Уравнение баланса мощностей при питании только от источников ЭДС имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{i=m} E_i I_i = \sum_{j=1}^{j=n} I_j^2 R_j.$$

Причём, если направление тока  $I$ , протекающего через источник ЭДС  $E$ , совпадает с направлением ЭДС, то источник ЭДС является источником энергии и в уравнении энергетического баланса произведение  $EI$  принимается со знаком «плюс». Если же направление тока  $I$  встречно направлению ЭДС  $E$ , то источник ЭДС является приёмником энергии и в уравнении энергетического баланса произведение  $EI$  принимается со знаком «минус».

Запишем уравнение баланса мощностей для схемы (рисунок. 10).

Предположим, что в схеме рассматриваемой цепи указаны истинные направления токов в ветвях. Тогда выражение для баланса мощностей будет иметь вид:

$$E_1 I_2 - E_2 I_3 + E_3 I_4 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_6^2 R_7.$$

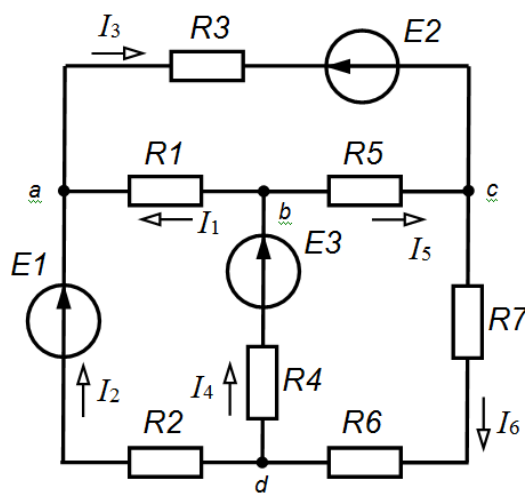


Рисунок 10 – Схема разветвлённой электрической цепи

Следует отметить, что баланс мощностей часто является проверкой правильности решения задачи. Если баланс мощностей сходится с погрешностью, не превышающей 3 %, то задача решена верно. В противном случае – нет.

## 2.4 Потенциальная диаграмма

*Потенциальная диаграмма* – это графическое изображение распределения электрического потенциала вдоль замкнутого контура в зависимости от сопротивления участков, входящих в выбранный контур.

Диаграмма строится после нахождения токов (решения задачи) по одному из вышеперечисленных методов. По оси абсцисс диаграммы откладываются сопротивления вдоль выбранного контура, начиная с какой-либо произвольной точки, по оси ординат – потенциалы этих точек. Каждой точке участка цепи или замкнутого контура соответствует своя точка на потенциальной диаграмме.

Последовательность построения потенциальной диаграммы следующая:

1. Задаются токи в ветвях схемы с указанием их истинных направлений.
2. На схеме указываются характерные точки, между которыми содержится один элемент (резистор или ЭДС).
3. Заземляется любая точка, потенциал в которой будет равен нулю, а потенциалы других точек рассчитываются. Если направление обхода контура совпадает с направлением тока через резистор, то потенциал уменьшается. При совпадении направления обхода контура с направлением ЭДС потенциал увеличивается. И наоборот.
4. Строится потенциальная диаграмма, при этом на оси абсцисс в выбранном масштабе откладываются сопротивления между характерными точками, начало координат должно соответствовать точке с нулевым потенциалом.
5. На оси ординат в масштабе откладываются потенциалы характерных точек.
6. Полученные точки соединяются прямыми линиями.
7. На оси абсцисс в масштабе откладываются сопротивления между характерными точками.

Рассмотрим на примере построение потенциальной диаграммы замкнутого контура фрагмента цепи, изображенного на рисунке 11, учитывая что на схеме указаны истинные направления токов в ветвях.

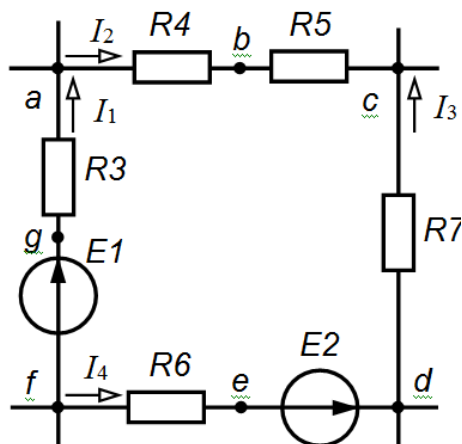


Рисунок 11

1. Задаём токи в ветвях схемы и указываем их истинные направлений.
2. На схеме указываем характерные точки:  $a, b, c, d, e, f, g$ , между которыми содержится один элемент (резистор или ЭДС).
3. Заземляем точку  $a$ , потенциал в которой будет равен нулю, и рассчитываем потенциалы других точек:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 0; & \varphi_b &= \varphi_a - I_2 R_4; & \varphi_c &= \varphi_b - I_2 R_5; & \varphi_d &= \varphi_c + I_3 R_7; \\ \varphi_e &= \varphi_d + I_4 R_6; & \varphi_f &= \varphi_e - E_2; & \varphi_g &= \varphi_f + E_1; & \varphi_a &= \varphi_g - I_1 R_3. \end{aligned}$$

4. Строим потенциальную диаграмму (рисунок 12). При этом на оси абсцисс в выбранном масштабе откладываем сопротивления между характерными точками, начало координат должно соответствовать точке  $a$  с нулевым потенциалом.

5. На оси ординат в масштабе откладываем потенциалы характерных точек.

6. Полученные точки соединяем прямыми линиями.

7. На оси абсцисс в выбранном масштабе откладываем сопротивления между характерными точками.

Произвольно примем потенциал одной из точек, например, точки  $a$ ,  $\varphi_a = 0$ . Эту точку на диаграмме (рисунок 12) поместим в начало координат. Отметим на диаграмме потенциалы всех точек контура и соединим их прямыми линиями.

Потенциальная диаграмма позволяет определить напряжения между любыми точками цепи, если на оси ординат отмечены потенциалы этих точек.

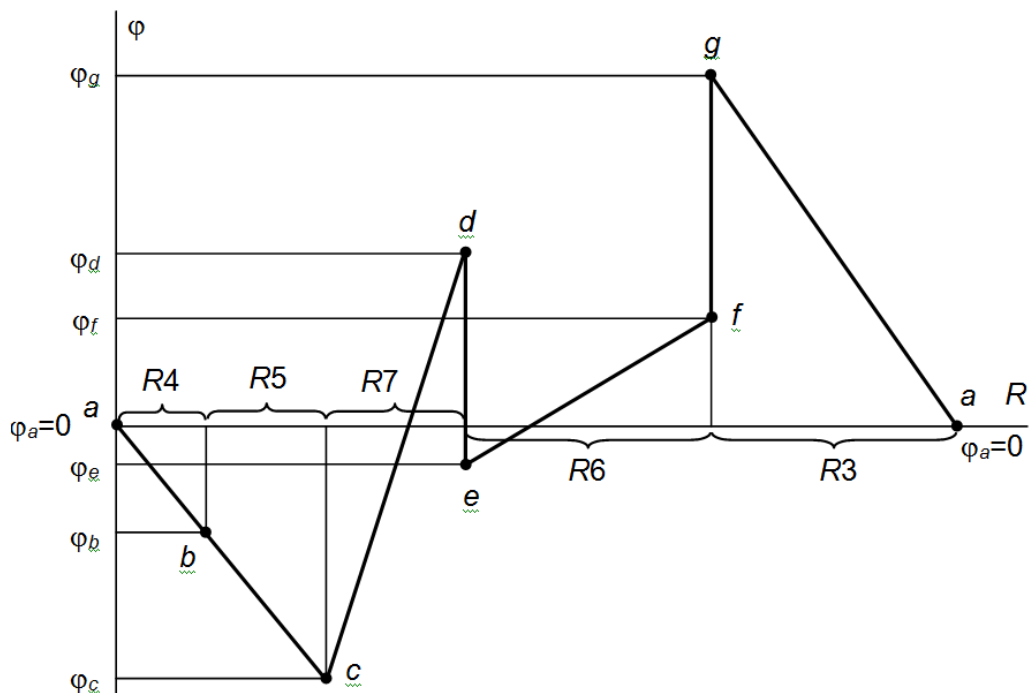


Рисунок 12 – Потенциальная диаграмма

### 3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе исследуются режимы работы линейной разветвленной цепи постоянного тока.

Объектом исследования являются цепи постоянного тока, содержащие линейные элементы резисторы из комплекта мини-блоков учебного стенда.

Источником постоянного тока служат два генератора постоянных напряжений из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ: регулируемый генератор (0-15 В) и нерегулируемый (15 В). Оба тумблера на этих генераторах при выполнении работы необходимо установить в верхнее положение.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

### 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Начертить схему исследуемой цепи для выбранного варианта. Варианты схем представлены на рисунке 13.

Параметры цепи для вариантов заданы в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
5	15	10	22	33	47	100	150

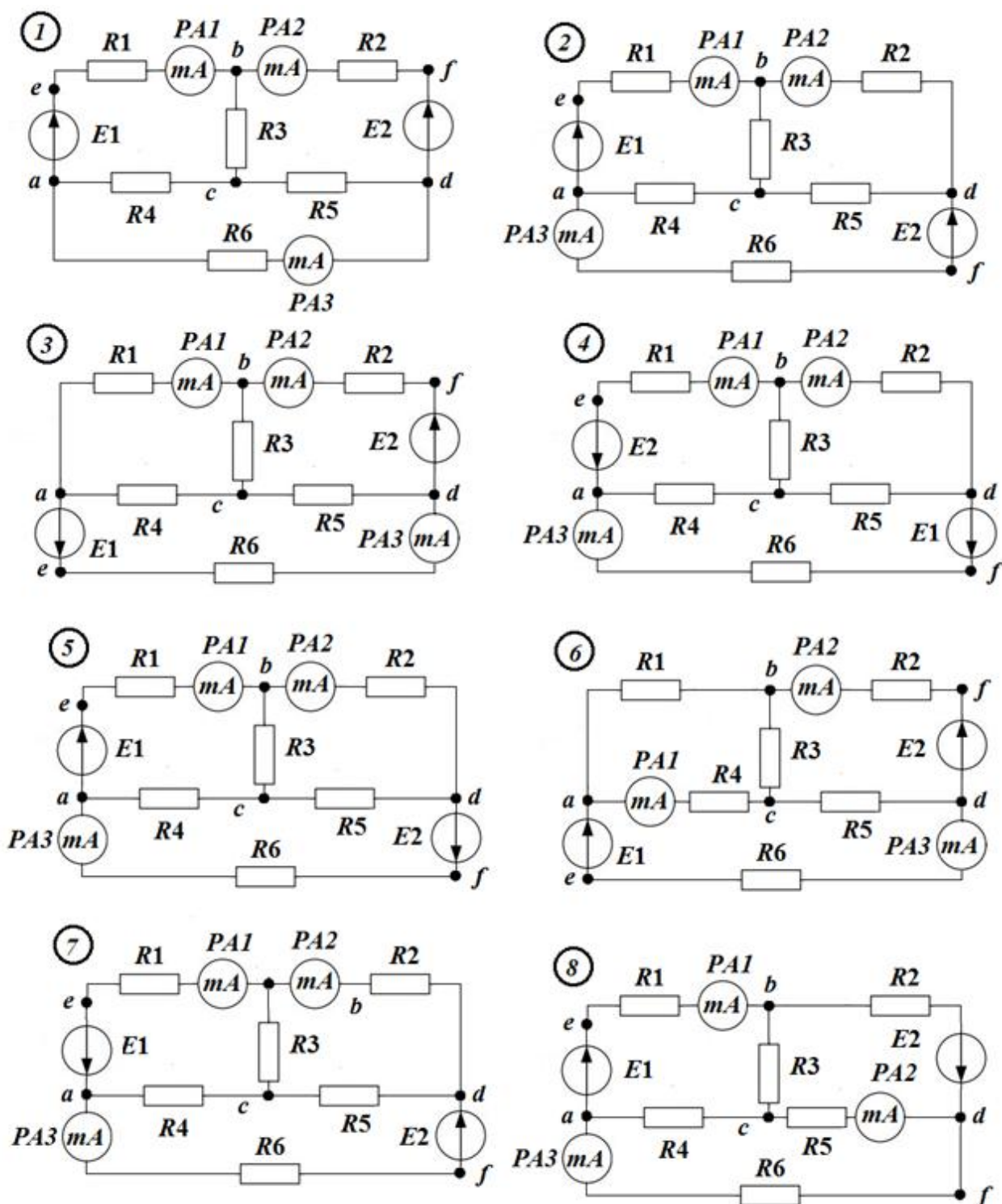


Рисунок 13 – Варианты схем к лабораторной работе № 1

4.2 Рассчитать для выбранной схемы методом непосредственного применения законов Кирхгофа токи в её ветвях и падения напряжений на каждом резисторе. При расчёте рекомендуется использовать ЭВМ. Полученные результаты занести в таблицы Б.2, Б.3 (приложение Б).

4.3 Рассчитать для выбранной схемы токи в её ветвях методом контурных токов. Результаты занести в таблицу Б.2. Сравнить полученные результаты с результатами, рассчитанными в п.4.2.

4.4 Рассчитать токи в выбранной схеме методом узловых потенциалов,

приняв потенциал одного из узлов равным нулю. Результаты занести в таблицу Б.2. Сравнить полученные результаты с результатами, рассчитанными в пп. 4.2, 4.3.

## **5 Экспериментальная часть**

5.1 Собрать на наборной панели электрическую цепь выбранного варианта, включив три мультиметра в режиме амперметров как показано на рисунке 13. Пример монтажной схемы изображён на рисунке Б.1 (приложение Б).

5.2 Тумблеры SA1, SA2 на источниках напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (рисунок Б.1, приложение Б) установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений  $U_{BX} = 5$  В. Установить заданные в таблице Б.1 величины  $R1, R2, R3, R4, R5, R6$  из миниблоков резисторов. Установить на мультиметрах (РА1, РА2, РА3) режим измерения постоянного тока –  $I$  с диапазоном 200 мА.

5.3 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.4 Включить выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров.

5.5 Измерить амперметрами РА1-РА3 токи в исследуемых ветвях. Подсоединить амперметры РА1-РА3 в остальные ветви и измерить токи в них. Измеренные величины занести в таблицу Б.2 протокола испытаний.

5.6 Отсоединить мультиметр РА1, закоротив место его отсоединения, и перевести его в режим измерения постоянного напряжения – PV1. Подсоединяя вольтметр к зажимам резисторов, измерить падения напряжений на них. Измеренные величины занести в таблицу Б.3 протокола испытаний.

5.7 Выбрать в электрической цепи точку с нулевым потенциалом, аналогича выбранной в п. 4.4.

5.8 Измерить с помощью вольтметра PV1 потенциалы всех узлов цепи относительно выбранной точки с нулевым потенциалом. Результаты занести в таблицу Б.4.

5.9 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров и выключатель QF.

5.10 По измеренным потенциалам вычислить их разность.

5.11 Используя закон Ома, вычислить токи во всех ветвях исследуемой схемы. Результаты занести в таблицу Б.5 и сравнить их с результатами таблицы Б.3.

5.12 Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

5.13 Составить баланс мощностей для исследуемой схемы.

## **6 Содержание отчёта**

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи для выбранного варианта.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта требуемыми



методами.

6.5 Описание экспериментальной части лабораторной работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Потенциальная диаграмма исследуемой цепи.

6.8 Сравнение измеренных экспериментальных значений с рассчитанными значениями согласно пп. 4.2-4.4.

6.9 Расчёт баланса мощностей исследуемой цепи.

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Какой ток называется постоянным?

7.2 Какие источники электрической энергии относятся к источникам напряжения (ЭДС)?

7.3 Какие схемы замещения источников электрической энергии Вы знаете?

7.4 Как измерить ЭДС источника и его внутреннее сопротивление?

7.5 Какие режимы работы источника электрической энергии Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.

7.6 Как аналитически найти условие получения максимальной мощности во внешней цепи (режим согласования)?

7.7 Как преобразовать схему замещения источника напряжения в схему замещения источника тока и наоборот?

7.8 Что такое «внешняя характеристика» источника электрической энергии? Какой вид имеет эта характеристика у источника ЭДС и источника тока?

7.9 Сформулируйте обобщенный закон Ома для активного участка цепи.

7.10 Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа.

7.11 Какие методы расчёта разветвленных электрических цепей постоянного тока Вы знаете? Дайте им краткую сравнительную характеристику и обоснуйте области применимости.

7.12 Каким уравнением можно воспользоваться для наиболее полной проверки правильности расчета электрической цепи?

7.13 Каким образом рассчитывается мощность, отдаваемая источниками ЭДС?

7.14 Зависит ли вид второго закона Кирхгофа от направления обхода контура?

7.15 В каких случаях расчёт цепи целесообразно проводить по методу узловых потенциалов, а в каких – по методу контурных токов?

7.16 Сформулируйте и запишите систему уравнений для расчёта цепи методом контурных токов.

7.17 Сформулируйте и запишите систему уравнений для расчёта цепи методом узловых потенциалов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДАМИ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА И НАЛОЖЕНИЯ

### 1 Цели работы

Сравнение результатов расчёта цепей постоянного тока методами эквивалентного генератора и наложения с результатами экспериментальных исследований.

### 2 Основные положения теории

#### 2.1 Метод эквивалентного генератора

Этот метод используется, когда необходимо определить ток только в одной ветви сложной цепи. Сущность метода заключается в том, что по отношению к исследуемой ветви сложная цепь заменяется активным двухполюсником, схема замещения которого представляется эквивалентным источником (эквивалентным генератором) с ЭДС  $E_{\text{экв}}$  и внутренним сопротивлением  $R_{\text{вн}}$ , нагрузкой для которого является сопротивление  $R_n$  исследуемой ветви.

Расчёт производится в следующей последовательности.

1. Ветвь, выбранная для расчёта, удаляется из схемы.
2. Обозначаются узлы, к которым она присоединялась. Оставшаяся часть схемы и будет представлять собой активный двухполюсник (эквивалентный генератор) с эквивалентной ЭДС  $E_{\text{экв}}$  и внутренним сопротивлением  $R_{\text{вн}}$ .
3. Определяется эквивалентная ЭДС генератора  $E_{\text{экв}}$ , которая равна напряжению холостого хода  $U_{\text{хх}}$  на зажимах двухполюсника.
4. Определяется внутреннее сопротивление генератора  $R_{\text{вн}}$  относительно зажимов двухполюсника, при этом идеальные источники ЭДС отбрасываются и закорачиваются.
5. Подключается удалённая ветвь к эквивалентному генератору.
6. По найденным значениям эквивалентной ЭДС  $E_{\text{экв}}$  и внутреннего сопротивления генератора  $R_{\text{вн}}$ , определяется искомый ток в выбранной ветви.

**Пример.** В электроцепи, схема которой представлена на рисунке 14, определить ток  $I_5$  в ветви с резистором  $R_5$ .

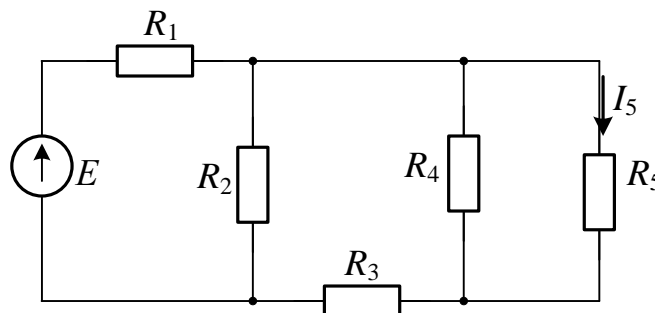


Рисунок 14

### Решение

1. Ветвь с резистором  $R_5$  удаляем из схемы (рисунок 15).

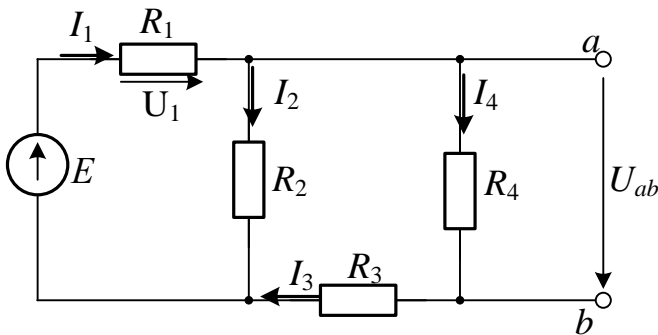


Рисунок 15

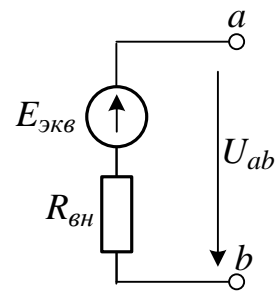


Рисунок 16

2. Узлы, к которым присоединялась ветвь с резистором  $R_5$  обозначим  $a$  и  $b$ . Оставшуюся часть схемы представим активным двухполюсником (эквивалентным генератором) с эквивалентной ЭДС  $E_{экв}$  и внутренним сопротивлением  $R_{вн}$  (рисунок 16).

3. Определяем эквивалентную ЭДС генератора  $E_{экв}$ , равную напряжению холостого хода  $U_{xx}$  на зажимах двухполюсника.

$$I_1 = \frac{E}{R_{экв}} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4}}.$$

Находим падение напряжения  $U_{ав}$  равную напряжению  $U_{xx}$ :

$$U_{ab} = I_1 R_{234} = I_1 \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4},$$

тогда

$$I_4 = \frac{U_{ab}}{R_3 + R_4} = \frac{I_1 R_2}{R_2 + R_3 + R_4};$$

$$E_{экв} = U_{xx} = I_4 R_4.$$

4. Определяем внутреннее сопротивление генератора  $R_{вн}$  относительно зажимов  $a$  и  $b$  двухполюсника, при этом отбросив и закоротив идеальный источник ЭДС  $E$ .

$$R_{1,2,3} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3; \quad R_{вн} = \frac{R_{1,2,3} R_4}{R_{1,2,3} + R_4}.$$

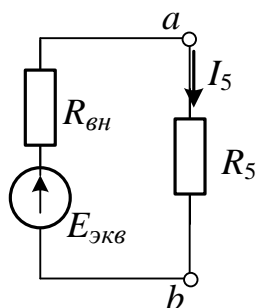


Рисунок 17

5. Подключаем удаленную ветвь с резистором  $R_5$  к эквивалентному генератору (рисунок 17).

6. По найденным значениям эквивалентной ЭДС генератора  $E_{экв}$  и внутреннего сопротивления генератора  $R_{вн}$ , определяем искомый ток  $I_5$  в выбранной ветви по следующей формуле:

$$I_5 = \frac{E_{экв}}{R_5 + R_{вн}}.$$

## 2.2 Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную «звезду»

При расчёте схем встречаются сложные соединения элементов цепи, которые нельзя отнести ни к последовательным, ни к параллельным соединениям. Примерами являются соединения по схеме «звезда» (рисунок 18) и по схеме «треугольник» (рисунок 19).

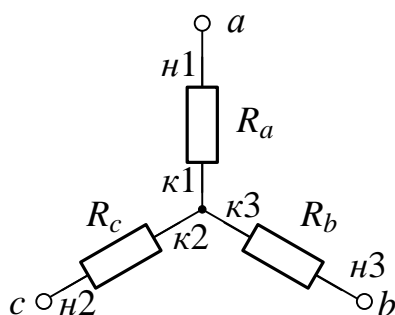


Рисунок 18

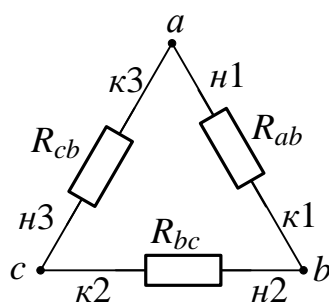


Рисунок 19

Соединение резисторов по схеме «звезда» – это такое соединение, в котором условные концы резисторов соединены в одном узле, а условные начала подключены к источнику.

Соединение резисторов по схеме «треугольник» – это такое соединение, в котором условный конец первого резистора соединен с условным началом второго, условный конец второго – с условным началом третьего и условный конец третьего – с началом первого. Иными словами, это соединение трёх резисторов, образующих замкнутый контур.

Расчёт цепей, содержащих такие соединения, в большинстве случаев не представляется возможным без преобразования одного вида соединения в другой.

Для преобразования соединения резисторов в «треугольник», соединенных до этого в эквивалентную «звезду», необходимо воспользоваться следующими соотношениями:

$$R_{ab} = R_a + R_b + R_a R_b / R_c;$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + R_b R_c / R_a;$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + R_c R_a / R_b.$$

Для преобразования соединения резисторов в схему «звезда», соединенных до этого в эквивалентный «треугольник», необходимо воспользоваться следующими соотношениями:

$$R_a = R_{ab} R_{ca} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca});$$

$$R_b = R_{bc} R_{ab} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca});$$

$$R_c = R_{ca} R_{bc} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}).$$

**Пример.** Рассмотрим применение эквивалентных преобразований для следующей цепи (рисунок 20). В результате преобразования схемы «звезда» в эквивалентный «треугольник», получим схему, представленную на рисунке 21.

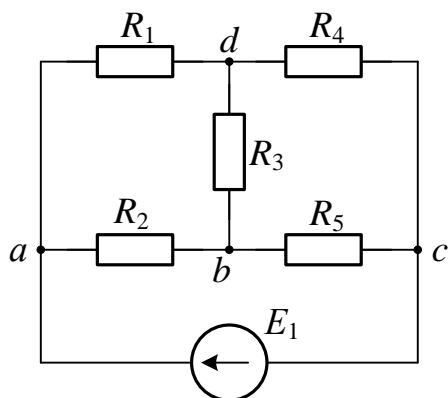


Рисунок 20

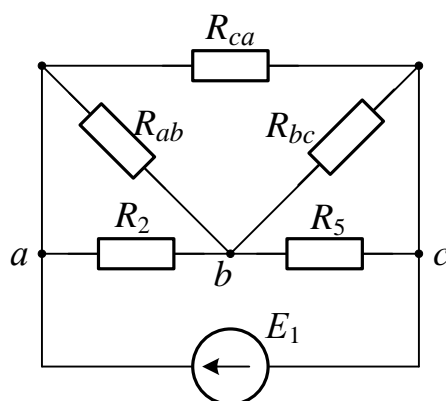


Рисунок 21

Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи можно определить из выражения:

$$R_{\text{экв}} = (R_2 \parallel R_{ab} + R_5 \parallel R_{ca}) \parallel R_{bc}.$$

В результате преобразования схемы «треугольник» в эквивалентную «звезду», получим схему, представленную на рисунке 22.

При этом эквивалентное сопротивление цепи можно определить из выражения:

$$R_{\text{экв}} = (R_d + R_4) \parallel (R_b + R_5) + R_a.$$

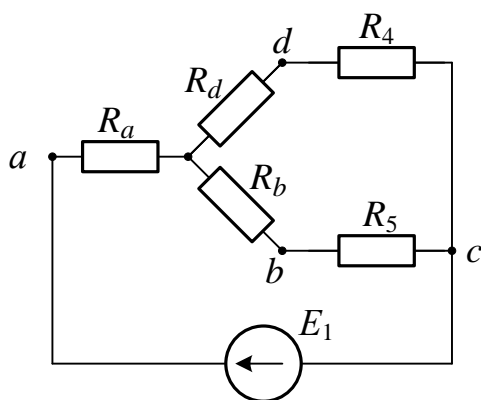


Рисунок 22

Очевидно, второе преобразование приводит к более простому расчёту, чем первое.

## 2.2 Способы соединения элементов электрической цепи

### 2.2.1 Последовательное соединение элементов

Последовательное соединение резисторов – это такое соединение, в котором условный конец одного резистора соединен с условным началом второго резистора, а конец второго резистора с началом третьего и так далее.

Схема последовательного соединения резисторов представим на рисунке 23.

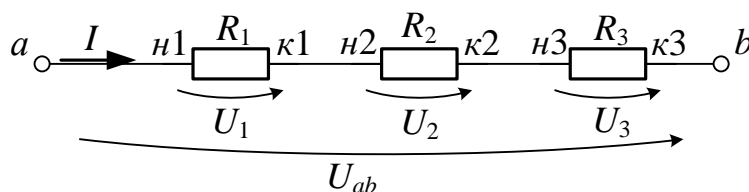


Рисунок 23 – Последовательное соединение резисторов

Последовательное соединение элементов между двумя узлами образуют ветвь, по которой проходит один и тот же электрический ток  $I$ .

Определим эквивалентное (общее) сопротивление цепи.

На основании второго закона Кирхгофа общее напряжение  $U$  всей цепи равно сумме напряжений на элементах

$$U_{ab} = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3).$$

Отсюда следует, что

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Таким образом, при последовательном соединении элементов общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков. Следовательно, цепь с любым числом последовательно включенных сопротивлений можно заменить простой цепью с одним эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{экв}}$ .

$$R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^{k=n} R_k ,$$

где  $n$  – общее количество резисторов в цепи.

Следует отметить, что при равенстве сопротивлений всех резисторов, имеем

$$R_1 = R_2 = R_3 = R; \quad R_{\text{экв}} = 3R.$$

Тогда в общем виде получим:

$$R_{\text{экв}} = Rn,$$

где  $n$  – общее количество резисторов в цепи.

### 2.2.2 Параллельное соединение элементов

Параллельное соединение резисторов – это такое соединение, в котором условные начала всех резисторов соединены в одном узле, а их концы в другом узле (рисунок 24).

При таком соединении ко всем резисторам будет приложено одно и то же напряжение  $U_{ab} = U_{12}$ .

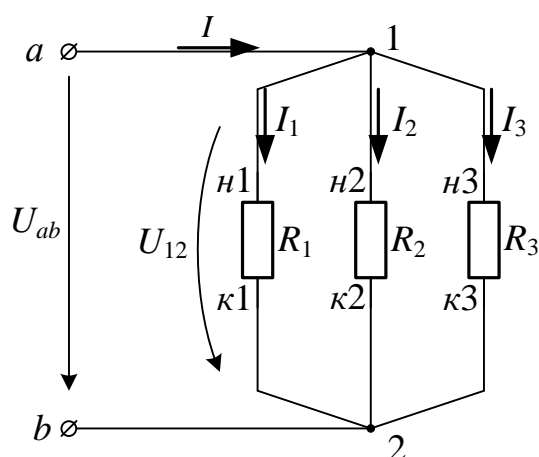


Рисунок 24 – Параллельное соединение резисторов

Определим эквивалентное (общее) сопротивление цепи.

В этом случае для узлов цепи 1 и 2 на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что общий ток  $I$  всей цепи равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или с учётом закона Ома

$$\frac{U_{ab}}{R_{\text{экв}}} = \frac{U_{12}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} + \frac{U_{12}}{R_3} .$$

Тогда

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{(R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2)}{R_1 R_2 R_3}.$$

В результате имеем:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}.$$

В общем виде при параллельном соединении эквивалентное (общее) сопротивление всей цепи будет определяться выражением:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{R_k},$$

где  $n$  – общее количество резисторов в цепи.

Следует отметить, что при равенстве сопротивлений всех резисторов

$$R_1 = R_2 = R_3 = R, \quad 1/R_{\text{экв}} = 1/3R.$$

Тогда в общем виде получим:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n},$$

где  $n$  – общее количество резисторов в цепи.

## 2.3 Метод эквивалентных преобразований (свертывания)

Метод эквивалентных преобразований применяется при смешанном соединении элементов цепи, подключенных к одному источнику питания.

**Смешанным** называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных сопротивлений.

Для цепи, представленной на рисунке 25, расчёт эквивалентного сопротивления начинается с конца схемы.

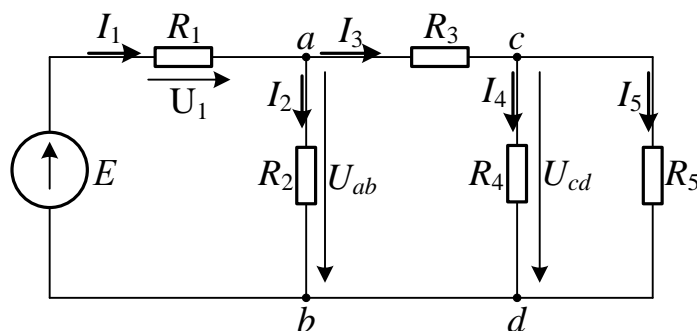


Рисунок 25 – Смешанное соединение резисторов

Для упрощения расчётов примем, что все сопротивления в этой схеме являются одинаковыми:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R.$$



Сопротивления  $R_4$  и  $R_5$  включены параллельно, тогда сопротивление участка цепи  $cd$  равно:

$$R_{cd} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R^2}{2R}.$$

В этом случае исходную схему (рисунок 25) можно представить в следующем виде (рисунок 26).

На схеме (рисунок 26) сопротивление  $R_3$  и  $R_{cd}$  соединены последовательно, тогда сопротивление участка цепи  $ad$  равно:

$$R_{ad} = R_3 + R_{cd}.$$

Тогда схему (рисунок 26) можно представить в сокращенном варианте (рисунок 27):

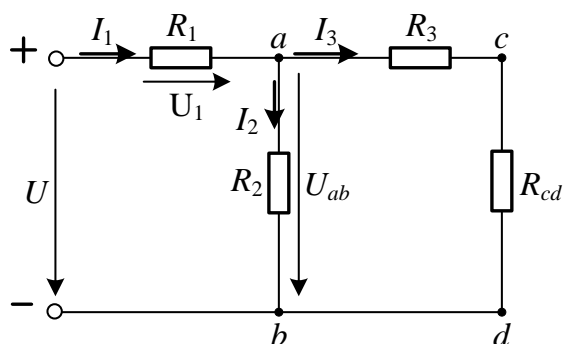


Рисунок 26

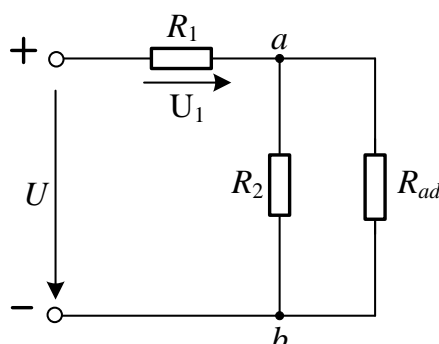


Рисунок 27

На схеме (рисунок 27) сопротивление  $R_2$  и  $R_{ad}$  соединены параллельно, тогда сопротивление участка цепи  $ab$  равно

$$R_{ab} = \frac{R_2 \cdot R_{ad}}{R_2 + R_{ad}} = \frac{R \frac{3}{2} R}{R + \frac{3}{2} R} = \frac{3}{5} R.$$

Схему (рисунок 27) можно представить в упрощенном варианте (рисунок 28), где сопротивления  $R_1$  и  $R_{ab}$  включены последовательно.

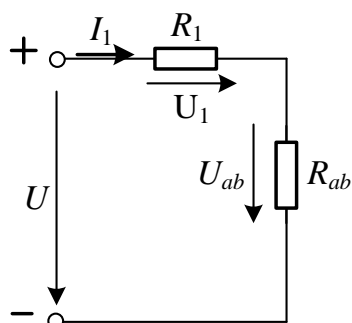


Рисунок 28

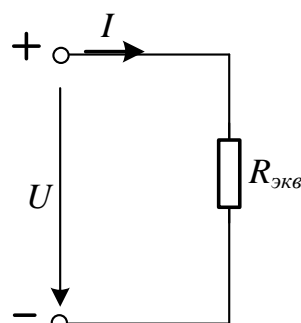


Рисунок 29

Тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы (рисунк 25) определяется выражением:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{ab} = R + \frac{3}{5}R = \frac{8}{5}R.$$

В результате эквивалентных преобразований исходная схема (рисунк 25) представлена в виде схемы (рисунк 29) с одним сопротивлением  $R_{\text{экв}}$ .

Потребляемый электрической цепью ток  $I_1$  на основании закона Ома определяется выражением:

$$I_1 = E/R_{\text{экв}}.$$

Токи в ветвях соответственно могут быть найдены следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= I_2 R_{ab}; & I_2 &= U_{ab} / R_2; & I_3 &= U_{ac} / R_{ac}; \\ U_{cd} &= (I_4 + I_5) R_{cd}; & I_4 &= U_{cd} / R_4; & I_5 &= U_{cd} / R_5. \end{aligned}$$

## 2.4 Метод наложения (суперпозиции)

Принцип наложения справедлив только в линейных электрических цепях. Он формулируется следующим образом:

**Ток в  $k$ -ой ветви равен алгебраической сумме токов, вызываемых каждой из ЭДС схемы в отдельности.**

Принцип наложения положен в основу метода расчёта линейных электрических цепей, получившего название **метода наложения**.

При расчёте цепей данным методом поступают следующим образом: поочередно рассчитывают токи, возникающие от действия каждой из ЭДС, мысленно замыкая накоротко остальные, но оставляя в схеме их внутренние сопротивления. Находят токи в ветвях путём алгебраического сложения частичных токов.

Рассмотрим для примера схему, представленную на рисунке 30, а.

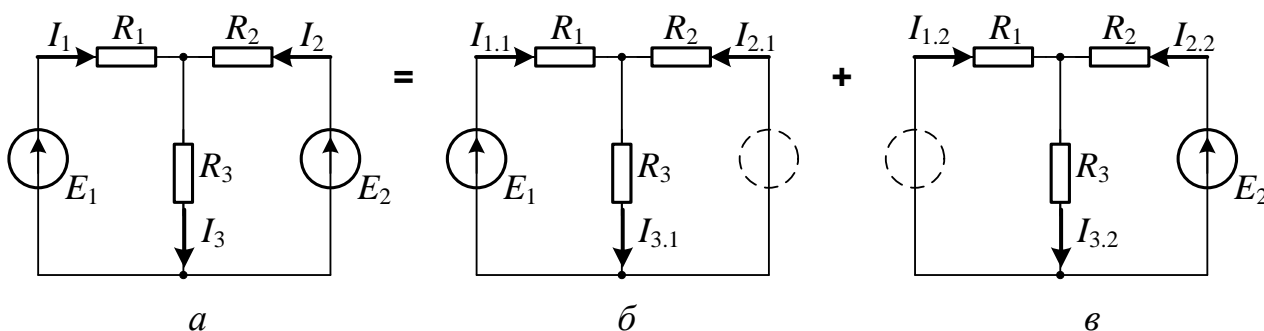


Рисунок 30 – Расчёт цепи методом наложения

Расчёт схемы производится в следующей последовательности.

1. В ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов.

2. Определяются частичные токи в ветвях от действия каждого источника ЭДС в отдельности.

3. Определяются токи в ветвях путём сложения их частичных токов.

Выполним расчёт схемы (рисунок 30,а) в указанной последовательности.

1. Принимаем в ветвях схемы условно положительные направления токов  $I_1 - I_3$ .

2. Определяем частичные токи в ветвях от действия каждого источника в отдельности.

После исключения ЭДС  $E_2$  получается простое смешанное соединение резистивных элементов (рисунок 30,б), Частный ток  $I_{1.1}$  в неразветвлённой части от действия источника ЭДС  $E_1$  определится выражением:

$$I_{1.1} = \frac{E_1}{R_{экв.1}} = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2}};$$

Токи в двух параллельных ветвях определяются следующим образом:

$$I_{2.1} = \frac{E_1 - R_1 I_{1.1}}{R_2};$$

$$I_{3.1} = \frac{E_1 - R_1 I_{1.1}}{R_3}.$$

Затем исключается ЭДС  $E_1$  (рисунок 30,в) и аналогично рассчитываются частные токи  $I_{1.2}$ ,  $I_{2.2}$ ,  $I_{3.2}$ .

3. По методу наложения токи в ветвях электрической цепи рисунок 30,а определяются следующим образом:

$$I_1 = I_{1.1} + I_{1.2}; \quad I_2 = I_{2.2} + I_{1.2}; \quad I_3 = I_{3.1} + I_{3.2}''.$$

Применяя метод наложения, можно определять частичные токи не отдельно от каждого источника, а от источников, разделённых на группы.

### 3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе осуществляется проверка выполнимости методов расчёта цепей постоянного тока по методам эквивалентного генератора и наложения.

Объектом исследования является цепь постоянного тока, содержащая линейные элементы резисторы из мини-блоков.

Источником постоянного тока служат два генератора постоянных напряжений из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ: регулируемый генератор (0-15 В) и нерегулируемый (15 В). Оба тумблера на этих генераторах при выполнении работы необходимо установить в верхнее положение. Для получения напряжения более 15 В оба генератора необходимо соединить последовательно. При этом для получения напряжения от 0 до 15 В следует установить тумблер SA1 на источнике 15 В в нижнее положение, а тумблер SA2 на источ-

нике 0-15 В установить в верхнее положение. Для получения напряжения выше 15 В оба тумблера установить в верхнее положение.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

#### 4 Расчётно-графическая часть

##### 4.1 Проверка метода эквивалентного генератора

4.1.1 Начертить схему исследуемой цепи, представленную на рисунке 31. Параметры цепи для каждого варианта заданы в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

№ варианта	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_3$ , В	$E_5$ , В
1	10	22	33	47	100	150	15	5
2	22	33	47	100	22	10	15	7
3	33	47	100	22	150	22	15	9
4	47	100	22	150	10	33	15	11
5	100	22	150	10	22	47	15	13
6	22	150	10	22	33	100	15	8

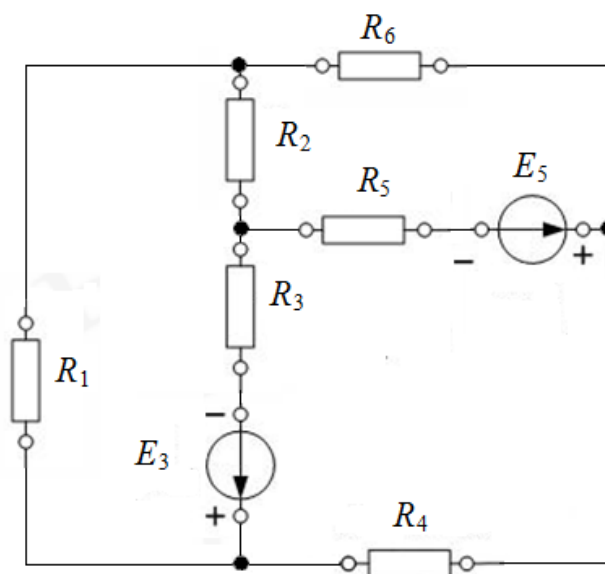


Рисунок 31 – Схема исследуемой цепи

4.1.2 Рассматривая цепь относительно резистора  $R_1$  как активный двухполюсник (эквивалентный генератор), рассчитать его параметры:  $U_{XX}$ ,  $R_{BX}$ ,  $I_{K3}$ . Для определения  $U_{XX}$  предлагается использовать метод контурных токов. Для определения  $R_{BX}$  предлагается использовать преобразование элементов «треугольник» в эквивалентную «звезду». Результаты расчётов занести в табли-

цу В.2. Начертить последовательную схему замещения активного двухполюсника. Вычислить значение тока  $I_1$  через  $R_1$  по полученной схеме замещения. Построить вольт-амперную характеристику активного двухполюсника  $U_1(I_1)$  при изменении  $R_1$  от 0 до  $\infty$ . Графически определить значение тока  $I_1$  и напряжения  $U_{R1}$  при  $R_1$  равном заданному и при  $R_1=R_{вн}$ .

4.1.3 Определить величину сопротивления  $R_1$ , при которой в нём выделяется максимальная мощность. Вычислить  $P_{\max}$ . Построить график зависимости  $P_1(R_1)$  при изменении  $R_1$  от 0 до  $\infty$ .

## 4.2 Проверка метода наложения

4.2.1 Для схемы, изображенной на рисунке 31 методом наложения рассчитать ток через сопротивление  $R_1$ . Для этого сначала закоротить источник  $E_5$  и методом эквивалентных преобразований смешанного содинения резисторов, используя замещение схемы элементов «треугольник» в эквивалентную «звезду», рассчитать ток  $I_{R1}^{E3}$  через  $R_1$  от действия источника  $E_3$ . Результаты расчётов занести в таблицу В.4.

4.2.2 Закоротить источник  $E_3$  и методом эквивалентных преобразований рассчитать ток  $I_{R1}^{E5}$  через  $R_1$  от действия источника  $E_5$ . Результаты расчётов занести в табл. В.4.

4.2.3 Вычислить ток через  $R_1$  по методу наложения. Результат занести в таблицу В.4.

## 5 Экспериментальная часть

5.1 Выбрать необходимые элементы цепи из комплекта стенда согласно варианту, заданному преподавателем (таблица В.1, приложение В)

5.2 Тумблеры SA1, SA2 на источниках напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (рисунок В.2) установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений  $E_5$  согласно таблице В.1 для выбранного варианта.

5.3 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке В.2. В качестве амперметра РА1 использовать мультиметр, установив режим измерения постоянного тока  $I$  с диапазоном 200 мА. В качестве вольтметра РВ1 использовать второй мультиметр, установив на нём режим измерения постоянного напряжения V-20 В.

5.4 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.5 Включить выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров.

5.6 Отключить резистор  $R_1$ , отсоединив провода от точек  $a$  и  $b$ , создав режим холостого хода. Измерить напряжение  $U_{хх}$  холостого хода, равное напряжению эквивалентного генератора. Данные измерений занести в таблицу В.2.

5.7 Закоротить проводом точки  $a$  и  $b$ , создав режим короткого замыка-

ния. Измерить напряжение  $U_{KЗ}$  короткого замыкания. Данные измерений занести в таблицу В.2.

5.8 По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить внутреннее сопротивление эквивалентного генератора:

$$R_{BH} = U_{XX} / I_{KЗ}.$$

5.9 Установить в исследуемой цепи вершину резистора  $R_1$  согласно таблице В.1. Измерить амперметром РА1 ток  $I_1$  и сравнить его с вычисленным значением в п. 4.2.

5.10 Изменяя сопротивление  $R_1$  от 0 до  $\infty$  (для 6-8 значений плюс значение, когда  $R_1 = R_{BH}$ ), измерить значения тока  $I_1$ . Результаты занести в таблицу В.3.

5.11 Используя полученные результаты измерений, рассчитать мощность  $P_1$  и занести в таблицу В.3.

5.12 Для схемы, собранной согласно рисунку В.2 замкнуть источник ЭДС  $E_5$ , для чего опустить переключатель SA2 в нижнее положение. Измерить амперметром РА1 ток  $I_{R1}^{E3}$  через  $R_1$ . Результат занести в таблицу В.4.

5.13 Вернуть переключатель SA1 в верхнее положение, а переключатель SA2 перевести в нижнее положение, замкнув тем самым ЭДС источника  $E_3$ . Измерить амперметром РА1 ток  $I_{R1}^{E5}$  через  $R_1$ . Результат занести в таблицу В.4.

5.14 Вычислить суммарное значение тока от действия обоих источников. Результат  $I_{R1}$  занести в таблицу В.4.

5.15 Сравнить значения экспериментальных исследований с результатами аналитических расчётов, выполненных в п.п. 4.2.1-4.2.3.

5.16 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров и выключатель QF.

## 6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи.

6.4 Предварительный расчет цепи для выбранного варианта требуемыми методами.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Вольт-амперная характеристика активного двухполюсника  $U_1(I_1)$  и график зависимости  $P_1(R_1)$  при изменении  $R_1$  от 0 до  $\infty$ .

6.8 Сравнение полученных экспериментальных значений со значениями рассчитанными в п.п. 4.2.1 и 4.2.2.

## 7 Контрольные вопросы

7.1 В каких случаях целесообразно использовать метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)?

7.2 Как распределяется общий ток между параллельно соединёнными ветвями?

7.3 В каких случаях источник электрической энергии работает как потребитель?

7.4 Каково внутреннее сопротивление активного двухполюсника, если при подключении по очереди сопротивлений 300 и 1200 Ом оказалось, что выделяющиеся в них мощности одинаковы.

7.5 Напишите формулы для преобразования схемы сопротивлений «треугольник» в эквивалентную «звезду», и наоборот.

7.6 В чём заключается сущность метода наложения?

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С $R$ -, $L$ -, $C$ -ЭЛЕМЕНТАМИ

### 1 Цель работы

Исследование резонансных явлений и частотных характеристик в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементы.

### 2 Основные положения теории

*Резонансом напряжений* называется явление совпадения начальных фаз мгновенных значений синусоидального напряжения и тока на участке электрической цепи, содержащем последовательно соединенные  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементы.

В состоянии резонанса напряжений угол сдвига фаз

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0.$$

Справедливы следующие выражения:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 = Z_0 \cos \varphi + jZ_0 \sin \varphi = R_0; \quad I_m(\underline{Z}) = 0; \quad X_0 = 0,$$

где  $\underline{Z}$  – полное комплексное сопротивление последовательного  $R$ - $L$ - $C$ -контура;  
 $\underline{Z}_0$  – полное комплексное сопротивление последовательного  $R$ - $L$ - $C$ -контура при резонансе напряжений;  
 $Z_0$  – модуль полного комплексного сопротивления последовательного  $R$ - $L$ - $C$ -контура при резонансе напряжений;  
 $X_0$  – эквивалентное реактивное сопротивление цепи

В линейной электрической цепи (рисунок 32) режим резонанса напряжений можно получить путём изменения частоты  $f$  питающего напряжения  $u(t)$  или величин параметров последовательно соединенных  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов.

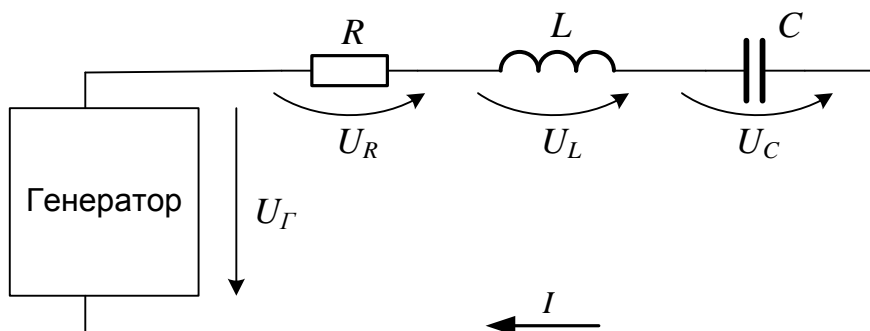


Рисунок 32 – Последовательное соединение  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов

На частоте резонанса  $\omega_0$  эквивалентное реактивное сопротивление цепи равно нулю



$$X_0 = X_L - X_C = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0, \quad (3.1)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота;  
 $X_L$  – сопротивление катушки;  
 $X_C$  – сопротивление конденсатора;  
 $L$  – индуктивность катушки, Гн;  
 $C$  – ёмкость конденсатора, Ф.

При этом индуктивное и ёмкостное сопротивление взаимно компенсируются, ток становится максимальным, а фазовый угол – нулевым (то есть ток и приложенное напряжение находятся в фазе). Резонансная частота легко находится из уравнения:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.2)$$

откуда следует:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.3)$$

Величина

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{L/C} = \rho \quad (3.4)$$

имеет размерность сопротивления и носит название *волнового (характеристического) сопротивления контура*.

Резонансные свойства контура характеризует добротность

$$Q = \frac{U_{L0}}{U_{R0}} = \frac{U_{C0}}{U_{R0}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{\rho}{R}. \quad (3.5)$$

При резонансе напряжение на входе контура  $U = U_{R0}$ . Добротность  $Q$  показывает, во сколько раз напряжения на реактивных элементах  $U_{L0} = U_{C0}$  отличается от напряжения  $U$ . Такой резонанс называют *резонансом напряжений*.

Ток при резонансе достигает наибольшего значения

$$I = I_0 = \frac{U}{R}. \quad (3.6)$$

Зависимости  $X(f)$ ;  $X_L(f)$ ;  $X_C(f)$ ;  $Z(f)$  называются *частотными характеристиками* цепи (контура). Они связаны следующими соотношениями:

$$X(f) = X_L(f) - X_C(f);$$

$$Z(f) = \sqrt{R^2 + (X(f))^2} = |R + jx(f)|.$$

Зависимость  $\varphi(f) = \arctg(X(f)/R)$  называется *фазочастотной характеристикой* цепи (контура).

Зависимости от частоты действующих значений тока  $I(f)$  и напряжений  $U_R(f)$ ,  $U_C(f)$ ,  $U_L(f)$  называются *амплитудно-частными характеристиками* (АЧХ).

Диапазон частот, при которых выполняется отношение:

$$\frac{I(f)}{I_0} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X(f))^2}} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

называется *полосой пропускания*. Соотношение (3.7) выполняется точно на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , где  $|X(f) = R|$ . На частоте  $f_1$  меньше  $f_0$  угол сдвига фаз  $\varphi(f_1) = -45^\circ$ , на частоте  $f_2$  больше  $f_0$   $\varphi(f_1) = +45^\circ$ . Частоты  $f_1$  и  $f_2$  называются *нижней и верхней граничной частотой полосы пропускания*. Выполнение условий  $\varphi(f_1) = -45^\circ$  и  $\varphi(f_1) = +45^\circ$  позволяют экспериментально определить граничные частоты, поэтому полосу пропускания можно определить по фазочастотной характеристике.

Значения граничных частот определяются выражением:

$$f_{1,2} = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} \mp 1). \quad (3.8)$$

Избирательные частотные свойства контура характеризуются полосой пропускания:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q}. \quad (3.9)$$

### 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является однофазная цепь переменного тока, состоящая из последовательно соединенных резистора, индуктивности и конденсатора, подключенная к источнику синусоидального напряжения.

Источником синусоидального напряжения в лабораторной работе является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из миниблоков резисторов, индуктивностей и ёмкостей.

### 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 33, параметры которой заданы в таблице 3.1, определить по выражению (3.1) частоту  $f_0$ , при которой в цепи наступит резонанс напряжений.

4.2 Рассчитать комплексным методом действующие значения тока и напряжений на ёмкости и на индуктивности при резонансе, а также активную мощность цепи. Действующее значение напряжения на выходе генератора принять равным 7 В.

4.3 По формулам (3.2-3.3), (3.8-3.9) рассчитать характеристическое сопротивление и добротность  $R-L-C$  контура, а также полосу пропускания и граничные частоты при резонансе.

4.4 Результаты расчёта записать в таблицу Г.1 протокола испытаний.

Таблица 3.1 – Исходные данные

№ варианта	$R$ , Ом	$L$ , мГн	$R_K$ , Ом	$C$ , мкФ
1	100	100	190,9	1
2	100	40	73,4	1
3	100	100	190,9	0.1
4	100	10	17,6	0.47
5	100	40	73,4	0.47
6	100	100	190,9	0.22
7	100	40	73,4	0.22

## 5 Экспериментальная часть

5.1 Выбрать  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементы цепи из числа комплектующих стенда, согласно варианту, заданному преподавателем (таблица 3.1).

5.2 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.1. В качестве амперметра РА использовать мультиметр, установив режим измерения переменного тока  $I$  с диапазоном 200 мА. В качестве вольтметров PV1, PV2 использовать второй и третий мультиметр, установив на них режим измерения переменного напряжения V-20 В.

5.3 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (лаборанту).

5.4 Включить автоматический выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Регулятором «Частота» установить на выходе модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР частоту  $f_0$ . Регулятором «Амплитуда» установить величину действующего значения напряжения  $U_{\Gamma}$  равную 7 В. Напряжение  $U$  поддерживать в работе неизменным, контролируя его значение вольтметром PV2 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.5 Изменяя частоту  $f_0$  в меньшую и большую стороны от величины, рассчитанной аналитически в п. 4.1, определить по показаниям амперметра РА БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ её экспериментальное значение  $f_{0,эксп}$  и записать в таблицу Г.2.

5.6 При значении частоты на выходе модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР равной  $f_{0,эксп}$  измерить амперметром РА и вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений: тока  $I_0$ , напряжений  $U_K$ ,  $U_C$  и  $U_R$ . Измеренные значения записать в таблицу Г.2.

5.7 Уменьшая частоту, определить нижнюю граничную частоту  $f_1$  полосы пропускания. Измерить на частоте  $f_1$  амперметром РА и вольтметром PV1

БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений тока  $I$ , напряжений  $U_K$ ,  $U_C$  и  $U_R$ , и записать в таблицу Г.2.

5.8 Увеличивая частоту, определить частоту верхнюю граничную частоту  $f_2$  полосы пропускания. Измерить на частоте  $f_2$  амперметром РА и вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений тока  $I$ , напряжений  $U_K$ ,  $U_C$  и  $U_R$ . Измеренные значения записать в таблицу Г.2.

5.9 Изменяя частоту в пределах от  $f < f_0$  до  $f > f_0$  измерить амперметром РА и вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений тока  $I$ , напряжений  $U_K$ ,  $U_C$  и  $U_R$ . Измеренные значения занести в таблицу Г.2. Напряжение  $U_{\Gamma}$  на выходе генератора поддерживать неизменным, контролируя его значение вольтметром PV2 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.10 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР и автоматический выключатель QF модуля питания.

5.11 По данным таблицы Г.2 протокола измерений в относительных единицах частоты  $\nu = f/f_0$  рассчитать и построить графики:  $[U_R(f)/U_{\Gamma}] - f(\nu)$ ;  $[U_K(f)/U_{\Gamma}] - f(\nu)$ ;  $[U_C(f)/U_{\Gamma}] - f(\nu)$ ;  $[I(f)/I_0] - f(\nu)$ . Результаты расчёта записать в таблицу Г.3. Из графиков определить добротность  $Q$ , граничные частоты  $f_2$  и  $f_1$  и полосу пропускания  $\Delta f$ .

5.12 По данным таблицы Г.3 рассчитать и построить частотные характеристики:  $Z(f) = U_{\Gamma}/I(f)$ ,  $X_K(f) = U_K(f)/I(f)$ ,  $X_C(f) = U_C(f)/I(f)$ ,  $X(f) = X_K(f) - X_C(f)$ . Результаты расчёта записать в таблицу Г.4.

5.13 Построить векторные диаграммы тока и напряжения цепи для значений частоты  $f_1$ ,  $f_0$  и  $f_2$  методом засечек, используя циркуль.

## 6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Графические зависимости  $[U_R(f)/U_{\Gamma}] - f(\nu)$ ;  $[U_L(f)/U_{\Gamma}] - f(\nu)$ ;  $[U_C(f)/U_{\Gamma}] - f(\nu)$ ;  $[I(f)/I_0] - f(\nu)$ ;  $Z(f) = U_{\Gamma}/I(f)$ ;  $X_K(f) = U_K(f)/I(f)$ ;  $X_C(f) = U_C(f)/I(f)$ ;  $X(f) = X_K(f) - X_C(f)$ .

6.8 Векторные диаграммы тока и напряжения цепи для значений частот:  $f_1$ ,  $f_0$  и  $f_2$ .

6.9 Сравнение полученных экспериментальных значений со значениями, рассчитанными в п.п. 4.1-4.3.

## 7 Контрольные вопросы

7.1 Какие методы расчёта электрических цепей синусоидального тока Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.

7.2 Какими параметрами характеризуются синусоидальные токи и напряжения?

7.3 Как в общем случае ( $X_i \neq 0$ ) определить активную и реактивную составляющие тока в последовательной  $R$ - $L$ - $C$ -цепи?

7.4 Существуют ли физически в последовательной  $R$ - $L$ - $C$ -цепи активный и реактивный токи?

7.5 В каком случае реактивное сопротивление  $R$ - $L$ - $C$ -цепи и сдвиг фаз между током и напряжением имеют отрицательные знаки?

7.6 Как изменится векторная диаграмма, если частоту  $f$  увеличить (уменьшить) в два раза?

7.7 Как рассчитать цепь, если в ней кроме резистора последовательно включены два конденсатора и две катушки индуктивности?

7.8 Как определяется полоса пропускания последовательного резонансного контура?

7.9 Как изменить добротность последовательного резонансного контура в  $n$  раз (например, уменьшить в 3 раза)?

7.10 Как измерить активное и индуктивное сопротивления катушки, используя режим резонанса напряжений?

7.11 Какой характер имеет полное сопротивление последовательной  $R$ - $L$ - $C$ -цепи при резонансе?

7.12 Изобразите схему электрической цепи, содержащую пять последовательно соединённых элементов, в которой при напряжении на входе  $U=100$  В действующие значения напряжений на каждом из её пяти элементов также равны 100 В. Объясните данное равенство напряжений.

7.13 Цепь с последовательно соединёнными  $r$  и  $L$  находится под действием синусоидального напряжения. Изменится ли активная мощность в цепи (если да, то как) при увеличении частоты?

7.14 Объясните характер энергетических процессов в последовательном резонансном контуре.

7.15 Приведите примеры практического применения резонанса в электрических цепях.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С $R$ -, $L$ -, $C$ -ЭЛЕМЕНТАМИ

### 1 Цель работы

Исследование резонансных явлений и частотных характеристик электрической цепи, содержащей параллельно соединенные  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементы.

### 2 Основные положения теории

Расчёт разветвлённых цепей синусоидального тока в установившихся режимах работы ведут с помощью комплексных функций и представляют их в виде векторных диаграмм на комплексной плоскости (комплексный метод).

Методы расчёта цепей постоянного тока (посредством законов Кирхгофа, методами узловых напряжений, контурных токов, наложения, преобразования схем) справедливы и для расчёта цепей синусоидального тока. При этом синусоидально изменяющиеся величины (ЭДС, напряжение и ток) представляют в виде комплексных чисел, которые, в свою очередь, изображают в виде радиус-векторов на комплексной плоскости. При этом алгебраические действия над синусоидальными величинами заменяют действиями над комплексными числами или над радиус-векторами. Сопротивления в цепях синусоидального тока также представляют в виде комплексных чисел: полное комплексное сопротивление двухполюсника для гармонического сигнала называется *импеданс*, а полная комплексная проводимость – *адмиттанс*. Кроме того, вводятся понятия полной и комплексной мощности, тогда все законы и баланс мощности будут справедливы для цепей синусоидального тока в комплексной форме.

Если к цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора (рисунок 33,а) приложить переменное синусоидальное напряжение, то одно и то же напряжение будет приложено к обоим элементам цепи.

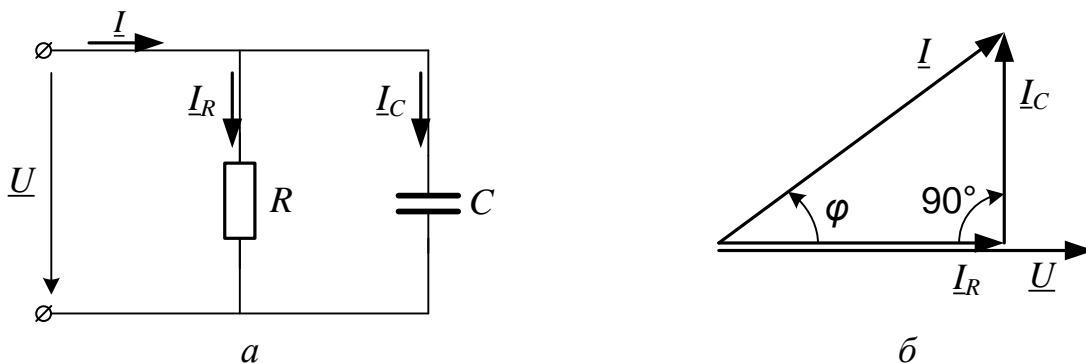


Рисунок 33 – Параллельное соединение  $R$ - и  $C$ -элементов:  
а – схема цепи; б – векторная диаграмма токов и напряжения

Общий ток  $\underline{I}$  цепи разветвляется на ток  $\underline{I}_C$  через конденсатор (ёмкостная составляющая общего тока) и ток  $\underline{I}_R$  – через резистор (активная составляющая).

Между токами  $\underline{I}$ ,  $\underline{I}_C$  и  $\underline{I}_R$  существуют фазовые сдвиги, обусловленные ёмкостным реактивным сопротивлением  $X_C$  конденсатора. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рисунок 33, б).

Фазовый сдвиг между напряжением  $\underline{U}$  цепи и током  $\underline{I}_R$  через резистор отсутствует, тогда как между этим напряжением и током  $\underline{I}_C$  через конденсатор он равен  $+90^\circ$  (т.е. ток опережает напряжение на  $90^\circ$ ). При этом сдвиг фаз между полным током  $\underline{I}$  и напряжением  $\underline{U}$  цепи определяется соотношением между проводимостями  $b_C$  и  $g$ . Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рисунок 34).

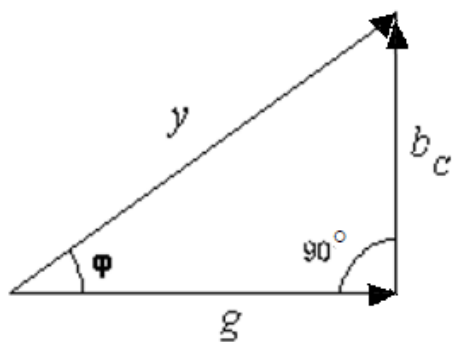


Рисунок 34 – Диаграмма проводимостей для параллельного соединения  $R$ - и  $C$ -элементов

В треугольнике проводимостей  $g=1/R$ ,  $b_C=1/X_C$ , а  $y=1/Z$  представляет собой так называемую полную проводимость цепи, тогда как  $g$  – активная,  $b_C$  – реактивная (ёмкостная) проводимости (измеряются в сименсах (См)).

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений токов в параллельных ветвях невозможно; оно возможно в векторной форме  $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C$ .

Расчет ведется по следующим формулам, вытекающим из векторной диаграммы и треугольника проводимостей.

Действующие значения полного тока цепи, активной и ёмкостной составляющих соответственно:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}; \quad I = \frac{U}{z} = Uy; \quad I_R = Ug; \quad I_C = Ub_C.$$

Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b_C^2}, \quad y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z},$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз между током и напряжением определится из выражения:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{I_C}{I_R}\right) = \arctg\left(\frac{b_C}{g}\right).$$

Активная и реактивная проводимости соответственно будут равны:

$$g = y \cos \varphi; \quad b_C = y \sin \varphi.$$

Если к цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности (рисунок 4.3, *a*) приложить переменное синусоидальное напряжение, то одно и то же напряжение будет приложено к обоим элементам цепи.

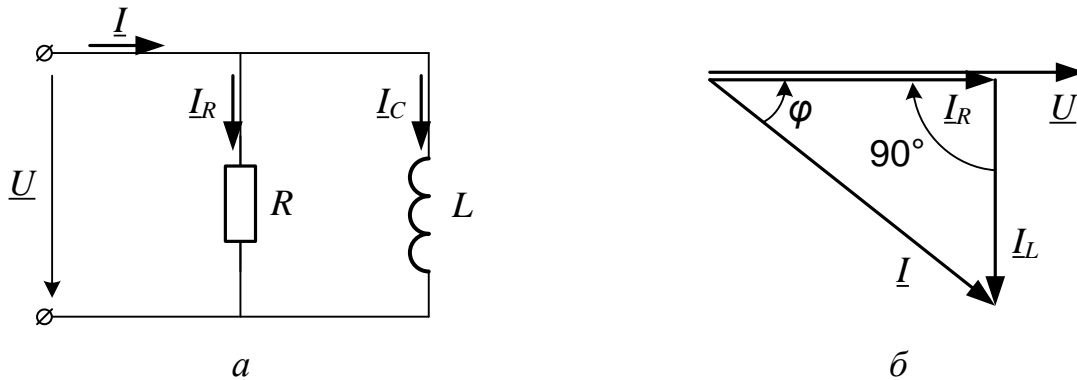


Рисунок 35 – Параллельное соединение  $R$ - и  $L$ -элементов:  
*a* – схема цепи; *б* – векторная диаграмма напряжения и токов

Общий ток цепи разветвляется на ток через катушку (индуктивная составляющая общего тока) и ток – через резистор (активная составляющая).

Между токами  $\underline{I}$ ,  $\underline{I}_L$  и  $\underline{I}_R$  существуют фазовые сдвиги, обусловленные индуктивным реактивным сопротивлением  $x_L$  катушки. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рисунок 35, *б*). Фазовый сдвиг между напряжением цепи  $\underline{U}$  и током через резистор  $\underline{I}_R$  отсутствует, тогда как ток в катушке  $\underline{I}_L$  всегда отстает от напряжения цепи  $\underline{U}$  (или тока через резистор) на  $90^\circ$ . При этом сдвиг фаз между полным током  $\underline{I}$  и напряжением цепи  $\underline{U}$  определяется соотношением между проводимостями  $b_L$  и  $g$  (угол отрицательный).

Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рисунок 36), в котором  $y$  представляет собой так называемую полную проводимость цепи,  $g$  – активную, а  $b_L$  – реактивную индуктивную проводимости.

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений токов в параллельных ветвях, как в параллельной чисто резистивной цепи, невозможно. Оно возможно только в векторной форме:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L.$$



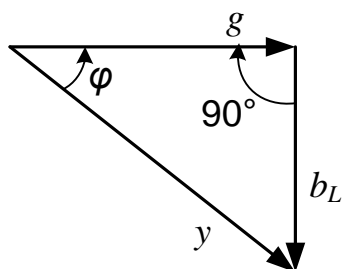


Рисунок 36 – Диаграмма проводимостей параллельного соединения  $R$ - и  $L$ -элементов

Расчёт ведется по следующим формулам.

Действующие значения полного тока цепи, активной и индуктивной составляющих соответственно:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}; \quad I = \frac{U}{z} = U \cdot y; \quad I_R = U \cdot g; \quad I_L = U \cdot b_L.$$

Полная проводимость цепи определится из выражения:

$$y = \sqrt{g^2 + b_L^2}; \quad y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi = -\arctg\left(\frac{I_L}{I_R}\right) = -\arctg\left(\frac{b_L}{g}\right).$$

Активная и реактивная проводимости  $g = y \cos \varphi$ ,  $b_L = y \sin \varphi$ .

Если к цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности параллельно подключить еще и конденсатор (рисунок 37, а), то одно и то же переменное синусоидальное напряжение будет приложено к трём компонентам цепи. Токи в ветвях такой цепи будут пропорциональны проводимостям ветвей. Такая цепь получила название *параллельный резонансный контур*.

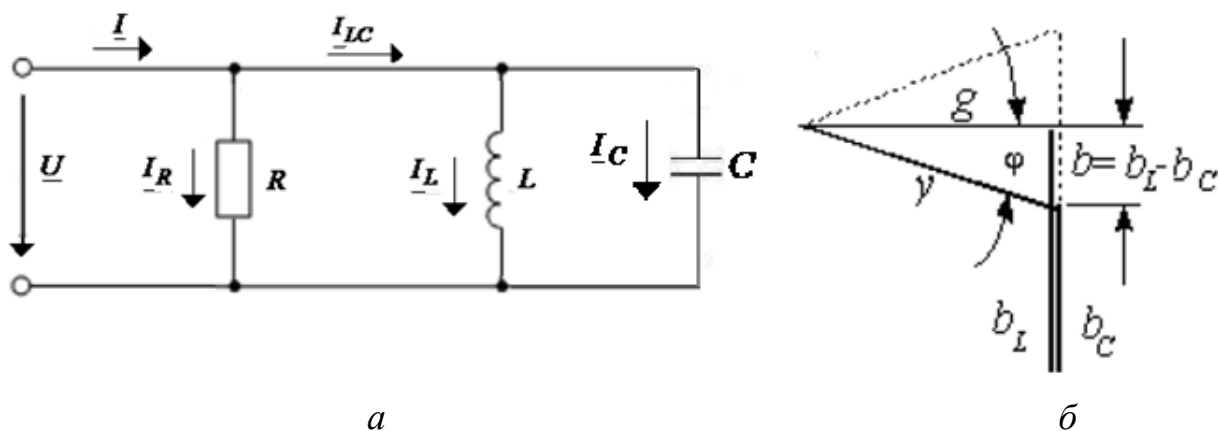


Рисунок 37 – Параллельный резонансный  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -контур:  
а – схема цепи; б – векторные диаграммы проводимостей

В параллельном резонансном контуре активная проводимость не зависит от частоты, а индуктивная, ёмкостная и реактивная проводимости изменяются в соответствии со следующими выражениями (рисунок 37, б):

$$b_L(\omega) = \frac{1}{\omega L}; \quad b_C(\omega) = \omega C; \quad b(\omega) = b_L(\omega) - b_C(\omega).$$

Общий ток цепи  $I$  разветвляется на ток через конденсатор  $I_C$  (ёмкостная составляющая общего тока), ток  $I_L$  — через катушку индуктивности (индуктивная составляющая общего тока), ток  $I_R$  — через резистор (активная составляющая), причем ток  $I_L$  отстает от напряжения  $U$  на  $90^\circ$ , а ток  $I_C$  опережает его на  $90^\circ$  (рисунки 33, б и 35, б). Токи  $I_C$  и  $I_L$  имеют противоположные фазы (различаются на  $180^\circ$ ), в зависимости от их величин уравнивают друг друга полностью или частично. Когда  $I_C = I_L$ , имеет место резонанс токов.

*Резонансом токов* называется явление совпадения начальных фаз мгновенных значений синусоидального напряжения и тока на участке электрической цепи, содержащем параллельно соединенные  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементы.

В состоянии резонанса напряжений угол сдвига фаз  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ .

При резонансе токов реактивная проводимость цепи  $b = b_L - b_C$  равна нулю. Резонансная частота определяется из уравнения:

$$\frac{1}{\omega_0 L} - \omega_0 C = 0,$$

откуда так же, как и при резонансе напряжений следуют выражения:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Полная проводимость при резонансе токов оказывается равной активной проводимости. Поэтому ток  $I$  в неразветвленной части цепи имеет минимальное значение, тогда как токи  $I_L$  и  $I_C$  могут превышать его в несколько раз.

При резонансной частоте справедливы выражения:

$$b_L(\omega_0) = b_C(\omega_0) = \sqrt{\frac{C}{L}} = \gamma.$$

Эта проводимость называется *характеристической проводимостью* резонансного контура, а отношение

$$I_L / I = I_C / I = U\gamma / Ug = Q.$$

так же, как и в последовательном контуре, называется *добротностью*. Если  $Q > 1$ , то при резонансе токов  $I_L(\omega_0)$  и  $I_C(\omega_0)$  превышают ток  $I$  источника в  $Q$  раз.

При изменении частоты и неизменном приложенном напряжении токи изменяются пропорционально соответствующим проводимостям:

$$I(\omega) = Uy(\omega); \quad I_L(\omega) = \frac{U}{\omega L}; \quad I_C(\omega) = U\omega C; \quad I_{LC} = Ub(\omega).$$

При резонансной частоте  $\omega = \omega_0$  ток  $I$ , потребляемый от источника, имеет минимальное значение и равен току  $I_R$  в активном сопротивлении, а ток на реактивном участке цепи  $I_{LC}$  равен нулю. Такая схема называется фильтр-пробка. Угол сдвига фаз изменяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = -\arctg[(\frac{1}{\omega L - \omega C})/g].$$

При  $\omega < \omega_0$  цепь носит индуктивный характер (ток отстаёт от напряжения на угол  $\varphi$ ), при  $\omega = \omega_0$  – активный, а при  $\omega > \omega_0$  – ёмкостный (ток опережает напряжение на угол  $\varphi$ ).

В лабораторной работе исследуется цепь со схемой замещения, изображенной на рисунке 38.

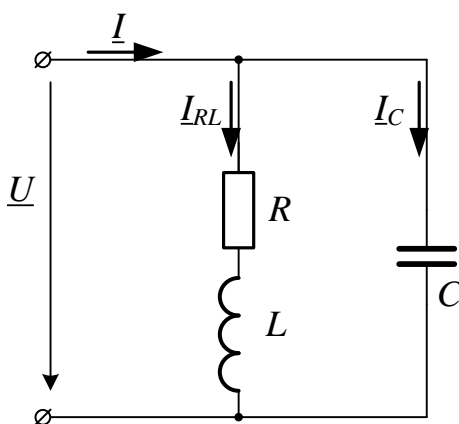


Рисунок 38 – Исследуемая цепь переменного тока, содержащая параллельный резонансный  $R$ - $L$ - $C$ -контур

Комплексная проводимость цепи определится из выражения:

$$\underline{Y} = \frac{1}{R_K + j\omega L} + j\omega C = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L - \omega C(R_K^2 + (\omega L)^2)}{R_K^2 + (\omega L)^2} = G - jB.$$

На частоте резонанса  $\omega_0$  эквивалентная реактивная проводимость цепи  $B_0 = 0$ . Отсюда следует:

$$L - C(R_K^2 + (\omega_0 L)^2) = 0 \text{ или } (\omega_0 L)^2 = \rho^2 - R_K^2,$$

где  $\rho$  – волновое сопротивление контура, определяемое из выражения:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.1).$$

Тогда резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}} \text{ или } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}} \quad (4.2)$$

При резонансе комплексная проводимость

$$\underline{Y} = Y_0 = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2}.$$

Реактивное сопротивление контура

$$\omega_0 L = \sqrt{\rho^2 - R_K^2}.$$

Тогда, учитывая, что

$$Y_0 = G_0 = \frac{R_K}{\rho^2},$$

ток при резонансе будет равен:

$$I_0 = U G_0 = U \frac{R_K}{\rho^2}. \quad (4.3)$$

Реактивные проводимости катушки и конденсатора, определяемые соответственно выражениями:

$$b_{RL0} = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{\rho^2} \quad \text{и} \quad b_{C0} = \omega_0 C = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{\rho^2}$$

будут равны.

Тогда реактивные составляющие токов в ветвях катушки и конденсатора  $I_{RL0}$  и  $I_{C0}$  также будут равны:

$$I_{RL0} = I_{C0} = U b_{C0} = U \sqrt{\rho^2 - \frac{R_K^2}{\rho^2}}. \quad (4.4)$$

При выполнении условия  $\rho > R_K$  реактивные токи могут существенно превышать ток  $I_0 = U G_0$ , и в цепи возникает резонанс токов.

Добротность контура определится выражением:

$$Q = \frac{I_{C0}}{I_{G0}} = \frac{b_{RL0}}{G_0} = \frac{b_{C0}}{G_0} = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{R_K}. \quad (4.5)$$

Зависимости проводимостей:  $G(f)$ ;  $b(f)$ ;  $G_{RL}(f)$ ;  $b_{RL}(f)$ ;

$$Y(f) = \sqrt{[G(f)]^2 + [b(f)]^2}; \quad Y_{RL}(f) = \sqrt{[G_{RL}(f)]^2 + [b_{RL}(f)]^2}; \quad Y_C(f) = b_C(f);$$

угол сдвига фаз  $\varphi(f) = \arctg\left[\frac{b(f)}{G(f)}\right]$  называют *частотными характеристиками* цепи.

Зависимости от частоты действующих значений токов:  $I(f)$ ;  $I_{RL}(f)$ ;  $I_C(f)$  называют *резонансными характеристиками* цепи.

### 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является однофазная цепь переменного тока, состоящая из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора, подключенная к источнику синусоидального напряжения.

Источником синусоидального напряжения является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Пассивные элементы электрической цепи выбираются из комплекта элементов лабораторного стенда: резисторов, индуктивностей и ёмкостей.

### 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 38, параметры которой заданы в таблице 4.1, определить по выражению (4.2) резонансную частоту  $f_0$ .

4.2 Рассчитать комплексным методом, используя выражения (4.3; 4.4) действующие значения токов: в неразветвленной части цепи  $I_0$ ; через катушку индуктивности  $I_{RL0}$  и ёмкость  $I_{C0}$  при резонансе токов, а также активную мощность цепи. Действующее значение напряжения на выходе генератора принять равным 7 В.

4.3 По формулам (4.1) и (4.5) рассчитать волновое сопротивление и добротность контура.

4.4 Результаты расчёта записать в таблицу Д.2 протокола испытаний.

Таблица 4.1 – Исходные данные

№ варианта	$R_K$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ
1	73,4	40	1
2	190,9	100	0,22
3	190,9	100	0,1
4	73,4	40	0,47
5	73,4	40	0,1
6	17,6	10	0,22
7	17,6	10	1
8	73,4	40	0,22

### 5 Экспериментальная часть

5.1 Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_K$  катушки индуктивности и записать эти значения в протокол измерений.

5.2 Выбрать  $L$ -,  $C$ -элементы цепи из числа комплекта лабораторного стен-

да, согласно варианту заданному преподавателем (таблице 4.1).

5.3 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Д.1. В качестве амперметров РА1, РА2, РА3 взять мультиметры, установив режим измерения переменного тока –  $I$  с диапазоном 200 мА. В качестве вольтметра РВ1 использовать один из мультиметров, установив в нём режим измерения переменного напряжения –  $V-20\text{ В}$ .

5.4 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю.

5.5 Включить автоматический выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Регулятором «Частота» установить на выходе модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР частоту  $f_0$ . Регулятором «Амплитуда» установить величину действующего значения напряжения  $U_r = 7\text{ В}$ . Напряжение  $U$  поддерживать в работе неизменным, контролируя его значение вольтметром РВ1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.6 Убедиться, что на частотах  $0,2f_0$  и  $2f_0$  токовая защита модуля не срабатывает.

5.7 Изменяя частоту  $f_0$  в меньшую и большую стороны от её величины аналитически рассчитанной в п. 4.1, определить по показаниям амперметра РА БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ её экспериментальное значение. Величину  $f_{0,эксп}$  записать в таблицу Д.2.

5.8 Выполнить измерения для указанных в таблице Д.2 относительных частот  $\nu = \frac{f_i}{f_{0,эксп}}$  ( $f_{0,эксп}$  – частота резонанса в эксперименте), действующих значений тока  $I$  в неразветвленной части цепи и токов через катушку индуктивности  $I_{RL}$  и через ёмкость  $I_C$ . Измеренные значения записать в таблицу Д.2.

5.9 Протокол измерений утвердить у преподавателя.

5.10 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР и автоматический выключатель QF модуля питания.

5.11 По данным таблицы Д.2 протокола измерений в относительных единицах частоты  $\nu = \frac{f_i}{f_{0,эксп}}$  рассчитать и построить графики экспериментальных значений токов в ветвях  $I(\nu)$ ,  $I_{RL}(\nu)$ ,  $I_C(\nu)$ . Зависимости строить на одном рисунке в одной плоскости.

5.12 По построенным (п. 5.11) графикам определить добротность  $Q$  контура и сравнить её значение со значением, рассчитанным аналитически по параметрам цепи.

5.13 По полученным в п. 5.11 результатам построить в выбранном масштабах векторные диаграммы токов и напряжения при резонансной частоте.

## 6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Графики зависимостей  $I(\nu)$ ,  $I_{RL}(\nu)$ ,  $I_C(\nu)$ .

6.8 Векторные диаграммы токов и напряжения цепи для резонансной частоты.

6.9 Сравнение полученных экспериментальных значений со значениями, рассчитанными в п. 4.1- 4.3.

## 7 Контрольные вопросы

7.1 Какие методы расчёта разветвленных электрических цепей синусоидального тока Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.

7.2 Запишите законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме.

7.3 При каких условиях возникает резонанс токов?

7.4 Как экспериментально определить режимы резонанса токов и напряжений?

7.5 В схеме, подключенной к синусоидальному напряжению, последовательно-параллельно включены  $L$  и  $RC$ , причем действующие значения напряжений на входе цепи и на каждом из её элементов равны. Постройте на комплексной плоскости все токи и напряжения и определите сдвиг фаз между напряжениями  $\underline{U}_L$  и  $\underline{U}_{RC}$ .

7.6 Что такое характеристическая проводимость? Каков её физический смысл?

7.7 Что такое добротность резонансного контура? Какие физические процессы она характеризует? Как её можно определить экспериментально?

7.8 Какой характер имеет полная проводимость параллельной  $R$ - $L$ - $C$ -цепи при резонансе?

7.9 Что называется амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками резонансного контура?

7.10 Что такое коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) и коэффициент реактивной мощности?

7.11 Зачем нужно увеличивать  $\cos \varphi$  в электроэнергетических цепях?

7.12 Какие процессы характеризуют активная и реактивная мощности?

7.13 Какие энергетические процессы происходят в параллельном колебательном контуре?

7.14 Могут ли быть отрицательными: активная мощность, реактивная мощность, полная мощность, комплексная мощность? Приведите примеры.

7.15 В чём заключается смысл баланса мощностей в цепях синусоидального тока?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

### 1 Цели работы

1.1 Экспериментальное определение величины взаимной индуктивности  $M$  двух индуктивно связанных катушек.

1.2 Экспериментальная проверка соотношений параметров, справедливых для индуктивно связанных катушек.

### 2 Основные положения теории

Рассмотрим две катушки, которые намотаны в виде тонких колец большого диаметра с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ . При указанной форме катушек с большой степенью точности можно считать, что витки каждой катушки сцепляются с одинаковым магнитным потоком. Пусть в первой катушке протекает ток  $i_1$ , тогда:  $\Psi_{11} = w_1 \Phi_{11}$  – *собственное потокосцепление* первой катушки ( $\Phi_{11}$  – магнитный поток в одном витке);  $\Psi_{12}$  – *потокосцепление взаимной индукции* – часть потокосцепления  $\Psi_{11}$ , сцепленная с витками второй катушки. Потокосцепление  $\Psi_{12}$  создано током первой катушки, в свою очередь, пронизывает витки второй катушки. Пусть во второй катушке протекает ток  $i_2$ , тогда:  $\Psi_{22} = w_2 \Phi_{22}$  – *собственное потокосцепление* второй катушки;  $\Psi_{21}$  – *потокосцепление взаимной индукции* (создано током второй катушки, пронизывает витки первой катушки) (рисунок 39, а).

В таком случае катушки являются *индуктивно-связанными элементами* (рисунок 39, б).

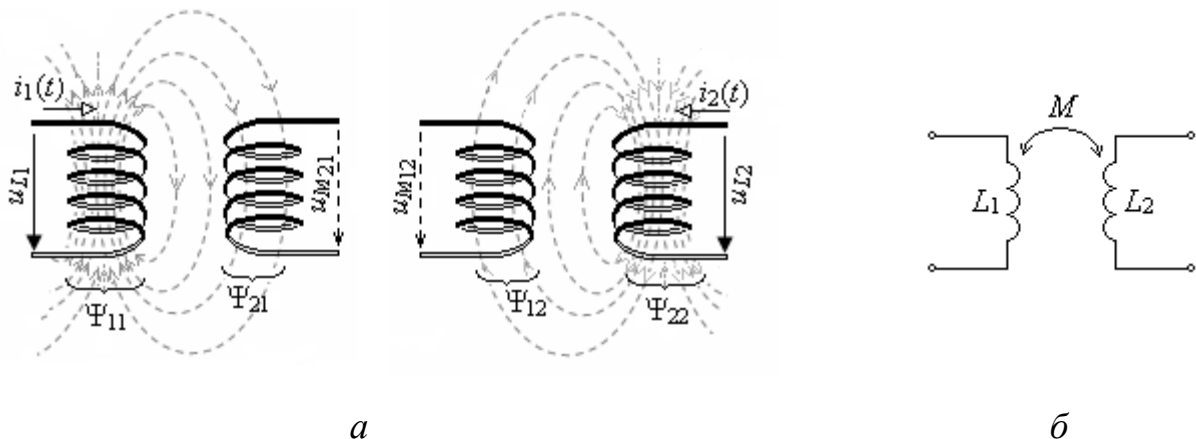


Рисунок 39 – Индуктивно связанные катушки:  
а – потокосцепления катушек; б – схема замещения  
индуктивно связанных катушек

Для характеристики индуктивной связи вводят параметр  $M = M_{12} = M_{21}$  – *взаимная индуктивность*, измеряемая в Генри (Гн).



Знак собственной индуктивности

$$L_1 = \frac{\Psi_{11}}{i_1} = w_1 \frac{\Phi_{11}}{i_1} \text{ или } L_2 = \frac{\Psi_{22}}{i_2} = w_2 \frac{\Phi_{22}}{i_2}$$

всегда положителен, т.к. направление тока и магнитного потока самоиндукции всегда согласованы по правилу правого винта.

Взаимная индуктивность определяется выражением:

$$M = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{\Psi_{21}}{i_2},$$

где  $\Psi_{12}$  – потокосцепление второго элемента, создаваемое током  $i_1$ ;

$\Psi_{21}$  – потокосцепление первого элемента, создаваемое током  $i_2$ .

Примем знак взаимной индуктивности также положительным. ЭДС взаимной индукции во второй катушке, вызванное изменением тока в первой катушке, компенсируется напряжением взаимной индукции:

$$u_{M21} = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt},$$

которое появляется на зажимах второй катушки.

Аналогично появляется напряжение взаимной индукции на зажимах первой катушки:

$$u_{M12} = \frac{d\Psi_{12}}{dt} = M_{12} \frac{di_2}{dt},$$

вызванное изменением тока в первой катушке.

Таким образом, напряжение (ЭДС) каждой катушки определяется алгебраической суммой напряжения (ЭДС) самоиндукции и напряжения (ЭДС) взаимной индукции.

Для определения направления напряжения (ЭДС) взаимной индукции, т.е. знака, с которым это напряжение будет входить в алгебраическую сумму напряжения на катушке, размечают зажимы индуктивно связанных элементов цепи значками «\*» или «•»).

Направление напряжения взаимной индукции  $U_M$  связано с направлением тока, который вызывает это напряжение. Назовем зажим, через который ток входит в первую катушку  $L_1$  «началом» этой катушки и отметим точкой «•» (рисунок 40). Тогда напряжение на второй катушке  $L_2$  также будет направлено от её «начала» к её «концу». Чтобы найти начало первой катушки  $L_1$  нужно сравнить направление напряжения в ней с направлением напряжения во второй катушке  $L_2$ .

Для этого соединяют между собой два зажима катушек  $L_1$  и  $L_2$  и измеряют напряжения  $U_L$ ,  $U_M$ ,  $U_{LM}$ . Если окажется, что  $U_{LM} = U_L + U_M$ , то это означает, что конец первой катушки  $L_1$  присоединен к началу второй катушки  $L_2$ . Если же  $U_{LM} = U_L - U_M$ , то катушки соединены своими концами.

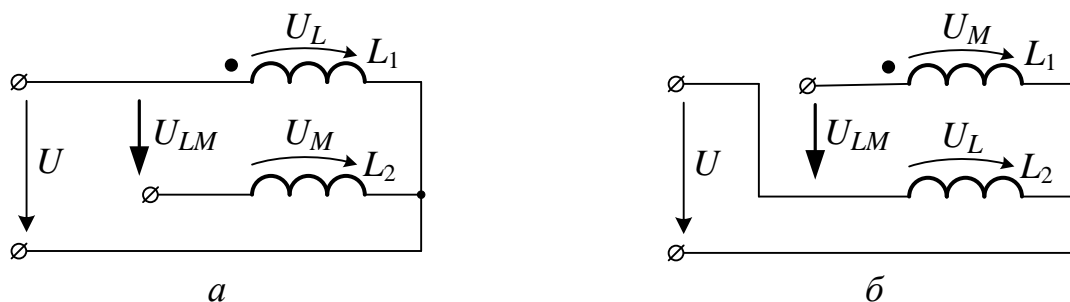


Рисунок 40 – Схема определения условных начал и концов катушек индуктивностей

Если на принципиальной электрической схеме токи ориентированы одинаково относительно одноимённых зажимов катушек, то это согласное включение катушек (рисунок 41, а), иначе – встречное (рисунок 41, б).

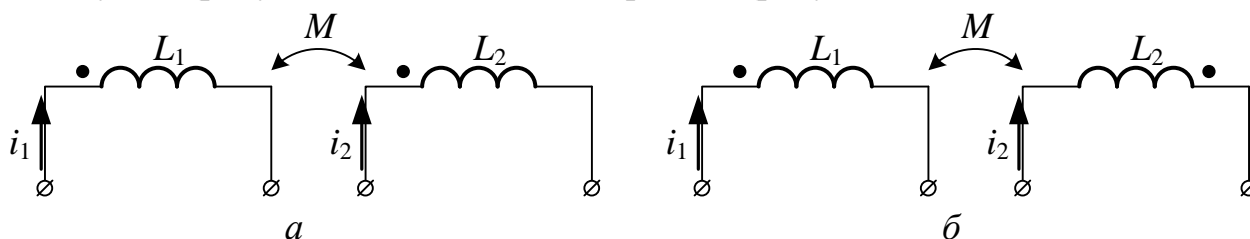


Рисунок 41 – Схемы замещения индуктивно связанных катушек:  
а – согласное включение; б – встречное включение

Направление ЭДС взаимной индукции повторяет направление токов относительно одноимённых зажимов.

Используя комплексный метод расчёта, определяют *сопротивление взаимной индукции* для заданной частоты  $X_M = \omega M$  и *комплексное сопротивление взаимной индукции*  $jX_M = j\omega M$ . Комплексное напряжение взаимной индукции на комплексной плоскости перпендикулярно комплексному току, изменение которого вызывает его появление.

Напряжение взаимной индукции в первой катушке от второго тока можно определить из выражения:

$$\underline{U}_{M12} = j\omega M_{12} \underline{I}_2 = jX_{M12} \underline{I}_2.$$

Напряжение взаимной индукции во второй катушке от первого тока аналогично определится выражением:

$$\underline{U}_{M21} = j\omega M_{21} \underline{I}_1 = jX_{M21} \underline{I}_1.$$

При этом

$$M = M_{12} = M_{21} \quad \text{и} \quad X_{M21} = X_{M12} = X_M = \omega M.$$

*Коэффициент связи* определяют из следующего выражения:

$$k_{св}^2 = \frac{M_{12}M_{21}}{L_1L_2} \quad \text{или} \quad k_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} = \frac{X_M}{\sqrt{X_{L1}X_{L2}}}.$$

Рассмотрим *согласное включение* последовательно соединенных индуктивно связанных неидеальных катушек. Напряжение на катушках имеет следующие составляющие (рисунок 42):

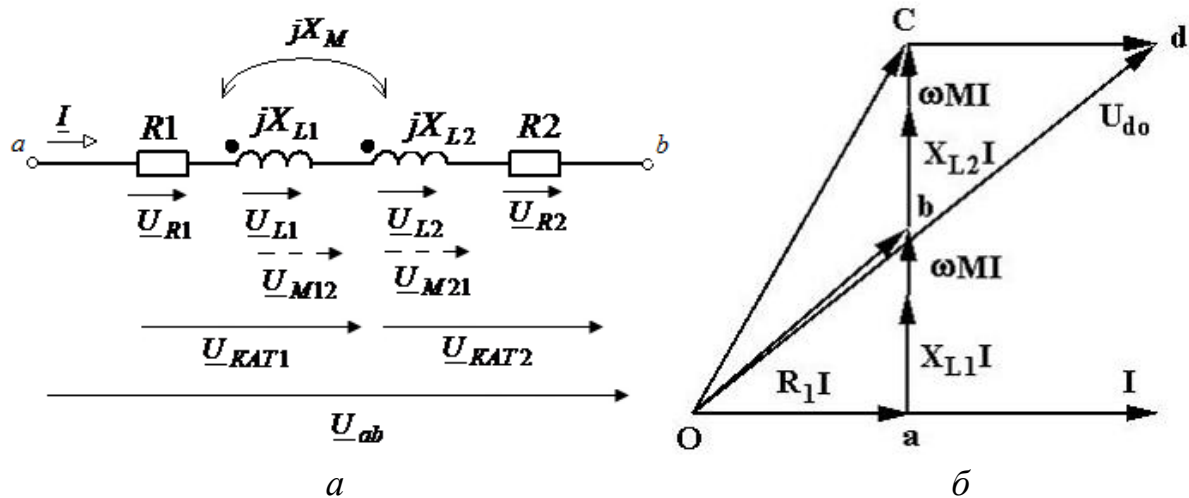


Рисунок 42 – Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при согласном включении индуктивно связанных катушек

При согласном включении:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{kam1} + \underline{U}_{kam2}.$$

В свою очередь, напряжения на катушках с учётом закона Ома:

$$\underline{U}_{kam1} = (R_1 + jX_{L1} + jX_M) \underline{I}; \quad \underline{U}_{kam2} = (R_2 + jX_{L2} + jX_M) \underline{I}.$$

Тогда выражение для напряжения на зажимах *a* и *б* вид:

$$\underline{U}_{ab} = (R_1 + jX_{L1} + jX_M) \underline{I} + (R_2 + jX_{L2} + jX_M) \underline{I}.$$

Значит, при согласном включении выражение для комплексного сопротивления участка *ab* будет иметь следующий вид:

$$\underline{Z}_{\text{согл}} = R_1 + jX_{L1} + R_2 + jX_{L2} + 2jX_M = Z_{\text{согл}} \angle \varphi_{\text{согл}}.$$

При *встречном включении* последовательно соединенных катушек (рисунок 43) напряжения само- и взаимной индукции вычитаются.

Напряжение на зажимах *ab* при встречном включении определится следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{kam1} + U_{kam2} = (R_1 + jX_{L1} - jX_M) \underline{I} + (R_2 + jX_{L2} - jX_M) \underline{I} = \\ &= (R_1 + jX_{L1} - jX_M + R_2 + jX_{L2} - jX_M) \underline{I}. \end{aligned}$$

Комплексное сопротивление участка *ab* определится из выражений:

- при согласном включении:

$$\underline{Z}_{\text{согл}} = R_1 + jX_{L1} + R_2 + jX_{L2} + 2jX_M = Z_{\text{согл}} \angle \varphi_{\text{согл}};$$

- при встречном включении:

$$\underline{Z}_{встр} = R_1 + jX_{L1} + R_2 + jX_{L2} - 2jX_M = Z_{встр} \angle \varphi_{встр}.$$

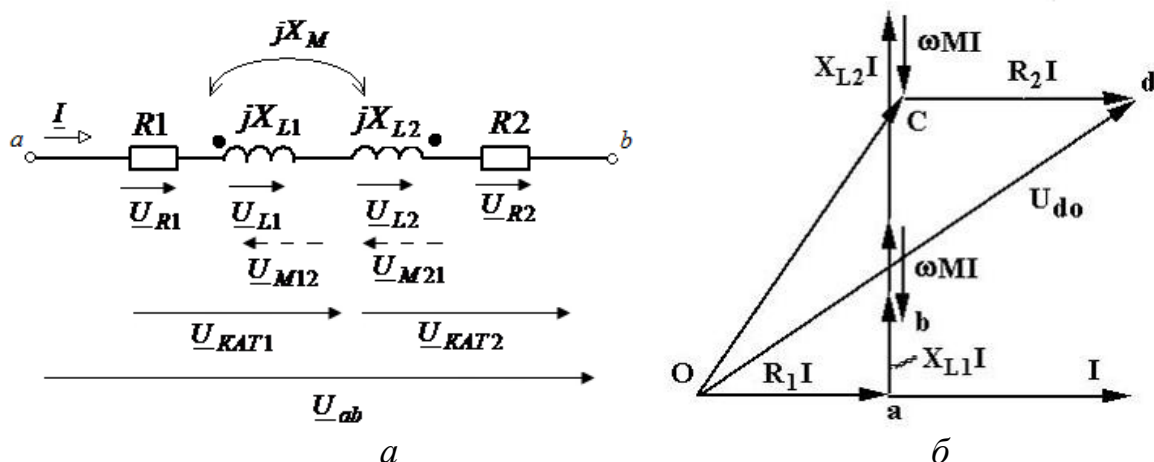


Рисунок 43 – Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при встречном включении индуктивно связанных катушек

Так как  $Z_{согл} > Z_{встр}$ , то при одинаковом напряжении источника ток в цепи при согласном включении катушек меньше, чем при встречном. Этот факт используют при экспериментальном определении одноименных зажимов индуктивно связанных катушек.

Проделав согласное и встречное включения при последовательном соединении элементов, можно определить взаимную индуктивность  $M$ :

$$M = \frac{X_{согл} - X_{встр}}{4\omega},$$

где  $X_{согл}$  и  $X_{встр}$  – реактивное сопротивление цепи при согласном и встречном включении, соответственно.

Напряжение на отдельной катушке вычисляется по формуле:

$$U_{кат} = \sqrt{(R_k^2 + (X_k \pm X_M)^2)}.$$

## 2.1 Расчёт цепей со смешанным соединением элементов

При параллельном согласном включении катушек рисунок 44. можно составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{U} &= \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2; \\ \underline{U} &= \underline{I}_2 R_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

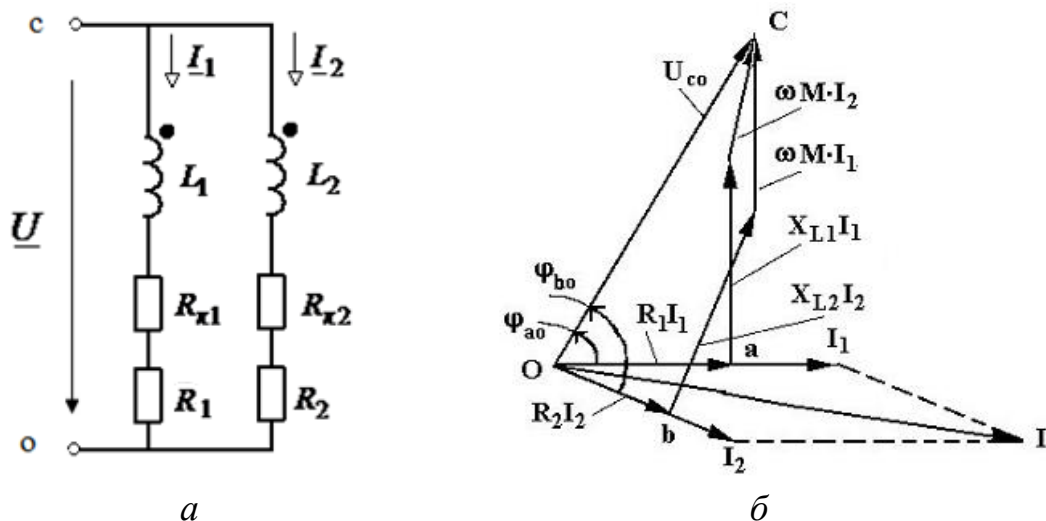


Рисунок 44 – Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при согласном-параллельном включении индуктивно связанных катушек

Решая совместно систему уравнений (5.1), получим:

$$I_1 = \frac{\underline{Z}_{22} - j\omega M}{\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{22} - (j\omega M)^2} \cdot \underline{U}; \quad I_2 = \frac{\underline{Z}_{11} - j\omega M}{\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{22} - (j\omega M)^2} \cdot \underline{U},$$

где  $\underline{Z}_{11} = R_1 + j\omega L_1$ ;  $\underline{Z}_{22} = R_2 + j\omega L_2$ .

При параллельном встречном включении катушек следует в уравнениях системы (5.1) изменить знаки перед слагаемыми, содержащими  $M$ . Построение векторной диаграммы осуществляется аналогично рисунку 43, б, однако следует учесть обратное направление векторов  $j\omega M_1$  и  $j\omega M_2$ .

Особый интерес представляет случай наличия индуктивной связи между катушками при отсутствии электрического соединения между ними, например, в линейном трансформаторе (рисунок 45).

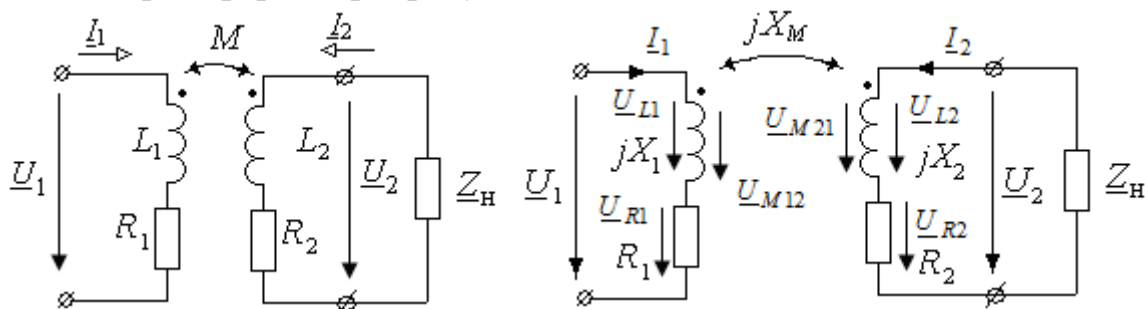


Рисунок 45 – Схема линейного трансформатора

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток линейного трансформатора:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{M12} = (R_1 + jX_1)\underline{I}_1 + jX_M \underline{I}_2;$$

$$0 = \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_{M21} - \underline{U}_2 = (R_2 + jX_2 + \underline{Z}_H)\underline{I}_2 + jX_M \underline{I}_1;$$

$$\underline{U}_2 = -\underline{Z}_H \underline{I}_2.$$

В режиме холостого хода  $\underline{Z}_H = \infty$ , ток  $\underline{I}_2 = 0$  и уравнения примут вид:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{R1} = (R_1 + jX_1)\underline{I}_1;$$

$$\underline{U}_{M12} = \underline{U}_2 \text{ или } jX_M \underline{I}_1 = \underline{U}_2.$$

Измерив действующие значения напряжения и тока первичной обмотки, угол сдвига фаз между напряжением и током, можно определить параметры первичной катушки. Измерив действующее значение напряжения вторичной обмотки можно определить сопротивление взаимной индукции.

### 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования являются индуктивно связанные катушки, соединенные последовательно или параллельно для случаев их согласного и встречного включения. Получаемая схема подключается к источнику синусоидального напряжения.

Источником синусоидального напряжения является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Пассивные элементы электрической схемы выбирают комплекта элементов лабораторного стенда. В качестве катушек индуктивностей используются катушки из блока трансформаторов с числом витков  $W_1 = 900$ . Из катушек необходимо предварительно извлечь U-образные сердечники из электротехнической стали.

### 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Начертить схемы согласного и встречного включения двух индуктивно связанных катушек, из которых, первая катушка имеет параметры  $R_{к1}, L_1$ , вторая –  $R_{к2}, L_2$ .

4.2 При заданном напряжении питания  $U$  и частоте питающей сети  $f$  произвести расчет тока и напряжений на первой  $U_1$  и на второй  $U_2$  катушках при их последовательном соединении для согласного и встречного включений. Параметры цепи для выбранного варианта представлены в таблице 5.1.

4.3 Изучить порядок построения векторных диаграмм цепи при последовательном включении катушек.

4.4 Начертить схему смешанного соединения элементов (рис. Г.2) для согласного включения катушек.

4.5 Выполнить расчёт токов схемы рисунок Г.2. Напряжение источника и параметры элементов схемы принять для выбранного варианта согласно таблице 5.1. Результат записать в таблицу Г.5.

4.6 Повторить расчёт для встречного включения катушек. Результат записать в таблицу Г.5.

Таблица 5.1 – Исходные данные

№ варианта	$U_{\Gamma}$ , В	$f$ , кГц	$R$ , Ом	$R_{K1}$ , Ом	$R_{K2}$ , Ом	$L_1$ , мГн	$L_2$ , мГн	$C$ , мкФ
1	7	1	100	44	44	32	33	1
2	7	3	100	44	44	45	45	0,22
3	7	2	100	44	44	35	36	0,22
4	7	1,5	100	44	44	34	34	0,47
5	7	2,5	100	44	44	40	40	0,22
6	7	0,5	100	44	44	31	32	1

## 5 Экспериментальная часть

### 5.1 Определение параметров индуктивно связанных катушек

5.1.1 Подключая каждую из катушек к регулируемому источнику постоянного напряжения  $U_0 = 1$  В, произвести измерения значений токов  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$  через катушки. По измеренным величинам рассчитать значения активных сопротивлений каждой из катушек и также внести в протокол. Расчёты выполняются по формулам:

$$R_{K1} = \frac{U_0}{I_{L1}}; \quad R_{K2} = \frac{U_0}{I_{L2}}.$$

Результаты расчётов записать в протокол исследования.

5.1.2 Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке Г.1, а, приняв за начало катушки  $L_1$  зажим, которым она присоединена к разъёму «Выход» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Приклеить к началу катушки  $L_1$  цветную бумажку определенного цвета или кусочек изоленты. Обозначить этот зажим точкой в таблице Г.2. Для усиления магнитной связи катушек вставить сверху U-образный сердечник из электротехнической стали.

5.1.3 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю.

5.1.4 Включить автоматический выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Установить регулятором «Частота» значение частоты  $f$  согласно выбранного варианта (таблица 5.1) и записать это значение в таблицу Г.2.

5.1.5 Регулятором «Амплитуда» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР установить действующее значение напряжения  $U_{\Gamma} = 7$  В (использовать вольтметр PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ).

5.1.6 Вольтметром PV2 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить и записать в

таблицу 5.3 напряжения  $U_M$ ,  $U_L$ ,  $U_{LM}$ .

5.1.7 По результатам измерений вычислить остальные величины, указанные в таблице Г.2, обозначить точкой начало катушки  $L_2$  на схеме и наклеить на этот вывод катушки цветную бумажку другого цвета или листок изолянта.

5.1.8 Собрать цепь согласно схеме изображённой на рисунке Г1, б. Повторить измерения и вычисления, указанные в п.п. 5.1.6 и 5.1.7. Проверить правильность определения начал катушек  $L_1$  и  $L_2$ .

5.1.9 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР.

## **5.2 Исследование последовательного соединения индуктивно-связанных катушек**

5.2.1 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.2, а.

5.2.2 Включить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР.

5.2.3 Соединить катушки последовательно в произвольном порядке (например, соединение  $(a-b)-(c-d)$ : выводы катушки  $L_1$  обозначены –  $(a-b)$ ; выводы катушки  $L_2$  –  $(c-d)$ . Начала и концы катушек  $L_1$  и  $L_2$  определены в п.п. 5.1.2 и 5.1.7.

Регулятором «Амплитуда» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР установить напряжение  $U_{\Gamma} = 7$  В (использовать вольтметр PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ).

5.2.4 Вольтметром PV2 и амперметром РА БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить действующие значения напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , тока  $I$ . Измеренные величины записать в таблицу Г.3.

5.2.5 Поменять местами выводы катушки  $L_2$  (соединение  $(a-b)-(d-c)$ ). Повторно выполнить измерения, указанные в п.п. 5.2.4. Измеренные величины записать в таблицу Г.3.

5.2.6 По результатам измерений определить, какое соединение соответствует согласному включению катушек. Провести разметку одноименных зажимов на катушках. По результатам опыта рассчитать величину  $X_M$ .

5.2.7 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР.

5.2.8 Сравнить полученные результаты вычислений  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M$ ,  $K$  с результатами, полученным в п.п. 5.1.6; 5.1.7.

5.2.9 Построить в выбранном масштабе векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек. На диаграммах указать напряжения на всех элементах цепи (на  $R_{K1}$ ,  $L_1$  и т.д.).

## **5.3 Исследование разветвленной цепи с индуктивно связанными катушками**

5.3.1 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.3. Использовать параметры элементов, указанные в таблице 5.1 для вы-



бранного варианта.

5.3.2 Соединить катушки так, чтобы одноименные зажимы были подключены к узлу 1.

5.3.3 Включить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Установить регулятором «Частота» значение частоты  $f$  согласно выбранному варианту (таблица 5.1). Регулятором «Амплитуда» установить на выходе модуля напряжение  $U_{\Gamma}$  равное 7 В (использовать РВ1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ).

5.3.4 Амперметрами РА1, РА2, РА3, БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить действующие значения токов  $I_1$  и  $I_2$  и  $I_3$ . Измеренные величины записать в таблицу Г.5.

5.3.5 Поменять местами концы одной из катушек. Повторить измерения, указанные в п.п. 5.3.4.

5.3.6 Сравнить полученные значения с результатами, рассчитанными аналитически в п.п. 4.5; 4.6.

5.3.6 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР и автоматический выключатель QF модуля питания.

5.3.7 Протокол измерений утвердить у преподавателя.

## **6 Содержание отчёта**

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схемы электрической цепи.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек, с указанием на них падения напряжений всех элементов цепи.

6.8 Сравнение полученных экспериментальных значений с рассчитанными значениями в п.п. 4.2; 4.5; 4.6.

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Определить коэффициент связи  $k_{св}$  индуктивно связанных катушек. В каких пределах он изменяется? Зависит ли коэффициент связи от частоты?

7.2 Как в результате эксперимента определить коэффициент взаимной индукции?

7.3 Как в результате эксперимента определить одноимённые концы индуктивно связанных катушек?

7.4 Как проводится «развязка» индуктивно связанных обмоток?

7.5 Изобразите схему замещения трансформатора без индуктивных связей.

7.6 Объясните порядок построения векторной диаграммы токов и напряжения трансформатора.

7.7 Что такое «вносимое сопротивление»? От чего оно зависит?

7.8 Какова физическая сущность явления взаимной индукции и как оно может быть описано математически?

7.8 Какие зажимы катушек называют одноимёнными? Какие существуют способы их определения?

7.9 Какое соединение индуктивно связанных катушек носит название согласного (встречного)?

7.10 Что такое «ёмкостный эффект»? В чём его проявление, и в каких цепях он возможен?

7.11 Постройте векторные диаграммы токов и напряжения при согласном и встречном включении двух индуктивно связанных катушек.

7.12 Какова связь между направлениями токов и напряжений взаимной индукции в индуктивно связанных катушках?

# Приложение А

## Форма титульного листа к лабораторной работе

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Подгруппа № \_\_\_\_\_

## ДОПУСК К РАБОТЕ

Дата	Допуск	Подпись преподавателя

# ОТЧЁТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №

(Название работы)

Работа выполнена «    »      20      
число                      месяц                      год

\_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)   
 Подпись и фамилия преподавателя

## ЗАЩИТА РАБОТЫ

Дата	Оценка	Подпись преподавателя

Тула 20\_\_\_\_

Приложение Б  
Лабораторная работа № 1

Цель работы: \_\_\_\_\_

**Этап Б.1 – Расчётно-графическая часть**

Таблица Б.1 – Исходные данные для исследования

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
5	15	10	22	33	47	100	150

**Б.1. Исследование разветвленной цепи постоянного тока**

Схема исследуемой цепи для выбранного варианта

Система уравнений по законам Кирхгофа для исследуемой цепи:

Результаты решения системы:

$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 = \quad I_5 = \quad I_6 =$$

Значения напряжений в резисторах:

$$U_1 = \quad U_2 = \quad U_3 = \quad U_4 = \quad U_5 = \quad U_6 =$$

Система уравнений по методу контурных токов для исследуемой цепи:

Результаты решения системы:

$$I_I = \quad I_{II} = \quad I_{III} =$$

Значения токов в ветвях по значениям контурных токов

$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 = \quad I_5 = \quad I_6 =$$

Система уравнений по методу узловых потенциалов:

Результаты решения системы:

$$\varphi_1 = \quad \varphi_2 = \quad \varphi_3 = \quad \varphi_4 = 0$$

Значения токов в ветвях по значениям потенциалов:

$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 = \quad I_5 = \quad I_6 =$$

## Этап Б.2 – Экспериментальная часть

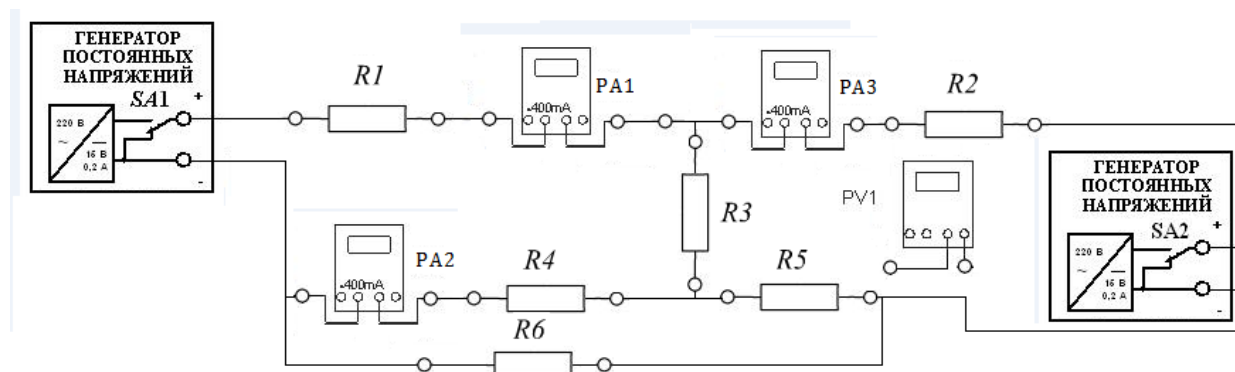


Рисунок Б.1 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Б.2.

Токи в ветвях	Номер ветви					
	1	2	3	4	5	6
Метод непосредственного применения законов Кирхгофа						
Метод контурных токов						
Метод узловых потенциалов						

Таблица Б.3.

Токи и напряжения		Номер ветви					
		1	2	3	4	5	6
Ток в ветви, мА	расчет						
	опыт						
Падение напряжения на резисторе, В	расчет						
	опыт						

Таблица Б.4

Измеряемая величина	Наименование точек					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Потенциал $\varphi_i$ , В						

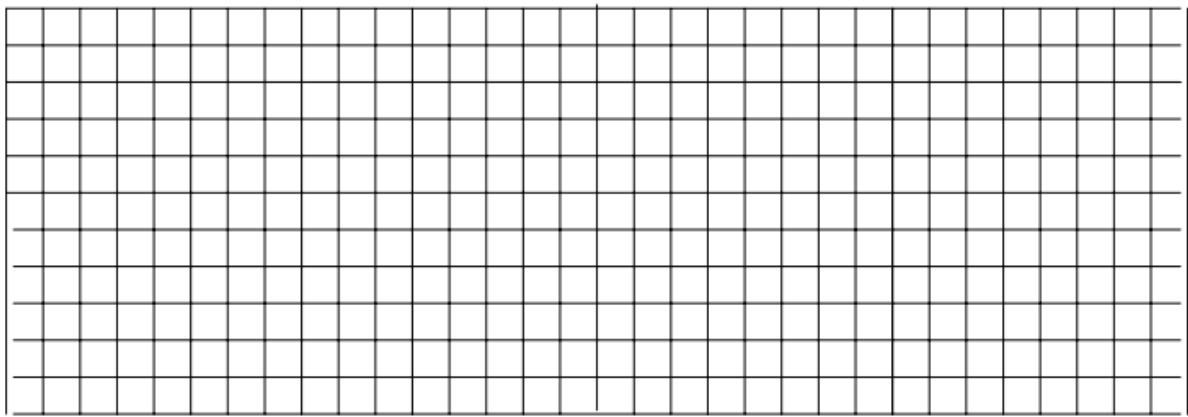


Рисунок Б.2 – Потенциальная диаграмма

Баланс мощностей

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{источн}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{приемн}}$$

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{источн}} =$$

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{приемн}} =$$

## Приложение В Лабораторная работа № 2

Цель работы: \_\_\_\_\_

### Этап В.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица В.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_3$ , В	$E_5$ , В

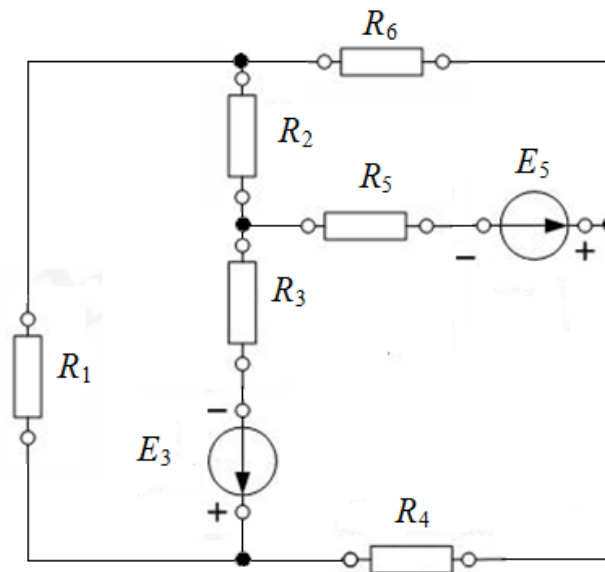


Рисунок В.1 – Расчётная схема исследуемой цепи

#### В.1.1 Расчёт цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора

Преобразуем исходную схему, заменив в ней источники питания их внутренними сопротивлениями и определим эквивалентное сопротивление полученной схемы относительно зажимов  $R_1$ .

Преобразуем треугольник в эквивалентную звезду

$$R_{26} = \quad R_{56} = \quad R_{25} =$$

$$R_{ЭКВ} = R_{BX} =$$

Преобразуем исходную схему, разомкнув ветвь с  $R_1$ . На зажимах разомкнутой ветви нанесем напряжение  $U_{XX}$ .

Из уравнения, составленное по 2 закону Кирхгофа, выразить  $U_{XX}$

$$U_{XX} =$$

Неизвестные токи в полученном уравнении найдём по методу контурных токов, для чего составим систему уравнений по этому методу:

Решая данную систему, найдём токи и, подставив их в выражение для определения  $U_{XX}$ , рассчитаем его:

Вычислим ток короткого замыкания  $I_{K3}$  по формуле:

$$I_{K3} = U_{XX} / R_{BX} =$$

Найдём ток через сопротивление  $R_1$  по формуле:

$$I_1 = U_{XX} / (R_{BX} + R_1)$$

## Этап В.2 – Экспериментальная часть

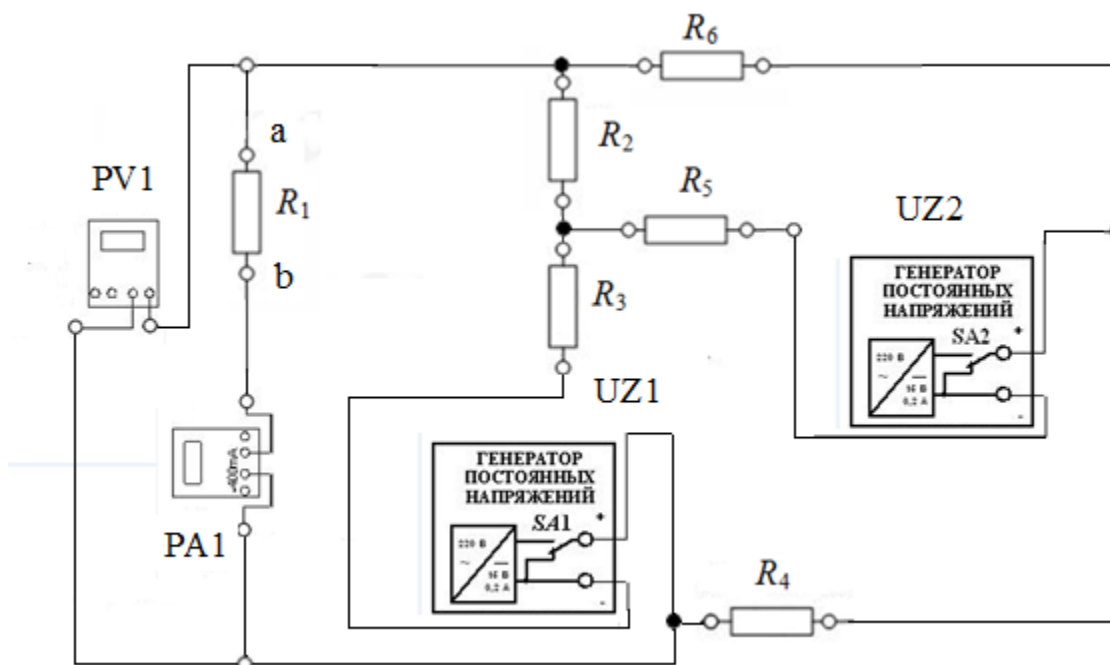


Рисунок В.2 – Монтажная схема исследуемой электроцепи

### В.2.1 Определение параметров эквивалентного генератора

В режиме короткого замыкания ( $R_1 = R_H = 0$ ) измерить ток  $I_{K3}$ .

В режиме холостого хода (ветвь с  $R_1$  разомкнута) измерить напряжение  $U_{X.X}$ . Данные измерений занести в табл. В.2.

Установить  $R_1$  равным значению согласно таблице В.1. Измерить ток  $I_1$ , результат записать в таблицу В.2.

Сравнить экспериментальные и теоретические данные.



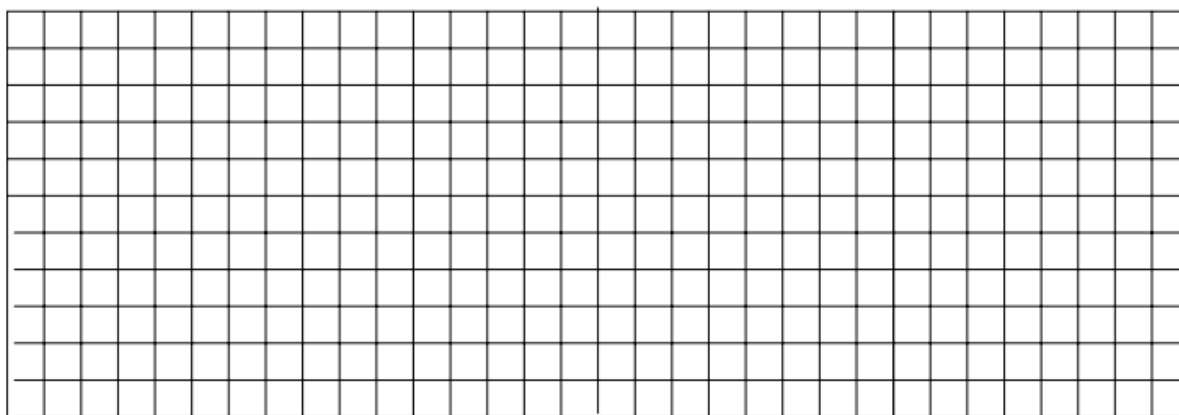
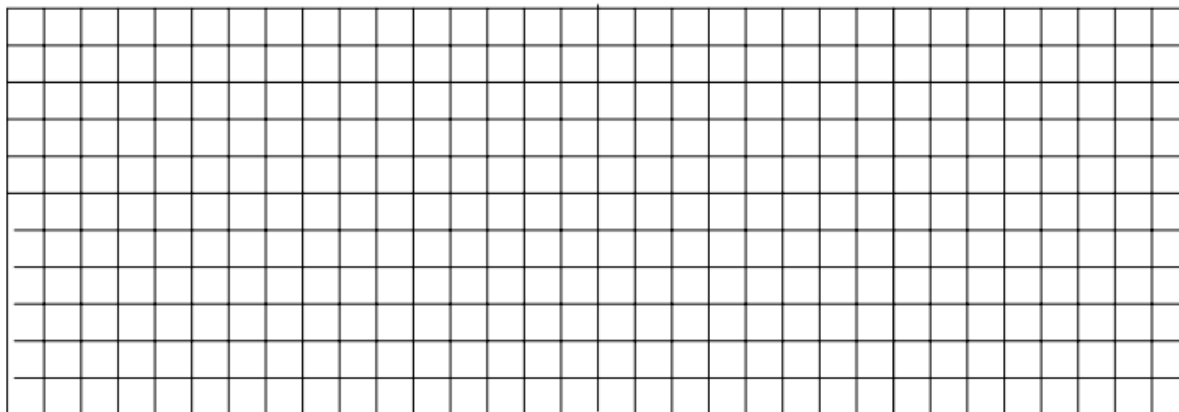
Таблица В.2

	$I_{кз}, \text{mA}$	$U_{xx}, \text{В}$	$R_{вн}, \text{Ом}$	$I_1, \text{mA}$
Расчёт				
Опыт				

### В.2.2 Определение экспериментальных зависимостей

Таблица В.3

$R_1$	0				$R_1 = R_{вн},$ Ом				$\infty$
$I_1, \text{mA}$									
$P_1, \text{mВт}$									

Рисунок В.3 – Вольт-амперная характеристика активного двухполюсника  $U_1(I_1)$ Рисунок В.4 – График зависимости  $P_1(R_1)$  при изменении  $R_1$  от 0 до  $\infty$ .

### В.3.1 Проверка метода наложения

Таблица В.3

	$I_{R1}^{E_3}, \text{mA}$	$I_{R1}^{E_5}, \text{mA}$	$I_{R1}, \text{mA}$
Расчёт			
Опыт			

Приложение Г  
Лабораторная работа № 3

Цель работы: \_\_\_\_\_

**Этап Г.1 – Расчётно-графическая часть**

Таблица Г.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	$R$ , Ом	$R_K$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ

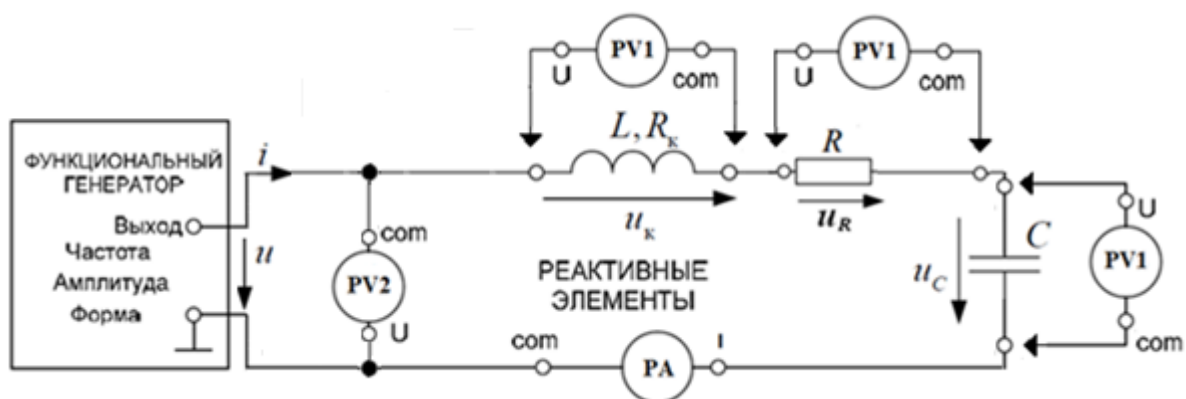


Рисунок Г.1 – Расчётная схема исследуемой цепи

**Г.1.1 Предварительные расчёты:**

Резонансная частота:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \quad \text{Гц}$$

Характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{L/C} = \quad \text{Ом}$$

Добротность контура:

$$Q_{теор} = \frac{\rho}{R_K + R} =$$

Ток в цепи при резонансе:

$$I_0 = \frac{U_{\Gamma}}{R_K + R} = \quad \text{мА}$$

Падение напряжения на реальной катушке индуктивности:

$$U_K = [R_K + j(2\pi f_0 L)] I_0 =$$

$$\text{ёмкости: } U_C = -j \frac{1}{(2\pi f_0 C)} I_0 =$$

$$\text{Полоса пропускания контура: } \Delta f = f_2 - f_1 = f_0 / Q =$$

$$\text{Граничные частоты } f_{1,2} = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} \mp 1) =$$

## Г.2.1 Определение экспериментальных зависимостей

Таблица Г.2

$f$ , Гц	$\nu = f_i / f_{0эксп}$	$I$ , мА	$U_R$ , В	$U_C$ , В	$U_K$ , В	Примечания	
						$f < f_1$	
						$f < f_0$	
						теоретич.	$f_0$
						экспери- мент	
						$f > f_0$	
						$f_2$	
						$f > f_2$	

Таблица Г.3

$f$ , Гц	$\nu = f_i / f_{0, \text{эксп}}$	$\frac{I(f)}{I_0}$ , мА	$\frac{U_K(f)}{U_\Gamma}$ , В	$\frac{U_C(f)}{U_\Gamma}$ , В	$\frac{U_R(f)}{U_\Gamma}$ , В	Примечания	
						$f < f_1$	
						$f_1$	
						$f < f_0$	
						теоретич.	$f_0$
						экспери- мент	
						$f > f_0$	
						$f_2$	
						$f > f_2$	

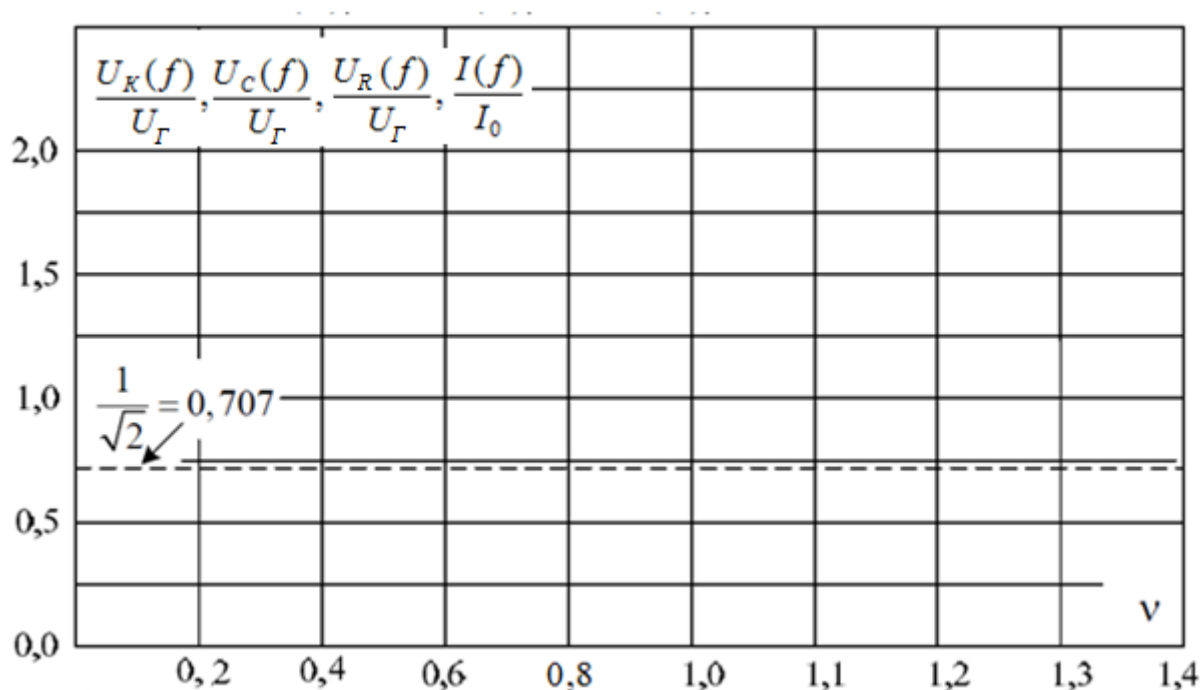


Рисунок Г.2 – Графики АЧХ контура

Из графиков (рисунок Г.2) определяем:

границные частоты:  $f_1 =$                       Гц,  $f_2 =$                       Гц;

полоса пропускания контура  $\Delta f = f_2 - f_1 =$                       Гц;

добротность  $Q_{\text{экспер.}} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} =$                       .

По данным таблицы Г.2 рассчитываем частотные характеристики:

$$Z(f) = U_G / I(f); \quad X_K(f) = U_K(f) / I(f);$$

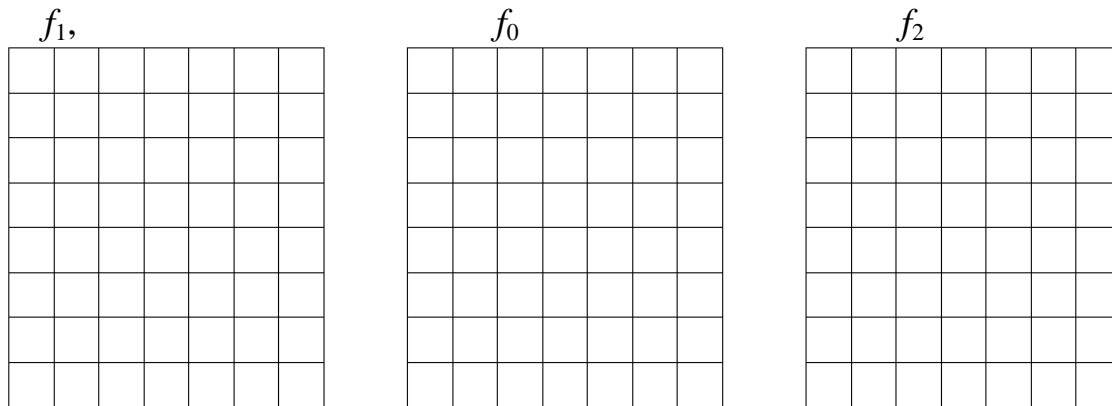
$$X_C(f) = U_C(f) / I(f); \quad X(f) = X_K(f) - X_C(f).$$

Таблица Г.4 – Результаты расчёта частотных характеристик

$f, \text{ Гц}$	$\nu = f/f_0$	$Z(f)$	$X_K(f)$	$X_C(f)$	$X(f)$

По данным таблицы Г.4 для частот  $f_1$ ,  $f_0$  и  $f_2$  строим векторные диаграм-

мы тока и напряжений в масштабах:  $U =$  В/см;  $I =$  мА/см.



Строим частные характеристики:  $Z(f)$ ,  $X(f)$ ,  $X_C(f)$ ,  $X_K(f)$  в зависимости от относительной частоты  $\nu$ .

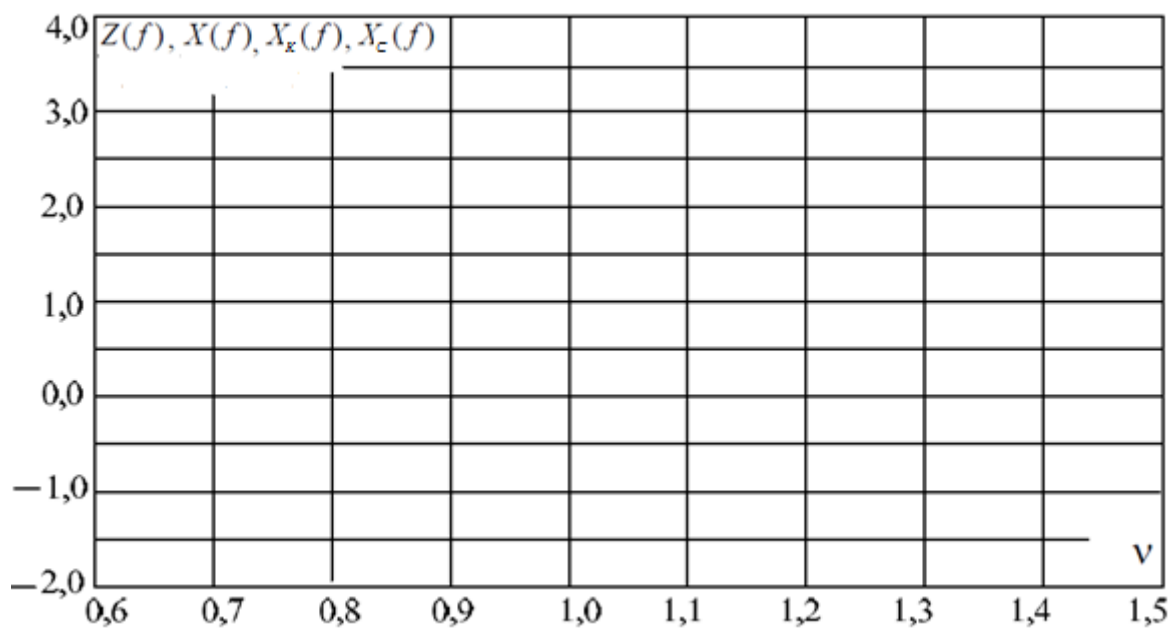


Рисунок Г.3 – Графики частотных характеристик зависимости от относительной частоты  $\nu$

Из графиков рисунок Г.3 определяем:

на частоте  $f_1$  :  $Z(f_1) =$   $X(f_1) =$

на частоте  $f_2$  :  $Z(f_2) =$   $X(f_2) =$

## Приложение Д Лабораторная работа № 4

Цель работы: \_\_\_\_\_

### Этап Д.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Д.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	$R_K$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ

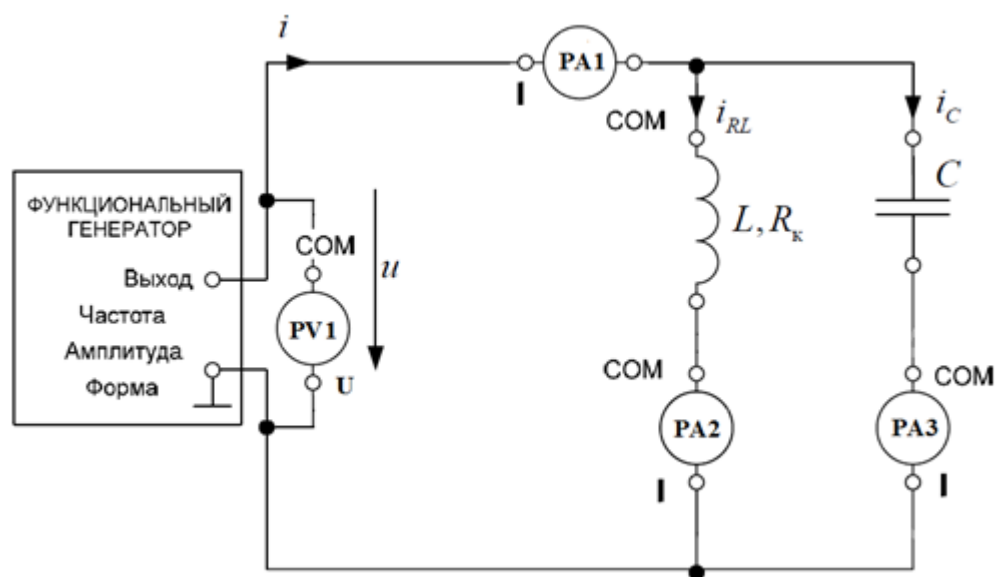


Рисунок Д.1 – Расчётная схема исследуемой цепи

#### Д.2.1 Предварительные расчёты:

Волновое сопротивление контура:

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

Резонансная частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}} =$$

Резонансный ток:

$$I_0 = UG_0 = U \frac{R_K}{\rho^2} =$$

Теоретическая добротность контура:

$$Q_{теор} = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{R_K} =$$

## Г.2.1 Определение экспериментальных зависимостей

Таблица Д.2

$f, \text{Гц}$	$\nu = f_i / f_{0\text{экспер}}$	$I, \text{мА}$	$I_{RL}, \text{мА}$	$I_C, \text{мА}$
	0,2			
	0,4			
	0,6			
	0,8			
$f_{0,\text{теор}} =$	1,0			
$f_{0,\text{эксп}} =$	1,0			
	1,1			
	1,2			
	1,4			
	1,6			
	1,8			
	2,0			

По данным таблицы Д.2 на рисунке Д.2 построены частные зависимости  $I(\nu)$ ,  $I_{RL}(\nu)$ ,  $I_C(\nu)$ .

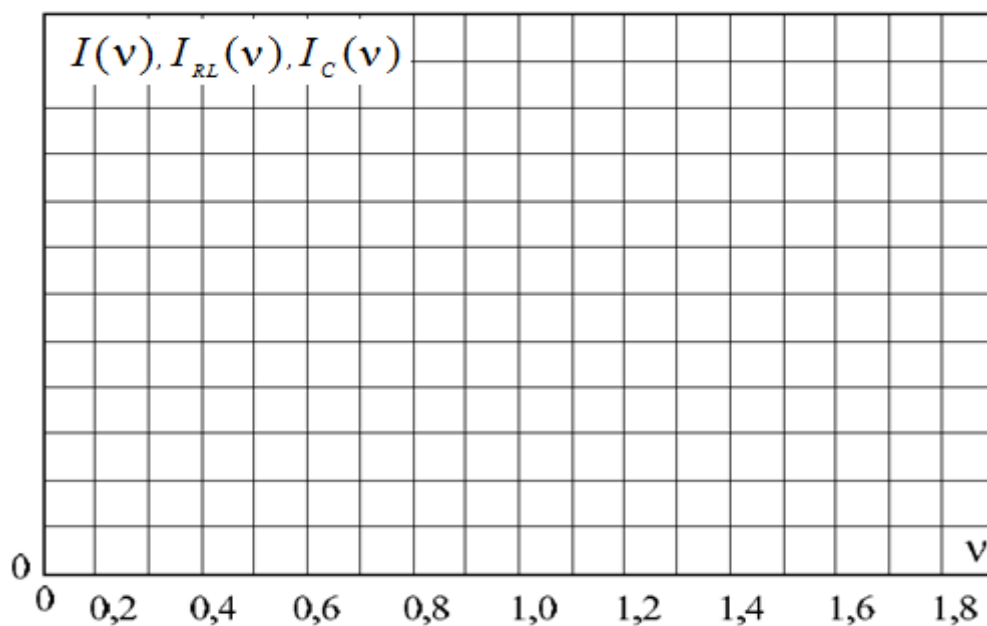


Рисунок Д.2 – Экспериментальные АЧХ параллельного  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -контура

Экспериментальная добротность контура

$$Q_{\text{эксп}} = \frac{I_C(\nu_0)}{I_G(\nu_0)},$$

где  $I_G(\nu_0) = I_0$

По данным таблицы Д.2 для частоты  $f_0$  построена векторная диаграмма (рисунок Д.3).

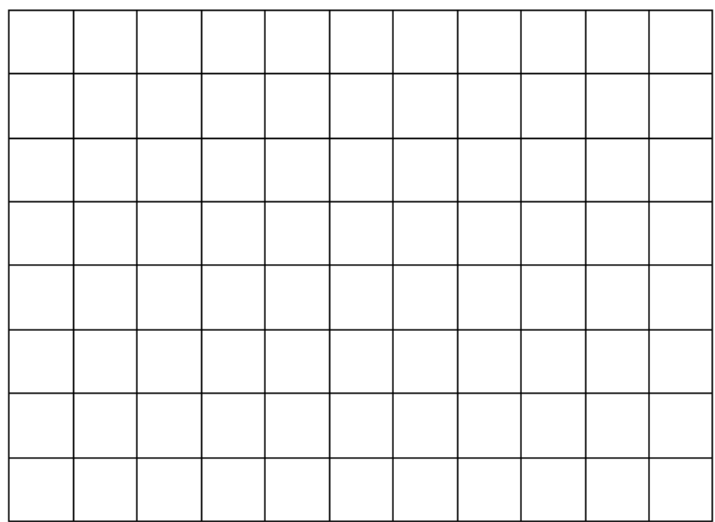


Рисунок Д.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений в масштабах:  
 $U = \underline{\hspace{2cm}}$  В/см;  $I = \underline{\hspace{2cm}}$  мА/см.





К выходу генератора подключена катушка  $L_2$

$$Z_{L2} = U_{L2} / I =$$

$$X_{L2} = \sqrt{(Z_{L2})^2 - (R_{\kappa 2})^2} =$$

$$L_2 = X_{L2} / \omega =$$

$$X_M = U_M / I =$$

$$M = X_M / \omega =$$

Если  $U_{LM} = U_L + U_M$ , то это означает, что конец первой катушки  $L_1$  присоединен к началу второй катушки  $L_2$ .

Если  $U_{LM} = U_L - U_M$ , то катушки соединены своими концами.

Обозначить точкой начало катушки  $L_2$ .

Таблица Г.2 – Результаты исследований по определению параметров индуктивно связанных катушек

$f =$ кГц	$U_{\Gamma}$ В	$U_L$ В	$U_M$ В	$U_{LM}$ В	$I$ мА	$X_L$ Ом	$X_M$ Ом	$L$ Гн	$M$ Гн	$k_{св}$	Одноименные зажимы
Схема Г1, а											• — — — — — $L_1$
Схема Г1, б											— — — — — $L_2$

### Последовательное соединение катушек

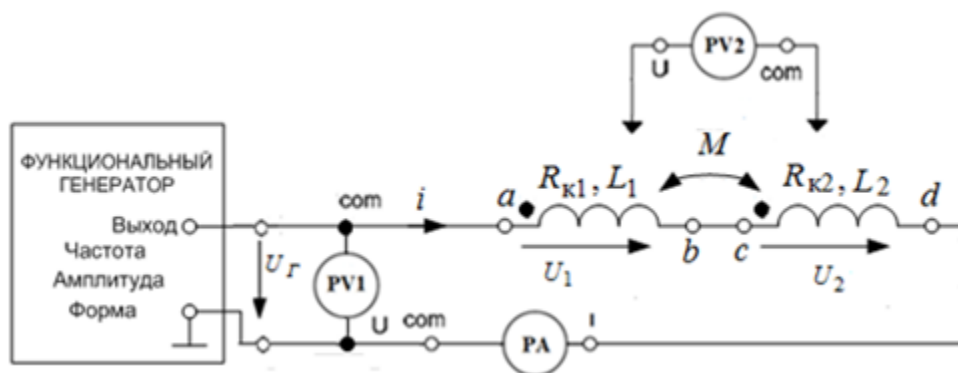
Таблица Г.3 – Результаты исследований при последовательном соединении катушек индуктивностей

(a-b)–(d-c)    соединение катушек							
$U_{\Gamma},$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$I,$ мА	$Z_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$X_2,$ Ом
$Z_{(a-b)-(d-c)} = U_{\Gamma} / I$							

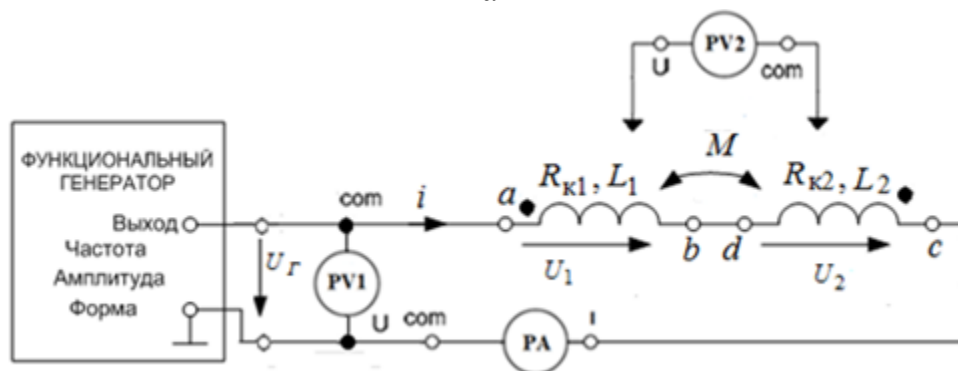
$$Z_1 = \frac{U_1}{I} = \quad ; \quad X_{L1} = \sqrt{(Z_1)^2 - (R_{\kappa 1})^2} = \quad ;$$

$$Z_2 = \frac{U_2}{I} = \quad ; \quad X_{L2} = \sqrt{(Z_2)^2 - (R_{\kappa 2})^2} = \quad ;$$

$$Z_{(a-b)-(d-c)} = \frac{U_{\Gamma}}{I} = \quad \text{Ом}, \quad Z_{(a-b)-(c-d)} = \frac{U_{\Gamma}}{I} = \quad \text{Ом}.$$



а



б

Рисунок Г.2 – Расчётная схема исследуемой цепи для анализа цепи при последовательном соединении индуктивно связанных катушек

Вывод: Соединение \_\_\_\_\_ соответствует согласному соединению катушек. Одноименные зажимы \_\_\_\_\_.

Следовательно, имеем:  $Z_{\text{сogl}} =$  Ом,  $Z_{\text{встр}} =$  Ом.

Вычисленные значения перенесем в таблицу Г.4.

Таблица Г.4 – Результаты расчётов при последовательном соединении катушек индуктивностей

Способ включения	Значения табл. Г.3				Вычисления					
	$Z_1$ , Ом	$X_1$ , Ом	$Z_2$ , Ом	$X_2$ , Ом	$L_1$ , Гн	$L_2$ , Гн	$L_I$ , Гн	$L_{II}$ , Гн	$M$ , Гн	$k_{св}$
согласное										
встречное										

Вычисление эквивалентных индуктивностей всей цепи и каждой катушки

$$X_{\text{сogl}} = \sqrt{Z_{\text{сogl}}^2 - (R_{k1} + R_{k2})^2} =$$

$$X_{\text{встр}} = \sqrt{Z_{\text{встр}}^2 - (R_{k1} + R_{k2})^2} =$$

$$\omega = 2\pi \cdot f =$$

$$L_{1\text{сogl}} = \frac{X_{1\text{сogl}}}{\omega} =$$

$$; L_{1\text{встр}} = \frac{X_{1\text{встр}}}{\omega} =$$

$$L_{2\text{согл}} = \frac{X_{2\text{согл}}}{\omega} =$$

$$; L_{2\text{встр}} = \frac{X_{2\text{встр}}}{\omega} =$$

$$L_{\text{согл}} = \frac{X_{\text{согл}}}{\omega} =$$

$$; L_{\text{встр}} = \frac{X_{\text{встр}}}{\omega} =$$

$$L_I = \frac{L_{1\text{согл}} + L_{1\text{встр}}}{2} =$$

$$L_{II} = \frac{L_{2\text{согл}} + L_{2\text{встр}}}{2} =$$

$$M = \frac{L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}}}{4} =$$

$$k_{\text{св}} = \frac{M}{\sqrt{L_I \cdot L_{II}}} =$$

### Параллельное соединение катушек

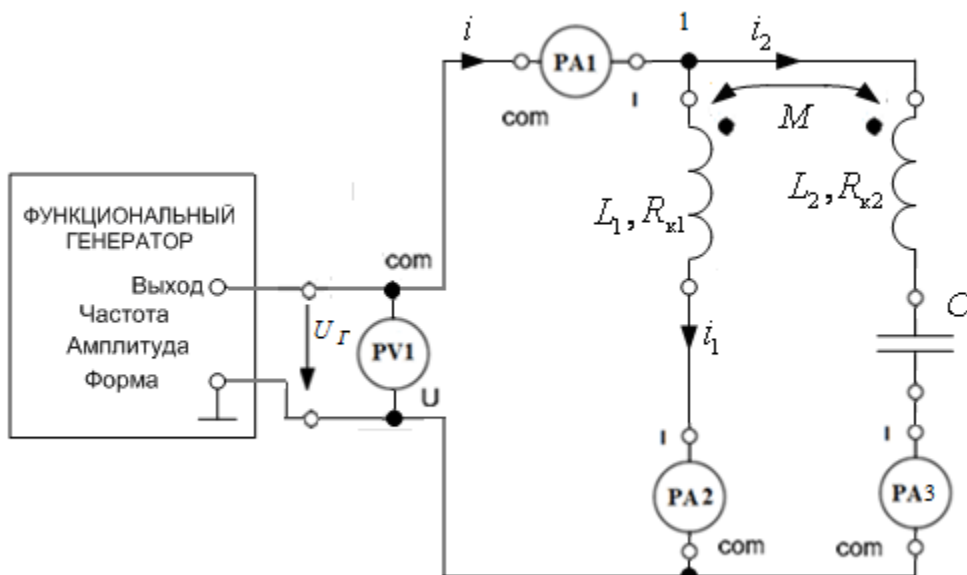


Рисунок Г.3 –Схема цепи для анализа параметров при параллельном соединении индуктивно связанных катушек

Таблица Г.5 – Результаты расчётов при параллельном соединении катушек индуктивностей

		$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА
Расчет	Включение согласное			
Эксперимент				
Расчет	Включение встречное			
Эксперимент				

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
- 2 Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 2 т. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин – М.; СПб.: Питер, 2009.
- 3 Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. Д. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 4 Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей: учеб. пособие для электротехнич. и радиотехнич. спец. вузов / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М., Высшая школа, 1990. – 544 с.
- 5 Сборник задач по теоретическим основам электротехники: в 2 т. / П. А. Бутырин, Л. В. Алексейчик, С. А. Важнов и др.; под ред. чл.-корр. РАН П. А. Бутырина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Учебное издание

ШПРЕХЕР Дмитрий Маркович  
ПОЛЕВОЙ Валерий Евгеньевич  
ЧУМАКОВ Александр Виссарионович

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### **Лабораторный практикум**

Авторское редактирование  
Компьютерная вёрстка В.Е. Полевой

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 15.05.14.  
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 3,7.  
Тираж 300 экз. Заказ           

Тульский государственный университет  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**Д. М. Шпрехер, В. Е. Полевой, А. В. Чумаков**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

### **Часть 2**

**Исследование линейных и нелинейных электрических цепей  
в установившемся и переходном режимах**

**Лабораторный практикум**

**Тула**

**Издательство ТулГУ**

**2018**

УДК 621.31

Шпрехер Д.М., Полевой В.Е., Чумаков А.В. Теоретические основы электротехники. Ч. 2. Исследование линейных и нелинейных электрических цепей в установившемся и переходном режимах: лабораторный практикум. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 70 с.

ISBN

В учебном издании изложены описание лабораторных работ, задания и методические рекомендации по их выполнению. Рассматриваются свойства, методы анализа и расчёта трёхфазных цепей, четырёхполюсников, линейных цепей несинусоидального тока, нелинейных электрических цепей постоянного тока, переходных процессов в линейных цепях.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину Теоретические основы электротехники в объёме общеобразовательной дисциплины.

Библиогр. 5 наим.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета  
Тульского государственного университета

**Рецензент:** Савельев В.В., д-р техн. наук, проф., зав.каф. «Приборы и биотехнические системы»

ISBN

© Шпрехер Д.М., Чумаков А.С., Полевой В.Е., 2018  
© Издательство ТулГУ, 2018



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие требования к выполнению лабораторных работ .....	4
Лабораторная работа № 7 Исследование трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «звезда» .....	5
Лабораторная работа № 8 Исследование трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «треугольник».....	14
Лабораторная работа № 9 Исследование нелинейных элементов в цепи постоянного тока .....	18
Лабораторная работа № 10 Исследование пассивных линейных четырёхполюсников .....	23
Лабораторная работа № 11 Исследование линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока.....	33
Лабораторная работа № 12 Исследование переходных процессов в линейных цепях.....	39
Приложения .....	45
Библиографический список.....	17

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

К выполнению цикла лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждая лабораторная работа выполняется в три этапа:

1 этап. Расчётно-графическая часть выполняется самостоятельно внеаудиторно и включает в себя изучение теоретических основ рассматриваемой темы, уяснение целей лабораторной работы и предстоящих исследований, аналитические расчёты режимов работы электрических цепей, подготовка формы протокола экспериментальной части отчёта.

2 этап. Экспериментальная часть выполняется в лаборатории кафедры под руководством преподавателя, в ходе которой осуществляется допуск к работе, сборка исследуемой электрической цепи, проведение экспериментов, согласование и утверждение полученных результатов у преподавателя.

3 этап. Самостоятельная обработка и анализ полученных в ходе экспериментов результатов, проверка их на адекватность с аналитическими расчётами 1-го этапа, формулировка выводов, оформление отчёта и его защита в объёме материала, обозначенного контрольными вопросами.

Отчёт по лабораторной работе оформляется каждым студентом самостоятельно с соблюдением требований существующих стандартов и методических указаний к оформлению отчётов. Форма и структура отчёта приведены в приложении к лабораторным работам.

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

#### 1 Цели работы

1 Получение навыков сборки электрических цепей и пользование электроизмерительными приборами.

2 Экспериментальное исследование режимов работы и расчёт параметров трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «звезда».

#### 2 Основные положения теории

Трёхфазной цепью называется совокупность трёх электрических цепей (фаз), в которых действует система трёх синусоидальные э. д. с. одной и той же частоты, сдвинутых по фазе на определённый угол и создаваемых общим источником электрической энергии. Фазы трёхфазной цепи обозначаются буквами  $A, B, C$ . Если три э.д.с.  $e_A, e_B, e_C$  равны по амплитуде и сдвинуты по фазе одна относительно другой на угол  $120^\circ$ , то такую систему называют **симметричной трёхфазной системой**. Если э.д.с. фазы  $A$  принять за исходную и считать её начальную фазу равной нулю, то при вращении ротора с угловой скоростью  $\omega$  против часовой стрелки выражения для мгновенных значений э.д.с. можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}e_A(t) &= E_m \sin(\omega t); \\e_B(t) &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\e_C(t) &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ).\end{aligned}$$

Такая последовательность чередования фаз называется **прямой**.

Фазы трёхфазной цепи всегда соединены (связаны). Основными видами связи являются соединения по схеме «звезда» и «треугольник».

На рисунке 7.1 изображён способ соединения фаз трёхфазного источника по схеме «звезда». Напряжения  $U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}$  называются фазными, напряжения  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  – линейными. В симметричном источнике фазные и линейные напряжения связаны соотношениями:

$$\begin{aligned}U_{AN} &= U_{BN} = U_{CN} = U_\phi; \\U_{AB} &= U_{BC} = U_{CA} = U_L; \\U_L &= \sqrt{3}U_\phi.\end{aligned}$$

На рисунке 7.1 нагрузка также соединена по схеме «звезда». Напряжения  $U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$  называются фазными, напряжения  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  – линейными. При соединении по схеме «звезда» токи  $I_A, I_B, I_C$  являются и фазными и линейными одновременно.

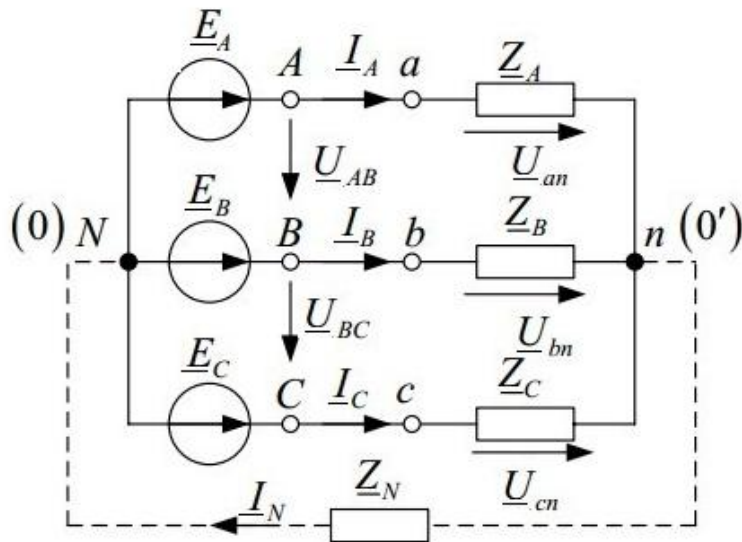


Рисунок 7.1

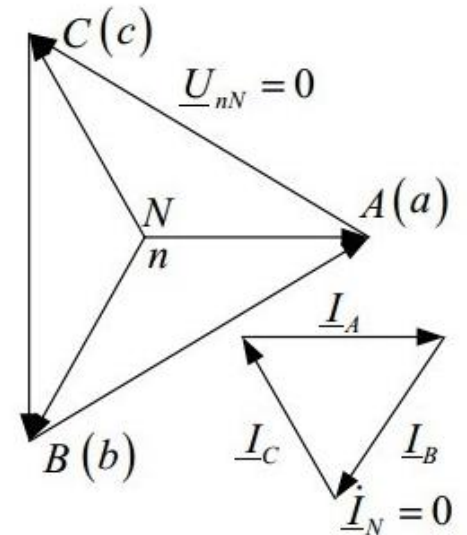


Рисунок 7.2

На рисунке 7.2 изображена топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для случая симметричной трёхфазной цепи, когда

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R. \quad (7.1)$$

При соединении нагрузки и источника по схеме «звезда» и наличии нейтрального провода выполняются соотношения:

$$\begin{cases} U_{AN} = U_{an}; \\ U_{BN} = U_{bn}; \\ U_{CN} = U_{cn}. \end{cases} \quad (7.2)$$

При этом токи в фазных проводах:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{U_a}{\underline{Z}_A} = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{\underline{U}_A \cdot e^{j0^\circ}}{\underline{Z}_A} = I_A \cdot e^{j0^\circ}; \\ \underline{I}_B &= \frac{U_b}{\underline{Z}_B} = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{\underline{U}_B \cdot e^{-j120^\circ}}{\underline{Z}_B} = I_B \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \underline{I}_C &= \frac{U_c}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{U}_C \cdot e^{j120^\circ}}{\underline{Z}_C} = I_C \cdot e^{j120^\circ}. \end{aligned} \quad (7.3)$$

С учётом выражения (7.1) в симметричном режиме токи  $|I_A| = |I_B| = |I_C| = |I_L| = |I_\Phi|$ . Ток в нейтральном проводе  $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ , напряжение  $\underline{U}_{Nn}$ , называемое напряжением смещения нейтрали, также равно нулю.

При несимметричной нагрузке  $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$  напряжение  $\underline{U}_{Nn}$  зависит от характера нагрузки и наличия нулевого провода. На рисунке 7.3 в качестве

примера представлены диаграммы трёхфазной цепи с 4-проводной схемой соединения ( $\underline{Z}_N = 0$ ), а на рисунке 7.4 – с 3-проводной схемой соединения ( $\underline{Z}_N = \infty$ ). Нагрузка фаз резистивная.

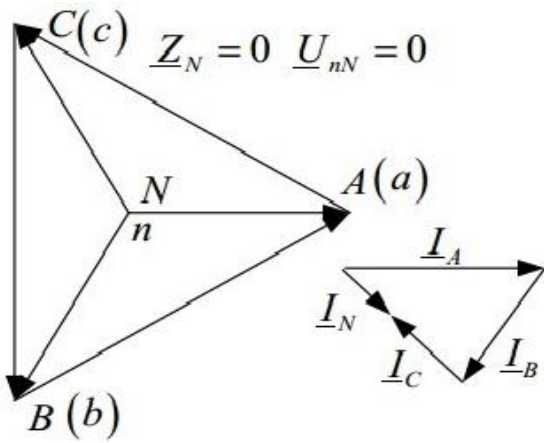


Рисунок 7.3

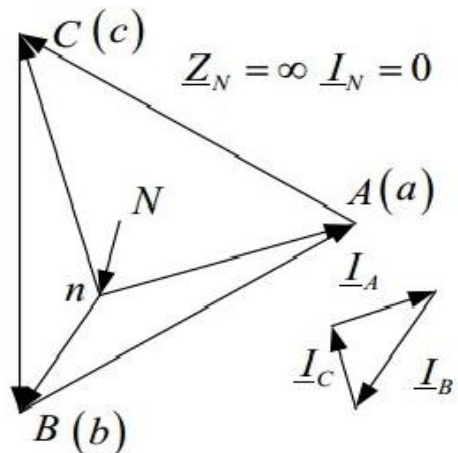


Рисунок 7.4

При несимметричной нагрузке, соединенной по схеме «звезда» равенство (7.2) не выполняется

$$\begin{cases} U_{AN} \neq U_{an}; \\ U_{BN} \neq U_{bn}; \\ U_{CN} \neq U_{cn}. \end{cases}$$

и ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \neq 0.$$

В этом случае для нахождения фазных (линейных) токов сначала определяется напряжение  $\underline{U}_{Nn}$  по методу «двух узлов»:

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{U}_A \frac{1}{\underline{Z}_A} + \underline{U}_B \frac{1}{\underline{Z}_B} + \underline{U}_C \frac{1}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}.$$

Затем находятся значения фазных напряжений на нагрузке:

$$\begin{cases} \underline{U}_{an} = \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{Nn}; \\ \underline{U}_{bn} = \underline{U}_{BN} - \underline{U}_{Nn}; \\ \underline{U}_{cn} = \underline{U}_{CN} - \underline{U}_{Nn}. \end{cases}$$

и наконец, рассчитываются токи в фазах:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_C}.$$

Мгновенная мощность цепей трёхфазного тока при соединении приёмника по схеме «звезда»:

$$P = P_A + P_B + P_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Средняя мощность за период или активная мощность:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C,$$

т.е. равна сумме мощностей отдельных фаз.

При симметричной нагрузке:

$$P_A = U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t - \varphi) = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \varphi);$$

$$P_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) I_m \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) = \\ = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - 240^\circ - \varphi);$$

$$P_C = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) I_m \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi) = \\ = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t + 240^\circ - \varphi).$$

Их сумма  $P_A + P_B + P_C = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$ .

Таким образом, при симметричной нагрузке суммарная активная мощность:

$$P_\Sigma = 3P_\phi.$$

По аналогии суммарная реактивная мощность:

$$Q_\Sigma = Q_A + Q_B + Q_C$$

или при симметричной нагрузке:

$$Q_\Sigma = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi.$$

Полная суммарная мощность при симметричной нагрузке, соединенной по схеме «звезда»:

$$S_\Sigma = 3U_\phi I_\phi.$$

В практике инженерных расчётов часто используют выражения:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi, \quad \frac{Q}{S} = \sin \varphi, \quad \frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Активную, реактивную и полную мощность можно вычислить также в комплексной форме, при этом

$$\tilde{S}_\phi = \underline{U}_\phi \underline{I}_\phi = U_\phi e^{j\psi_U} I_\phi e^{j\psi_I} = U_\phi I_\phi e^{j(\psi_U - \psi_I)} = U_\phi I_\phi e^{j\varphi} \\ = U_\phi I_\phi [\cos \varphi + j \sin \varphi] = P_\phi + jQ_\phi.$$

Для измерения активной мощности в трёхпроводной схеме трёхфазной цепи применяется метод двух ваттметров. Один из вариантов включения ваттметров представлен на рисунке 7.5. Активная мощность трёхфазной цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров.

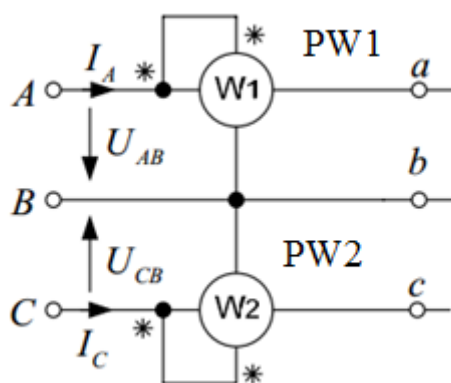


Рисунок 7.5 – Схема для измерения активной мощности в трёхпроводной цепи

### 3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе исследуются режимы работы трёхфазной четырёхпроводной (с нейтральным проводом) и трёхпроводной (без нейтрального провода) цепей, соединённых по схеме «звезда».

Источником симметричного трёхфазного напряжения является ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Источник создаёт систему напряжений прямого следования фаз с линейным напряжением  $U_L = 12$  В промышленной частоты.

Трёхфазная нагрузка собирается из пассивных элементов-миниблоков – резисторов.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ, для измерения активной мощности – встроенный ваттметр.

### 4 Расчётно-графическая часть

Нарисовать схему соединения трёхфазной цепи «звезда-звезда с нейтральным проводом». Параметры цепи для симметричного и несимметричного режимов заданы в таблице. 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные данные исследуемых режимов

$U_\phi$ , В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом
7	1000	1000	1000	680	470	1000

#### 4.1 Анализ работы электрической цепи при симметричной нагрузке

4.1.1 Провести анализ работы электрической цепи при симметричной нагрузке. Рассчитать для данной схемы: фазные токи, ток в нейтральном проводе, суммарную активную мощность четырёхпроводной цепи. Полученные результаты занести в таблицу Б.2 (приложение Б). Построить топографическую

диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.2 Провести анализ аварийного режима при обрыве фазного провода *A*. Рассчитать для схемы данного аварийного режима фазные токи и ток в нейтральном проводе. Полученные результаты занести в таблицу Б.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.3 Провести анализ аварийного режима при обрыве нейтрального провода. Рассчитать для полученной схемы аварийного режима фазные токи и напряжение смещения нейтрали. Полученные результаты занести в таблицу Б.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

## **4.2 Анализ работы электрической цепи при несимметричной нагрузке**

4.2.1 Провести анализ работы электрической цепи при несимметричной нагрузке (таблица 7.1). Рассчитать для схемы с несимметричной нагрузкой: фазные токи и ток в нейтральном проводе, суммарную активную мощность четырёхпроводной цепи. Полученные результаты занести в таблицу Б.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2.2 Провести анализ аварийного режима при обрыве нейтрального провода, для чего рассчитать для полученной схемы фазные токи и напряжение смещения нейтрали. Полученные результаты занести в таблицу Б.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2.3 Провести анализ режима при обрыве фазного провода *A*. Рассчитать для полученной схемы фазные токи и напряжение смещения нейтрали. Полученные результаты занести в таблицу Б.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2.4 Провести анализ режима короткого замыкания в цепи по схеме «звезда-звезда без нейтрального провода» для несимметричной нагрузки. Короткозамкнутый провод выбрать самостоятельно. Рассчитать для полученной схемы ток в короткозамкнутом фазном проводе и токи в остальных фазных проводах. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

## **5 Экспериментальная часть**

### **5.1 Исследование симметричного режима**

5.1.1 Собрать электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке Б.9 (приложение Б). Установить заданные в таблице Б.1 величины  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  из миниблоков резисторов. Установить на одном из мультиметров (PV1) режим измерения переменного напряжения – V-20 В. Измерение фазных токов проводим одним из мультиметров – PA1, установив режим измерения переменного тока –



$I$  с диапазоном **200 мА**. Мультиметр РА2 в нейтральном проводе включить в режим измерения переменного тока с диапазоном **200 мА**.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Включить выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ТРЁХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, блока мультиметров и ваттметра. Тумблер SA модуля ВАТТМЕТР установить в положение 0,2 А. Вольтметром PV1 из блока МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$  и линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  модуля ТРЁХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ1). Измеренные величины занести в таблицу Б.2 протокола испытаний. Проверить выполнения соотношений  $U_L = \sqrt{3}U_\Phi$  для симметричного источника.

5.1.4 Измерить амперметром РА1 фазные токи подключая его поочередно в разрыв линий А, В, С (рисунок Б.9).

Вольтметром PV1 из БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  и линейные напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  на нагрузке. Ток в нейтральном проводе измерить мультиметром РА2. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п 4.1.1.

5.1.5 Отсоединить фазный провод А в точке а на амперметре РА1. Выполнить измерения и занести результаты в таблицу Б.2. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п. 4.1.2. Восстановить цепь фазы А.

5.1.6 Переключить мультиметр РА2 в нейтральном проводе на режим измерения переменного напряжения – PV2, что соответствует режиму симметричной нагрузки без нейтрального провода. . Выполнить прибором РА1 из блока МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ измерения токов фаз. Вольтметром PV1 измерить фазные напряжения  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$ ; мультиметром PV2 – напряжение  $U_{Nn}$ . Измеренные значения напряжений и токов занести в таблицу Б.2. Сравнить полученные данные с рассчитанными в п.п.4.1.3.

## **5.2 Исследование несимметричного режима**

5.2.1 Установить в миниблоках резисторов сопротивление  $R_1 = 680 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 470 \text{ Ом}$ , создав несимметричный режим. Переключить мультиметр PV2 в нейтральном проводе на режим измерения переменного тока – РА2, что соответствует *режиму несимметричной нагрузки с нейтральным проводом*. Выполнить измерения линейных токов  $I_A, I_B, I_C$ , тока в нейтральном проводе  $I_N$ , фазных  $U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$  и линейных напряжений  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ . Данные занести в таблицу Б.3.

5.2.2 Переключить мультиметра РА2 в нейтральном проводе на режим измерения переменного напряжения – PV2, что соответствует *режиму несимметричной нагрузки без нейтрального провода*. . Отсоединить фазный провод А в точке а на амперметре РА1. Выполнить измерения и занести результаты в

таблицу Б.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п. 4.2.3. Восстановить цепь фазы  $A$ .

5.2.3 Выполнить измерения фазных токов, фазных и линейных напряжений, напряжения смещения нейтрали  $U_{Nn}$  и мощностей для режима несимметричной нагрузки без нейтрального провода. Измеренные значения занести в таблицу Б.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п. 4.2.2.

5.2.4 Закоротить фазу  $A$ , соединив проводом точки  $a$  и  $n$ . Измерения токов и напряжений выполнить согласно данным выше рекомендациям. Измеренные значения занести в таблицу Б.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п. 4.2.4.

5.2.5 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ТРЁХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ блока мультиметров и ваттметра и выключатель QF.

## 6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, а также векторные диаграммы токов и напряжений, исследуемых режимов, с указанием масштабов, выводы по лабораторной работе.

## 7 Контрольные вопросы

1 Каким образом три однофазных электроприёмника соединить по схеме «звезда»? Изобразите схему соединения.

2 Покажите на схеме «звезда» условно-положительные направления фазных и линейных токов и напряжений.

3 Какой режим работы трёхфазной цепи называется симметричным?

4 Какие существуют зависимости между линейными и фазными значениями напряжений и токов при симметричной нагрузке?

5 Каково назначение нейтрального провода?

6 Какими уравнениями связаны линейные и фазные напряжения при отсутствии нейтрального провода и несимметричной нагрузке?

7 Необходим ли нейтральный провод при работе трёхфазной цепи в различных режимах?

8 Можно ли устанавливать предохранитель в цепь нейтрального провода?

9 Что представляет собой источник трёхфазной ЭДС?

10 Напишите выражения для мгновенных и комплексных значений э.д.с. фаз трёхфазного источника.

11 Как осуществляется соединение фаз источника и приёмника в трёхфазной цепи?

12 Дайте определения фазного и линейного напряжений и токов.

13 При каких условиях в цепи наблюдается симметричный режим работы?

14 Что произойдет с системой фазных напряжений несимметричного электроприёмника при отключении нейтрального провода? Поясните на диа-

грамме.

15 Что называется напряжением смещения нейтрали и при каких условиях оно равно нулю?

16 Как определяется ток в нейтральном проводе при несимметричной нагрузке?

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЁННОЙ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

#### 1 Цели работы

Исследовать режимы работы 3-фазной цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник», провести анализ методом векторных диаграмм.

#### 2 Основные положения теории

Общие сведения о трехфазной цепи и симметричном источнике изложены в предыдущей лабораторной работе. На рисунке 8.1 показан способ соединения фаз нагрузки треугольником. Токи  $I_A, I_B, I_C$  называются линейными, токи  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  – фазными. Напряжения  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  являются одновременно фазными и линейными.

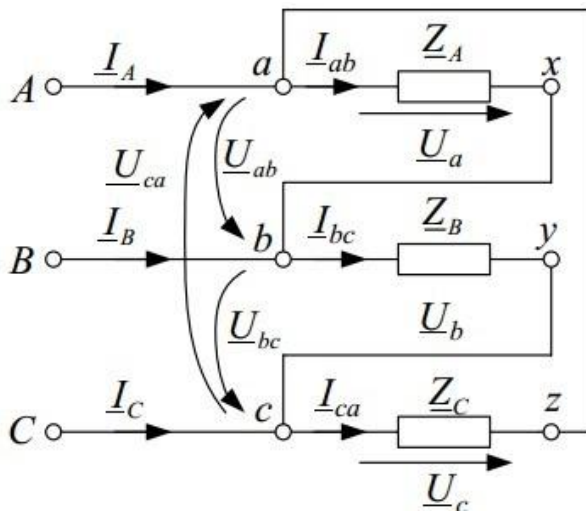


Рисунок 8.1

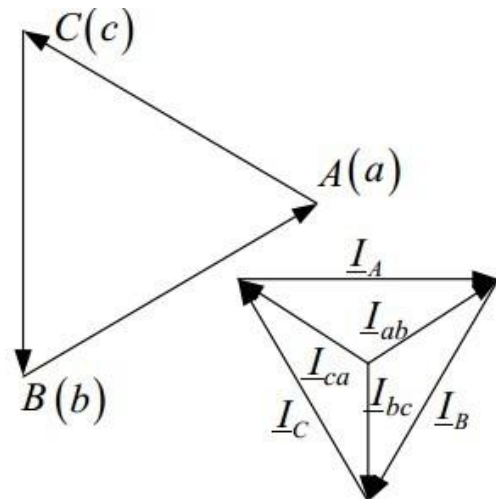


Рисунок 8.2

На рисунке 8.2 показана топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для случая симметричной трёхфазной цепи, когда

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R.$$

В симметричном режиме ток  $I_L = \sqrt{3}I_\Phi$ , напряжение  $U_L = U_\Phi$

В случае несимметричной нагрузки фазные токи вычисляют по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_A; \quad \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc} / \underline{Z}_B; \quad \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{ca} / \underline{Z}_C.$$

Линейные токи определяют по закону Кирхгофа для узлов:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

### 3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе исследуются режимы работы 3-проводной трёхфазной цепи со схемой соединения «звезда-треугольник».

Источником симметричного трёхфазного напряжения является ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Источник создаёт систему напряжений прямого следования фаз с линейным напряжением  $U_L = 12$  В промышленной частоты.

Трёхфазная нагрузка собирается из пассивных элементов-миниблоков – резисторов.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ, для измерения активной мощности – встроенный ваттметр.

### 4 Расчётно-графическая часть

#### 4.1 Анализ работы электрической цепи при симметричной нагрузке

4.1.1 Нарисовать схему соединения трёхфазной цепи по схеме «звезда-треугольник». Параметры цепи для симметричного режима заданы в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Исходные данные исследуемых режимов

$U_\phi$ , В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом
7	1000	1000	1000	680	1000	1000

Рассчитать для данной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Рассчитать суммарную активную мощность цепи для симметричного режима. Полученные результаты занести в таблицу В.2 (приложение В). Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.2 Провести анализ аварийного режима при обрыве фазного провода  $ab$ . Рассчитать для полученной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Полученные результаты занести в таблицу В.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.3 В схеме п.4.1.1 произвести обрыв линейного провода  $A$ . Рассчитать для полученной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Полученные результаты занести в таблицу В.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

#### 4.2 Анализ работы электрической цепи при несимметричной нагрузке

4.2.1 Для исходной схемы создать *несимметричный режим*, для чего за-

менить сопротивления в фазе «*ab*». Параметры цепи для несимметричного режима заданы в таблице 8.1. Рассчитать для данной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Рассчитать суммарную активную мощность цепи для несимметричного режима. Полученные результаты занести в таблицу В.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

## 5 Экспериментальная часть

### 5.1 Исследование симметричного режима

5.1.1 Собрать электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке В.1 Установить заданные в таблице 8.1 величины  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  из миниблоков резисторов. Установить на одном из мультиметров (PV1) режим измерения переменного напряжения – **V-20 В**. Измерение фазных токов проводится одним из мультиметром – РА1, установив режим измерения переменного тока –  $I$  с диапазоном **200 мА**. Измерение линейных токов проводится мультиметром РА2, включив его в режим измерения переменного тока с диапазоном **200 мА**.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Включить выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Тумблер SA блока ВАТТМЕТР установить в положение **0,2 А**. Вольтметром PV1 из блока МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения  $U_A, U_B, U_C$  и линейные напряжения  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  модуля ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ1). Измеренные значения занести в таблицу В.2 протокола измерений (приложение В).

5.1.4 Измерить амперметром РА1 фазные токи подключая его поочередно в разрыв линий  $x1-x2$ ,  $x3-x4$ ,  $x5-x6$  (рисунок В.6).

5.1.5 Измерить амперметром РА2 линейные токи подключая его поочередно в разрыв линий  $x7-x8$ ,  $x9-x10$ ,  $x11-x12$ .

5.1.6 Вольтметром PV1 из блока МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  на нагрузке. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п.4.1.1.

5.1.7 Отсоединить фазный провод *ab* точке  $x2$  на амперметре РА1. Выполнить измерения фазных и линейных токов, фазных напряжений на нагрузке. Занести полученные результаты в таблицу В.2 и сравнить их с рассчитанными в п.4.1.2. Восстановить цепь фазы *ab*.

5.1.8 Отсоединить линейный провод *A* точке  $x8$ . Выполнить измерения фазных и линейных токов, фазных напряжений на нагрузке. Занести полученные результаты в таблицу В.2 и сравнить их с рассчитанными в п.п.4.1.3. Восстановить цепь линии *A*.

### 5.2 Исследование несимметричного режима

5.2.1 Установить в миниблоках резисторов сопротивление  $R_1 = 680 \text{ Ом}$ ,

создав *несимметричный режим*. Выполнить измерения фазных токов  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$ , линейных токов  $I_A, I_B, I_C$ , фазных напряжений  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ . Результаты занести в таблицу В.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.4.2.1.

5.2.2 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ и выключатель QF.

## 6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, а также векторные диаграммы токов и напряжений, исследуемых режимов, с указанием масштабов, выводы по лабораторной работе.

## 7 Контрольные вопросы

1 Как осуществляется соединение трёхфазного приёмника по схеме «треугольник»?

2 Какой приёмник называется симметричным?

3 Дайте определение фазного и линейного токов.

4 Каково соотношение величин линейного напряжения и фазного напряжения приёмника, соединенного по схеме «треугольник»?

5 Каково соотношение действующих значений фазного и линейного токов симметричного приёмника, соединенного по схеме «треугольник»?

6 В какой взаимосвязи находятся комплексные значения фазных и линейных токов при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?

7 Как строится векторная диаграмма напряжений и токов трёхфазной электрической цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?

8 Определите действующее значение линейного тока в симметричной трёхфазной цепи, соединенной по схеме «треугольник», если действующее значение фазного тока равно 1,73 А.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 1 Цель работы

Экспериментальное подтверждение теоретических методов линеаризации и аппроксимации вольтамперных характеристик нелинейных элементов, а также методов расчета цепей постоянного тока при наличии нелинейных элементов.

#### 2 Основные положения теории

**Нелинейными элементами** (НЭ) электрической цепи постоянного тока называются такие элементы, у которых зависимость тока от приложенного напряжения является нелинейной, т.е. выражается графиком, отличающимся от прямой линии. Графики  $U(I)$  или  $I(U)$  называют вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

Если измерения проводились при постоянных токе и напряжении, то характеристика нелинейного элемента называется *статической*.

Для получения статических характеристик нелинейных элементов необходимо измерить ряд значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи со схемой замещения (рисунок 9.1).

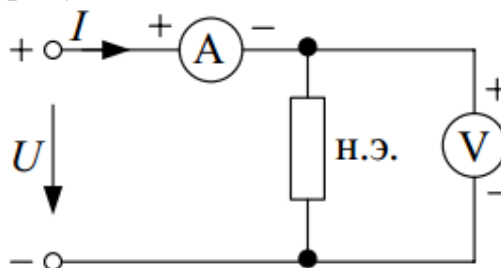


Рисунок 9.1 – Электрическая схема замещения для определения вольт-амперной характеристики нелинейного элемента

В зависимости от вида этих характеристик различают НЭ с *симметричной* и *несимметричной* вольт-амперными характеристиками. Нелинейные элементы, у которых ВАХ не зависит от направления тока (или напряжения), называются симметричными. Примером могут служить электрические лампы накаливания. У несимметричных нелинейных элементов ВАХ зависит от направления тока. Примером последних могут служить различные диоды (полупроводниковые). На рисунке 9.2 приведены ВАХ лампы накаливания (симметричная характеристика) и диода (несимметричная характеристика).

Наиболее общим методом расчёта электрических цепей с НЭ является графический. При последовательном соединении двух НЭ через них проходит один и тот же ток, а сумма напряжений на них равна приложенному напряжению. Поэтому суммарную результирующую ВАХ последовательного соедине-



ния НЭ можно построить, суммируя напряжения ВАХ обоих НЭ для одного и того же значения тока.

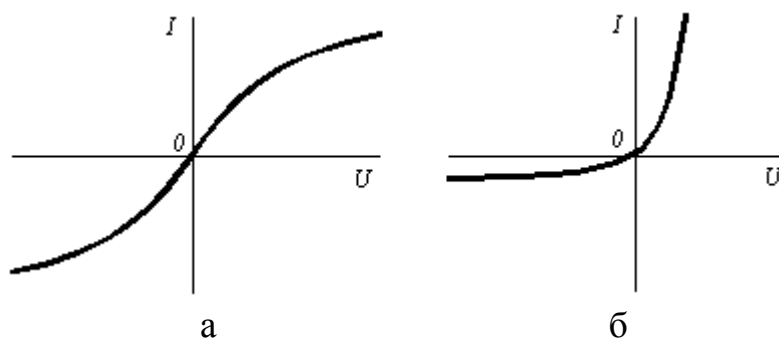


Рисунок 9.2 – ВАХ нелинейных элементов: а – лампы накаливания; б – диода

При параллельном соединении двух НЭ напряжение на них одно и то же, а ток источника равен сумме токов обоих НЭ. Суммарная ВАХ может быть построена путём сложения токов обоих НЭ при одном и том же значении напряжения.

При анализе смешанного соединения сначала находят ВАХ параллельного соединения  $R$  и  $HЭ2$  (на рисунке 9.3, б эта характеристика построена суммированием ординат характеристик  $R$  и  $HЭ2$  и обозначается  $R, HЭ2$ ). Затем строят общую ВАХ цепи, складывая абсциссы ВАХ параллельного соединения  $R, HЭ2$  и ВАХ  $HЭ1$ .

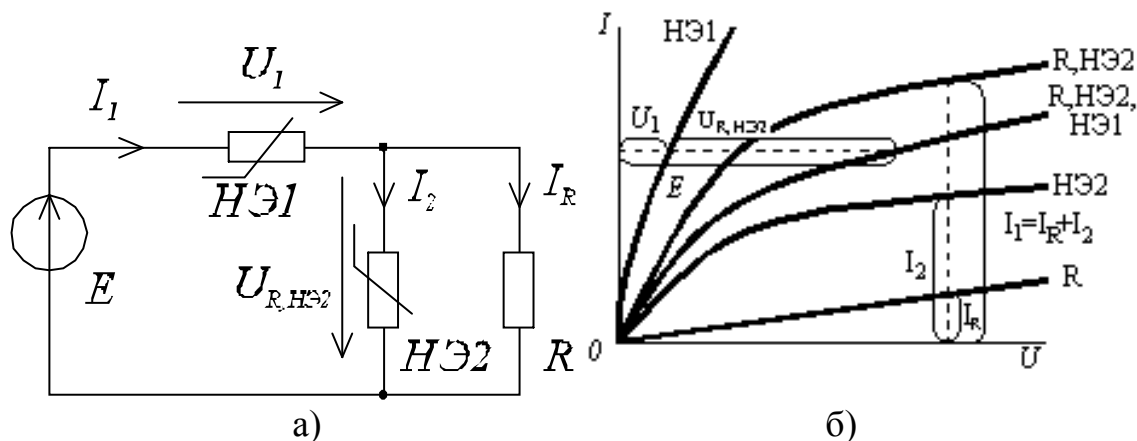


Рисунок 9.3 – Расчёт цепи с НЭ при смешанном соединении:  
а – смешанное соединение НЭ; б – графическое решение

По полученным характеристикам можно легко определить токи и напряжения всех элементов цепи. Например, по обозначенному на рисунке 9.3, б значению  $E$  и характеристикам  $HЭ1$  и  $R, HЭ2$  можно найти напряжение  $U_1$  и  $U_{R,HЭ2}$  и т.д.

### 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования являются цепи постоянного тока, содержащие нелинейные элементы: лампа сигнальная, диод и стабилитрон.

В лабораторной работе источником постоянного тока служат два генератора постоянных напряжений из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ: регулируемый генератор (0...15 В) и нерегулируемый (15 В). Для получения на-

пряжения до 30 В их следует соединять последовательно. Для получения напряжения от 0 до 15 В следует установить тумблер SA1 на источнике 15 В в нижнее положение, а тумблер SA2 на источнике 0...15 В установить в верхнее положение. Для получения напряжения выше 15 В, оба тумблера установить в верхнее положение (рисунок Г.1).

В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры для измерения напряжений и токов.

#### 4 Расчётно-графическая часть

Входное напряжение для исследуемой цепи (рисунок 9.3) представлено в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Исходные данные

№ бригады	1	2	3	4	5	6
$U_{ex}, \text{В}$	10	8	6	12	9	7

4.1 Нарисовать качественно вольтамперные характеристики нелинейных двухполюсников, содержащих нелинейные элементы  $HЭ1$  и  $HЭ2$  при  $R = 470 \text{ Ом}$ . Напряжение на входе двухполюсников меняется от 0 до  $\pm 20 \text{ В}$ . ВАХ нелинейных элементов представлены на рисунке 9.4, а и б. (1 клетка соответствует 1 В и 1 мА соответственно).

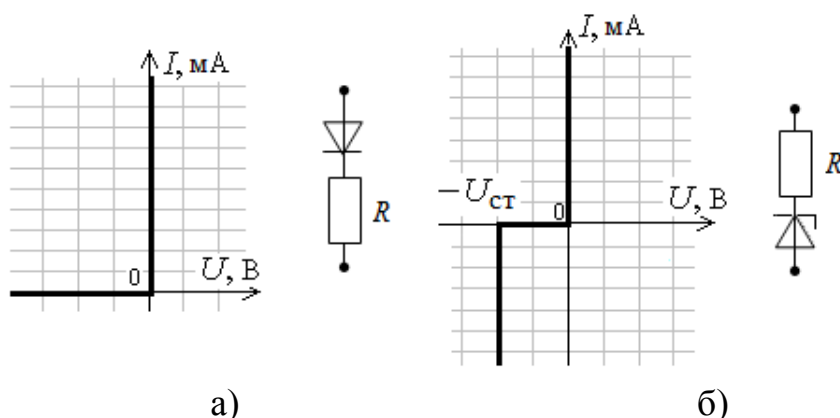


Рисунок 9.4 – Вольтамперные характеристики нелинейных элементов  $HЭ1$  и  $HЭ2$  и их схемы включения

#### 5 Экспериментальная часть

##### 5.1 Определение ВАХ лампы накаливания

5.1.1 Собрать схему цепи согласно рисунку Г.1 (приложение Г). В качестве  $HЭ1$  выбрать лампу сигнальную, обозначенную в модуле НЕЛИНЕЙНЫ ЭЛЕМЕНТЫ как  $HL$ . Установить величину сопротивления  $R1 = 10 \text{ Ом}$  в блоке МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ,

тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.4 Тумблер SA1 на источнике напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (рисунок Г.1, приложение Г) установить в нижнее положение, а тумблер SA2 на источнике напряжения 0...15 В установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений  $U_{\text{вх}} = 0$ . Плавно изменяя регулятором напряжения от 0 до 15 В с шагом 1 В экспериментально получить статическую характеристику  $HЭ1$ . Все измеренные величины занести в таблицу Г.2 протокола испытаний. Построить на миллиметровой бумаге зависимость  $U_{HЭ1}(I)$  лампы накаливания.

## 5.2 Определение ВАХ полупроводникового диода

5.2.1 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.2 (приложение Г). Установить величину сопротивления  $R2 = 1$  кОм в блоке МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ

5.2.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.2.3 Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ, тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.2.4 Тумблер SA1 на источнике напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ установить в нижнее положение, а тумблер SA2 на источнике 0...15 В установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений  $U_{\text{вх}} = 0$ . Плавно изменяя регулятором напряжения от 0 до 15 В с шагом 1 В экспериментально получить статическую характеристику  $HЭ2$ . Измеренные величины занести в таблицу Г.3 протокола испытаний. Построить на миллиметровой бумаге зависимость  $U_{HЭ2}(I)$ .

5.2.5 На миллиметровой бумаге в одной системе координат  $I, U$  построить три графические зависимости  $U_{HЭ1}(I)$ ,  $U_{HЭ2}(I)$  и  $U_{R3}(I)$ . Величину  $R3$  принять равной 470 Ом.

5.2.6 Рассчитать графо-аналитическим методом токи в ветвях схемы и падения напряжений на каждом элементе, если  $HЭ1$  соединен последовательно с параллельно соединенными  $HЭ2$  и  $R3$  при входном напряжении  $U_{\text{вх}}$  принятом согласно таблице Г.1. Полученные результаты занести в таблицу Г.4 протокола испытаний.

## 5.3 Определение результирующей ВАХ смешанной цепи

5.3.1 Собрать электрическую цепь согласно схемы представленной на рисунке Г.3 (приложение Г).

5.3.2 Рукояткой регулируемого источника напряжения (рисунок Г.3) по мультиметру PV1, включённому в режим измерения постоянного напряжения, установить величину  $U_{\text{вх}}$  согласно таблице Г.1.

5.3.3 Измерить токи в ветвях схемы и падения напряжений между точка-

ми  $ac$  и  $cd$  (рисунок Г.3). Для измерения токов использовать мультиметр РА1 включенный в режим измерения постоянного тока, поочередно подключая его в разрыв соответствующих ветвей, и мультиметр PV2, включенный в режим измерения постоянного напряжения, подключая его к точкам  $ac$  и  $cd$ . Полученные результаты занести в таблицу Г.5 протокола испытаний.

#### **5.4 Определение ВАХ параметрического стабилизатора напряжений**

5.4.1 Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения, представленную на рисунке Г.4, подключив входные зажимы цепи к регулируемому источнику постоянного напряжения. Установить величину балластного сопротивления  $R_{\bar{\sigma}} = 220 \text{ Ом}$ .

5.4.2 Плавно изменяя регулятором входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  от 0 до 20 В с шагом 1,0 В (по мультиметру PV1), измерить величину тока  $i$  (по мультиметру РА1) и соответствующее ему выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  (по мультиметру PV2) при  $R_{\text{н}} = \infty$ . Результаты измерений занести в таблицу Г.6.

5.4.3 Установить величину сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$  и повторить измерения согласно п.5.4.2. Результаты измерений занести в таблицу Г.7.

5.4.4 Согласовать полученные результаты измерений с преподавателем и утвердить протокол испытаний. Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.4.5 По результатам таблиц Г.6 и Г.7 построить:

- ВАХ стабилитрона  $U_{\text{вых}}(I)$  при  $R_{\text{н}} = \infty$ ;
- в одной системе координат графические зависимости  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  в режиме холостого хода (при  $R_{\text{н}} = \infty$ ) и в режиме нагрузки (при  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ ).

### **6 Содержание отчёта**

Отчет должен содержать титульный лист установленного образца (приложение А), цель работы, схемы исследуемых электрических цепей, таблицы результатов полученных измерений и выполненных расчётов, ВАХ элементов в соответствующих координатных осях, выводы по работе.

### **7 Контрольные вопросы**

1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?
2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.
3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?
4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?
5. Как построить ВАХу последовательного соединения нелинейных элементов?
6. Как построить ВАХ характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

#### 1 Цель работы

1 Экспериментальное подтверждение свойств симметричных и несимметричных пассивных четырехполюсников.

2 Овладение экспериментальными методами определения параметров – коэффициентов четырехполюсников и их основных характеристик

#### 2 Основные положения теории

##### 2.1 Основные уравнения четырехполюсника

Связь между входными и выходными напряжениями и токами  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{U}_2$  и  $\underline{I}_2$  линейного пассивного четырехполюсника (при положительных направлениях напряжений и токов, указанных на рисунке 10.1) может быть выражена одной из следующих шести форм основных уравнений:

Форма  $\underline{Y}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

Форма  $\underline{Z}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.2)$$

Форма  $\underline{H}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.3)$$

Форма  $\underline{F}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{F}_{11}\underline{U}_1 + \underline{F}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{F}_{21}\underline{I}_1 + \underline{F}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.4)$$

Форма  $\underline{A}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.5)$$

Форма  $\underline{B}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{B}_{11}\underline{U}_1 + \underline{B}_{12}\underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 &= \underline{B}_{21}\underline{U}_1 + \underline{B}_{22}\underline{I}_1 \end{aligned} \right\} \quad (10.6)$$

Вместо коэффициентов  $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}, \underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}$  используется часто их запись в виде  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ .

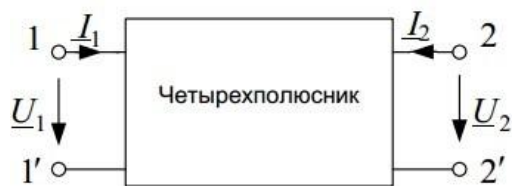


Рисунок 10.1 – Пассивный четырехполюсник

При выбранных положительных направлениях напряжений и токов, согласно рисунку 10.1, при нагрузке четырехполюсника со стороны вторичных зажимов на сопротивление  $\underline{Z}_f$ , последнее связано с выходным напряжением и током соотношением:

$$\underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_H. \quad (10.7)$$

Коэффициенты основных уравнений четырехполюсника (10.1-10.6) называются *параметрами четырехполюсника*. Они определяются только схемой самого четырехполюсника. В общем случае все коэффициенты четырехполюсника комплексны.

## 2.2 Способы определения коэффициентов четырехполюсника

Коэффициенты четырехполюсника могут быть определены различными способами:

1) составлением уравнений по законам Кирхгофа (либо методом контурных токов или узловых потенциалов) и представлением их решения в виде одной из форм уравнений (10.1-10.6);

2) по значениям напряжений и токов в режимах холостого хода и короткого замыкания (см. формулы (10.8-10.13);

3) разбивкой сложного четырёхполюсника на более простые четырёхполюсники, параметры которых известны;

4) способом эквивалентных преобразований (например, путём преобразования треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду).

Коэффициенты четырёхполюсника могут быть определены по известным напряжениям и токам в режимах холостого хода и короткого замыкания по формулам, которые получаются из формул (10.1-10.6):

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \left( \frac{i_1}{\dot{U}_1} \right)_{U_2=0}; \quad \underline{Y}_{12} = \left( \frac{i_1}{\dot{U}_2} \right)_{U_1=0}; \\ \underline{Y}_{21} &= \left( \frac{i_2}{\dot{U}_1} \right)_{U_2=0}; \quad \underline{Y}_{22} = \left( \frac{i_2}{\dot{U}_2} \right)_{U_1=0}. \end{aligned} \quad (10.8)$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{11} &= \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{Z}_{12} = \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right)_{I_1=0}; \\ \underline{Z}_{21} &= \left( \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{Z}_{22} = \left( \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right)_{I_1=0}.\end{aligned}\quad (10.9)$$

$$\begin{aligned}\underline{H}_{11} &= \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right)_{U_2=0}; \underline{H}_{12} = \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_1=0}; \\ \underline{H}_{21} &= \left( \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right)_{U_2=0}; \underline{H}_{22} = \left( \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right)_{I_1=0}.\end{aligned}\quad (10.10)$$

$$\begin{aligned}\underline{F}_{11} &= \left( \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{F}_{12} = \left( \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right)_{U_1=0}; \\ \underline{F}_{21} &= \left( \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{F}_{22} = \left( \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right)_{U_1=0}.\end{aligned}\quad (10.11)$$

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_2=0}; \underline{B} = \left( \frac{\dot{U}_1}{-\dot{I}_1} \right)_{U_2=0}; \\ \underline{C} &= \left( \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_2=0}; \underline{D} = \left( \frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2} \right)_{U_2=0}.\end{aligned}\quad (10.12)$$

$$\begin{aligned}\underline{B}_{11} &= \left( \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right)_{I_1=0}; \underline{B}_{12} = \left( \frac{\dot{U}_2}{-\dot{I}_1} \right)_{U_1=0}; \\ \underline{B}_{21} &= \left( \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right)_{I_1=0}; \underline{B}_{22} = \left( \frac{\dot{I}_2}{-\dot{I}_1} \right)_{U_1=0}.\end{aligned}\quad (10.13)$$

## 2.3 Виды соединения четырехполюсников

Несколько четырёхполюсников могут быть соединены между собой различными способами: параллельно, последовательно, последовательно-параллельно, параллельно-последовательно а также каскадно (в виде цепочки). На рисунке 10.2 приведён пример каскадного соединения двух четырёхполюсников, коэффициенты которых выражены в форме  $\underline{A}$ . При этом матричное уравнение параметров полученного сложного четырёхполюсника будет иметь вид:

$$[\underline{A}] = [\underline{A}'] + [\underline{A}''].$$

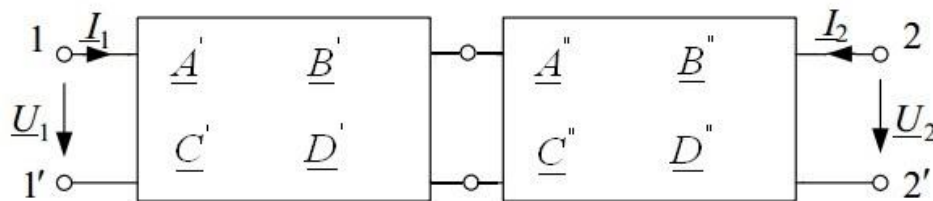


Рисунок 10.2 – Каскадное соединение четырёхполюсников

Откуда следует матричная форма записи основных уравнений четырёх-полюсника:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} = [\underline{A}] \times \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix}.$$

Аналогичные формулы справедливы при соединении любого числа четырёхполюсников.

Следует иметь в виду, что указанные формулы нахождения матриц сложных четырёхполюсников справедливы лишь при выполнении условий регулярности их соединения. Соединение четырёхполюсника регулярно в случае, когда токи, протекающие через оба первичных зажима каждого их четырёхполюсников, равны по величине и обратны по направлению.

## 2.4 Характеристические параметры четырёхполюсника

Помимо параметров, указанных в п. 2.1, применяются характеристические параметры четырёхполюсника: характеристические сопротивления  $\underline{Z}_{1c}$ ,  $\underline{Z}_{2c}$ , и характеристическая постоянная передачи  $g$ , которые также полностью характеризуют четырёхполюсник.

Характеристическими называются два сопротивления  $\underline{Z}_{1c}$  и  $\underline{Z}_{2c}$ , обладающие следующим свойством: входное сопротивление четырёхполюсника со стороны зажимов 1–1' при подключении к зажимам 2–2' сопротивления  $\underline{Z}_{2c}$ , равно  $\underline{Z}_{1c}$ , и наоборот, при подключении к зажимам 1–1' сопротивления  $\underline{Z}_{1c}$  входное сопротивление четырёхполюсника со стороны зажимов 2–2' равно  $\underline{Z}_{2c}$ .

Режим работы четырёхполюсника, нагруженного соответствующим характеристическим сопротивлением, называется согласованным.

Постоянная передачи:

$$g = a + jb \quad (10.14)$$

где  $a$  – характеристическое (собственное) затухание, Нп или  $dB$ ,  
 $b$  – характеристический (собственный) коэффициент фазы, рад или град.

$$e^g = (\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}}). \quad (10.15)$$

Для вычисления  $g$  согласно (10.15), следует вычислить комплекс

$$\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}} = Ae^{\varphi},$$

представив его в показательной форме. С учётом (10.14), (10.15) получаем

$$e^a e^{jb} = Ae^{\varphi} \quad (10.16)$$

откуда  $b = \varphi$ ;  $a = \ln(A)$ , Нп.

Характеристические параметры можно определить через параметры формы  $\underline{A}$ :



$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{\underline{AB}}{\underline{CD}}}, \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{\underline{DB}}{\underline{CA}}}; \quad (10.17)$$

$$th(g) = \sqrt{\frac{\underline{BC}}{\underline{AD}}}, \quad g = \ln(\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}}) \quad (10.18)$$

и наоборот коэффициенты формы  $\underline{A}$  могут быть выражены через характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} ch(g); \underline{B} = \sqrt{\underline{Z}_{1C} \underline{Z}_{2C}} sh(g) \\ \underline{C} &= \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_{1C} \underline{Z}_{2C}}} sh(g); \underline{D} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{2C}}{\underline{Z}_{1C}}} ch(g). \end{aligned} \right\} \quad (10.19)$$

## 2.5 Согласованный режим работы четырехполюсника

В этом случае связь между комплексами токов и напряжений на входе и выходе задается соотношениями:

$$\underline{U}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} \underline{U}_2 \cdot e^g; \quad \underline{I}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} \underline{I}_2 e^g, \quad (10.20)$$

а для модулей действующих значений

$$U_1 = \sqrt{\frac{z_{1C}}{z_{2C}}} U_2 \cdot e^a \quad I_1 = \sqrt{\frac{z_{1C}}{z_{2C}}} I_2 e^a. \quad (10.21)$$

Все входящие в формулу (10.21) величины чисто вещественные.

Для симметричных четырёхполюсников  $\underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_{2C}$ , поэтому выражение (10.21) перепишется в виде:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot e^g, \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cdot e^g. \quad (10.23)$$

Обозначив

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{\varphi_{U_1}}, \dot{U}_2 = U_2 e^{\varphi_{U_2}}, \dot{I}_1 = I_1 e^{\varphi_{I_1}}, \dot{I}_2 = I_2 e^{\varphi_{I_2}}, \dot{I}_2 = I_2 e^{\varphi_{I_2}}$$

на основе выражения (10.23), получим:

$$\frac{U_1}{U_2} e^{(\varphi_{U_1} - \varphi_{U_2})} = e^a e^{jb}; \quad \frac{I_1}{I_2} e^{(\varphi_{I_1} - \varphi_{I_2})} = e^a e^{jb}$$

откуда для симметричного четырёхполюсника

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = e^a;$$

$$\varphi_{U_1} - \varphi_{U_2} = \varphi_{I_1} - \varphi_{I_2} = b. \quad (10.24)$$

Выражения (10.24) раскрывают физический смысл коэффициентов  $a$  и  $b$ ; величина  $e^a$  показывает, во сколько раз величины тока и напряжения на выходе четырёхполосника меньше, чем соответствующие значения на входе, т.е. во сколько раз затухает сигнал, проходя через четырёхполосник, работающий в согласованном режиме. Коэффициент фазы показывает, каков фазовый сдвиг между напряжением на входе и выходе, или между током на входе и выходе в согласованном режиме (не путать с фазовым сдвигом между напряжением и током).

## 2.6 Параметры холостого хода и короткого замыкания

В расчётах используются также параметры холостого хода  $\underline{Z}_{1XX}$ ,  $\underline{Z}_{2XX}$  и короткого замыкания  $\underline{Z}_{1K3}$ ,  $\underline{Z}_{2K3}$ , измеренные соответственно со стороны первичных и вторичных зажимов, которые связаны между собой соотношением:

$$\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX}} = \frac{\underline{Z}_{1K3}}{\underline{Z}_{2K3}}. \quad (10.25)$$

Характеристические параметры выражаются через параметры холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\underline{Z}_{1XX}\underline{Z}_{1K3}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\underline{Z}_{2XX}\underline{Z}_{2K3}}; \quad (10.26)$$

$$th(g) = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1K3}}{\underline{Z}_{1XX}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{2K3}}{\underline{Z}_{2XX}}}. \quad (10.27)$$

Сопротивления холостого хода и короткого замыкания определяются через характеристические параметры или коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$ .

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{1XX} &= \underline{Z}_{1C}cth(g) = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}; \\ \underline{Z}_{1K3} &= \underline{Z}_{1C}th(g) = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}; \\ \underline{Z}_{2XX} &= \underline{Z}_{2C}cth(g) = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}; \\ \underline{Z}_{2K3} &= \underline{Z}_{2C}th(g) = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.28)$$

Коэффициенты  $\underline{A}$  четырёхполосника вычисляются по сопротивлениям холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{A} = \pm \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1XX}}{(\underline{Z}_{2XX} - \underline{Z}_{2K3})}}; \\ \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2K3};$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1XX}} ;$$

$$\underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1K3}} . \quad (10.29)$$

Пассивный линейный четырехполюсник можно заменить Т– или П – образной схемой замещения. На рисунке 10.3 приведена Т-образная схема замещения.

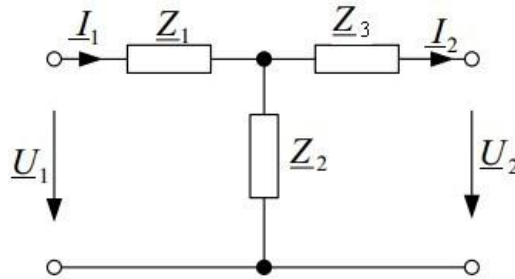


Рисунок 10.3 – Т-образная схема замещения четырехполюсника

Параметры – коэффициенты  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$  Т – образного четырехполюсника определяются согласно выражениям [2]:

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} ; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} ; \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_2} ; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} . \quad (10.30)$$

На рисунке 10.4 представлена П - образная схема замещения четырёхполюсника

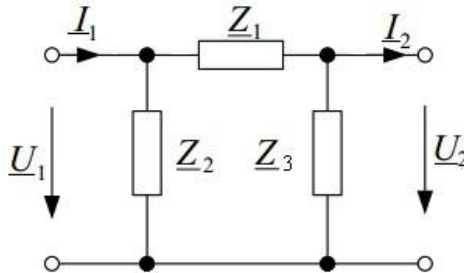


Рисунок 10.4 – П-образная схема замещения четырёхполюсника

Параметры – коэффициенты  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$  П – образного четырёхполюсника определяются по следующим формулам [2]:

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} ; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 ; \quad \underline{C} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3} ; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} . \quad (10.31)$$

## 2.7 Симметричные четырёхполюсники

В частном случае при наличии симметричного четырёхполюсника, все приведенные выше формулы упрощаются, если учесть, что при этом имеются равенства:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} = \underline{D}; \underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_{2C} = \underline{Z}_C \\ \underline{Z}_{1XX} = \underline{Z}_{2XX} = \underline{Z}_{XX}; \underline{Z}_{1K3} = \underline{Z}_{2K3} = \underline{Z}_{K3} \end{aligned} \right\}.$$

## 2.8 Эквивалентность четырёхполюсников

Четырёхполюсники эквивалентны, если они имеют одинаковые:

- а) параметры коэффициентов одной из форм основных уравнений ( $\underline{Y}, \underline{Z}, \underline{H}, \underline{A}, \underline{B}$ );
- б) характеристические параметры;
- в) параметры холостого хода и короткого замыкания.

## 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования являются несимметричный и симметричный четырёхполюсники подключаемые к сети переменного тока. Четырёхполюсник собирают из элементов миниблоков резисторов, индуктивностей и емкостей в соответствии с рисунков Д.3-Д.4, приведенными в протоколе испытаний (приложение Д).

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является БЛОК ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 для измерения напряжений и токов и встроенный ваттметр для измерения активной мощности.

## 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Определить параметры-коэффициенты  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$  Т-образного четырёхполюсника (рисунок Д.1), используя формулы (10.30). Параметры  $R, L, C$  заданы в таблице 10.1 ( $X_L$  и  $X_C$  рассчитать при частоте  $f$ ).

Проверить правильность расчёта по формуле  $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ .

Таблица 10.1

№ бригады	$R$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$f$ , кГц	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , кОм
1	10	10	0,22	2,0	4,7	1	1
2	33	10	0,47	1,0	10	4,7	4,7
3	22	100	0,47	0,5	22	10	10
4	22	40	0,1	1,5	2,2	1	1

4.2 По рассчитанным в п. 4.1 коэффициентам определить сопротивление холостого хода и короткого замыкания со стороны первичных и вторичных зажимов четырёхполюсника по формуле (10.28).

Правильность расчёта проверить по формуле:

$$\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX}} = \frac{\underline{Z}_{1K3}}{\underline{Z}_{2K3}}.$$

4.3 Начертить П-образную схему симметричного четырёхполюсника, со-

ставленного из сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$ , значения которых приведены в таблице 10.1. Рассчитать для этого четырёхполюсника коэффициенты  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$  по формуле (10.31), а также характеристическое сопротивление  $\underline{Z}_c$  и коэффициент передачи  $g=a+jb$  по формулам (10.17), (10.18). Полученные результаты занести в таблицу 3 протокола измерений.

## 5 Экспериментальная часть

### 5.1 Исследование Т-образного четырёхполюсника

5.1.1 Собрать схему цепи несимметричного пассивного четырехполюсника рисунок Д.3.

Установить заданные в таблице 10.1 величины  $R, L, C$ , из миниблоков резисторов и реактивных элементов. Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Переключатель ФОРМА модуля ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ установить в положение «~». Настроить генератор на частоту  $f$  согласно таблице Д.1 и действующее значение напряжения  $U_1 = 6-10$  В. Записать данные в таблицу Д.2 протокола испытаний.

5.1.2 Подключив ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ к первичным зажимам 1 и 1' четырёхполюсника (рисунок Д3) выполнить опыт прямого холостого хода, для чего разомкнуть зажимы 2 и 2'. Экспериментально определить модуль комплексного сопротивления  $Z_{1XX}$ .

$$Z_{1XX} = \frac{U_{1XX}}{I_{1XX}}.$$

Для измерения действующих значений напряжения  $U_1$  и тока  $I_1$  использовать мультиметры. Полученные результаты занести в таблицу Д.2 протокола испытаний.

5.1.3 Произвести опыт короткого замыкания, для чего замкнуть зажимы 2 и 2' проводником, и повторить все измерения п. 5.1.2. Экспериментально определить модуль комплексного сопротивления  $Z_{1K3}$ . Полученные результаты занести в таблицу Д.2 протокола испытаний.

$$Z_{1K3} = \frac{U_{1K3}}{I_{1K3}}.$$

5.1.4 Поменять местами входные 1-1' и выходные 2-2' зажимы (рисунок Д.3). Выполнить опыты обратного холостого хода и короткого замыкания. Экспериментально определить модули комплексных сопротивлений  $Z_{2XX}$  и  $Z_{2K3}$ . Измеренные величины занести в таблицу Д.2.

$$Z_{2XX} = \frac{U_{2XX}}{I_{2XX}}; \quad Z_{2K3} = \frac{U_{2K3}}{I_{2K3}}.$$

5.1.5 Сравнить полученные значения  $Z_{1XX}, Z_{1K3}, Z_{2XX}, Z_{2K3}$ , с полученными

ми в п. 4.2. Проверить выполнение соотношения (10.25).

5.1.6 Собрать схему симметричного четырёхполюсника по п. 4.3 (рисунок Д.4). Опытным путём (из опытов ХХ и КЗ) определить сопротивления  $Z_{1XX}$ ,  $Z_{1KЗ}$ ,  $Z_{2XX}$ ,  $Z_{2KЗ}$  этого четырёхполюсника, а по ним, используя выражение (10.29), коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . Полученные результаты занести в таблицу Д.4, сравнить их с расчётными значениями в таблице Д.3.

5.1.7 Из миниблоков резисторов взять потенциометр (переменное сопротивление), подключить к нему мультиметр, включенный на измерение сопротивления (рисунок Д.7). Установить по мультиметру сопротивление потенциометра равное характеристическому, рассчитанному в п. 4.3. Подключить его к зажимам 2-2' (рисунок Д.6). Экспериментальным путём убедиться в правильности расчёта  $Z_C$  (см. п. 2.4). Результаты занести в таблицу Д.5.

5.1.8 Опытным путём определить для рассматриваемого в предыдущем пункте четырёхполюсника его коэффициент передачи, используя выражение (10.24), и сравнить полученное значение с расчётным в п. 4.3. Результаты занести в таблицу Д.5.

5.1.9 Согласовать с преподавателем полученные результаты и утвердить протокол к лабораторной работе.

5.1.10. Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

## **6 Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, выводы по лабораторной работе.

## **7 Контрольные вопросы**

- 1 Что такое пассивный четырёхполюсник?
- 2 Какой четырёхполюсник называется симметричным?
- 3 Как проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания? Что при этом должно быть измерено?
- 4 Как проводится измерение сдвига по фазе между током и напряжением?
- 5 Сколькими независимыми параметрами (коэффициентами) характеризуется пассивный четырёхполюсник?
- 6 Изложите суть характеристического сопротивления и коэффициента передачи симметричного четырёхполюсника.
- 7 Какие бывают соединения четырёхполюсников?
- 8 Может ли в активном четырёхполюснике активная мощность на выходе быть больше активной мощности на его входе?

## Лабораторная работа № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

#### 1 Цель работы

Экспериментальное подтверждение метода расчёта цепи несинусоидального периодического тока и овладение экспериментальными методами исследования параметров цепей на форму несинусоидальных периодических кривых напряжений и тока.

#### 2 Основные положения теории

Любую периодическую несинусоидальную функцию, например, напряжения

$$u(t) = u(t + T),$$

где  $T$  – период,

можно представить тригонометрическим рядом Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_k \sin k\omega t + C_k \cos k\omega t), \quad (11.1)$$

где  $U_0$  – постоянная составляющие;

$B_k \sin k\omega t$ ,  $C_k \cos k\omega t$  – гармонические составляющие.

Гармоническая составляющая, период  $T$  которой равен периоду  $u(t)$ , называется основной. Остальные гармоники называются высшими. Расчёт линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока основан на принципе наложения. Расчёт цепи ведут отдельно для постоянной составляющей, основной и двух-трёх высших гармоник.

Для расчёта токов и напряжений гармонических составляющих используют комплексный метод расчёта. При этом следует иметь в виду, что комплексные сопротивления индуктивности и ёмкости

$$\underline{Z}_L(k\omega) = j\omega L = jx_L(k\omega) \text{ и } \underline{Z}_C(k\omega) = \frac{1}{j\omega C} = -jx_C(k\omega)$$

зависят от номера  $k$  гармоники. Принцип наложения справедлив только для мгновенных значений несинусоидальных токов и напряжений. Ток и напряжение ветви:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n i_k \cos k\omega t; \quad u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n u_k \cos k\omega t, \quad (11.2)$$

где  $n$  – номер последней высшей гармоники, принятой в расчёте.

Действующее значение (например, тока  $i(t)$ ) рассчитывается по формуле:

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}, \quad (11.3)$$

где  $I_0$  – постоянная составляющая;

$I_k$  – действующее значение  $k$ -й гармоники.

Активная мощность цепи равна сумме активных мощностей постоянной и гармонических составляющих

$$\begin{aligned} P &= P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k = \\ &= U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n \end{aligned} \quad (11.4)$$

Реактивная и полная мощность определяется по формулам:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{k=1}^n U_k I_k \sin \varphi_k = \\ &= U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_n I_n \sin \varphi_n; \end{aligned} \quad (11.5)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{(U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots)(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)}, \quad (11.6)$$

где  $I = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_k^2}$ ,  $U = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2}$  – соответственно действующие значения тока и напряжения.

Для оценки степени отличия несинусоидальной кривой от синусоиды используют коэффициенты:

- формы

$$k_\phi = \frac{I}{I_{cp}}, \quad (11.7)$$

где  $I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$  – средне выпрямленное значение тока;

- амплитуды

$$k_a = \frac{I_m}{I}, \quad (11.8)$$

где  $I_m$  – максимальное значение несинусоидального тока;

- искажения синусоидальности формы кривой функции

$$k_{ucI} = \frac{I}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2}}{I_1}, \quad (11.9)$$

где  $I_1$  – действующее значение тока основной гармоники.



### 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является электрическая цепь, состоящая из, последовательно соединенных резистора, индуктивности и конденсатора, подключенная к источнику несинусоидального периодического напряжения. В лабораторной работе экспериментально подтверждается метод расчёта цепи несинусоидального тока, основанный на принципе наложения. Проводится два опыта.

Источником несинусоидального и синусоидального напряжения в лабораторной работе является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ и встроенный ВАТТМЕТР для измерения активной мощности. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из миниблоков резисторов, индуктивностей и ёмкостей.

### 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для напряжения прямоугольной формы без постоянной составляющей (меандр) (рисунок 11.1) записать ряд Фурье, ограничиваясь пятью слагаемыми [1]. Построить в масштабе спектр амплитуд, полагая амплитуду основной гармоники равной единице.

4.2 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 11.2, рассчитать методом наложения мгновенные и действующие значения тока и напряжений на выходе генератора и на ёмкости, а также активную мощность, если на выходе генератора напряжение в форме меандра. Расчёт выполнить в комплексной форме для 1-й, 3-й и 5-й гармоник используя выражения (11.3) и (11.4). Параметры цепи представлены в таблице 11.1. Амплитудное значение напряжения на выходе генератора принять равным 8 В. Результаты расчёта записать в таблицу Е.2 протокола испытаний.

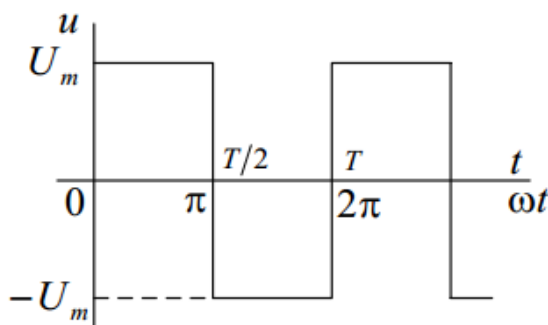


Рисунок 11.1 – График  $u(t)$  типа меандр

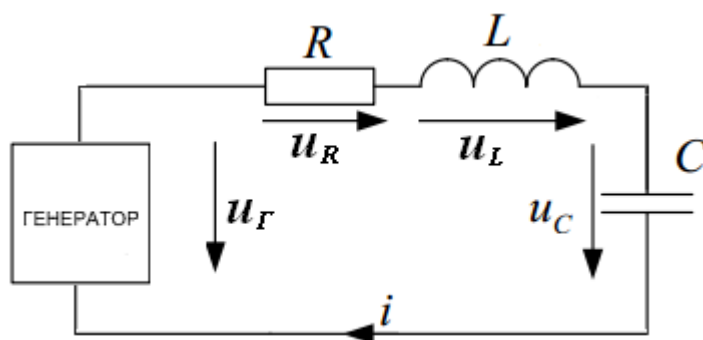


Рисунок 11.2 – Схем замещения исследуемой цепи

Таблица 11.1 – Исходные данные

№ бригады	$R$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$f_{\text{зад}}$ , Гц
1	470	100	1	200
2	220	40	1	300
3	680	10	1	400
4	330	100	1	350

4.3. Нарисовать зависимости:

$$i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(3)}(t), \quad u_c(t) = i_{c(1)}(t) + i_{c(3)}(t).$$

## 5 Экспериментальная часть

5.1 Собрать схему электрической цепи, изображенную на рисунке Е.2. (приложение Е). Установить заданные в таблице Е.1 величины  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , из микроблоков резисторов и реактивных элементов. Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ, ВАТТМЕТР и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

Переключатель ФОРМА модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ (БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ) установить в положение  $\sqcap$ . Регулятором ЧАСТОТА установить частоту  $f_{\text{зад}}$  согласно таблице Е.1.

5.2 Включить осциллограф PG (рисунок Е.2). Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки. Подключить ВХОД 1 осциллографа к источнику.

Ручкой настройки горизонтальной развёртки осциллографа установить изображение сигнала на экране таким образом, чтобы полностью был виден один период колебаний. Переключателем усиления сигнала по напряжению установить максимально возможную амплитуду по площади экрана.

Регулятором АМПЛИТУДА модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕ-

ЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ установить по осциллографу величину амплитудного значения входного напряжения  $u_m = 8 \text{ В}$ .

В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.

Записать данные в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.3 Подключить ВХОД 1 осциллографа к резистору  $R$ . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости  $u_R(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .

5.4 Подключить ВХОД 1 осциллографа к конденсатору  $C$ . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости  $u_C(t)$ .

5.5 Измерить амперметром РА и вольтметром РВ БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ действующие значения напряжения  $U_C$  на конденсаторе  $C$  и тока  $I$ , а прибором ВАТТМЕТР – активную мощность  $P$ . Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.6 Переключатель ФОРМА модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ установить в положение « $\sim$ ». Рассчитать действующие значения гармонических составляющих входного напряжения.

Подключить ВХОД 1 осциллографа к источнику. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения основной гармоники входного напряжения равную

$$U_{(1)} = \frac{4U_m}{\pi}.$$

5.7 Измерить амперметром РА и вольтметром РВ БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ действующие значения напряжения  $U_C$  на конденсаторе  $C$  и тока  $i$ , а прибором ВАТТМЕТР активную мощность  $P$ . Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.8 Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ частоту  $f = 3f_{\text{зад}}$  Гц. Регулятором АМПЛИТУДА установить на экране осциллографа величину амплитудного значения третьей гармоники входного напряжения равную

$$U_{(3)} = \frac{4U_m}{3\pi}.$$

Выполнить измерения аналогичные п. 5.7. Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.9 Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ частоту  $f = 5f_{\text{зад}}$  Гц. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения пятой гармоники входного напряжения равную

$$U_{(5)} = \frac{4U_m}{5\pi}.$$

Выполнить измерения аналогичные п. 5.7. Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.10 Рассчитать по полученным измерениям в п.п. 5.6-5.9 действующие значения тока в цепи, напряжений на выходе генератора и на ёмкости, а также активную мощность по формулам (11.3), (11.4). Полученные результаты занести в таблицу Е.3 протокола испытаний и сравнить их с рассчитанными в п. 4.2 значениями.

5.11 Рассчитать значения коэффициентов искажения  $k_{ucI}$ ,  $k_{ucU}$  по выражению (11.9) и коэффициент амплитуды  $k_{aU}$  по выражению (11.8).

5.12 Приложить осциллограммы сигналов к протоколу испытаний и утвердить его у преподавателя.

5.13 Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ, а также тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ, БЛОКА ВАТТМЕТР и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Выключить осциллограф.

## **6 Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, выводы по лабораторной работе.

## **7 Контрольные вопросы**

1 Что называется действующим значением несинусоидальной периодической величины?

2 Какая особенность ряда Фурье для периодических кривых симметричных относительно оси абсцисс?

3 Изложите порядок расчета линейных цепей при несинусоидальных напряжениях и токах.

4 Какими коэффициентами характеризуется форма периодической несинусоидальной кривой?

5 В каком случае периодическая несинусоидальная кривая не будет содержать постоянной составляющей?

6 Почему формы кривых напряжений на различных участках цепи несинусоидального периодического тока отличаются друг от друга?

7 Как определить частоту периодического напряжения по его осциллограмме?

## Лабораторная работа № 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

#### 1 Цели работы

1 Экспериментальное подтверждение свойств и режимных параметров линейных цепей при наличии в них переходных процессов.

2 Овладение экспериментальными методами исследования параметров цепей на характер протекания в них переходных процессов.

#### 2 Основные положения теории

*Переходным процессом* называется переход одного режима работы электрической цепи к другому. Например, включение или выключение лампочки. В общем случае в электротехнике принято, что возникновение переходного процесса связано с явлением коммутации. Принимается допущение, что коммутация начинается в момент времени  $t = 0$  и совершается мгновенно:  $\Delta t_K = 0$ . При этом различают два момента времени: момент времени непосредственно предшествующий коммутации  $t(-0)$ , или  $t(0-)$  и момент времени непосредственно после коммутации  $t(0+)$ , или  $t(+0)$ . Предположение  $\Delta t_K = 0$  приводит к законам коммутации.

В момент коммутации ток в ветви с индуктивностью не изменяется, т. е.

$$i_L(+0) = i_L(-0) = i_L(0).$$

Напряжение на емкости в момент коммутации не изменяется, т. е.

$$u_C(+0) = u_C(-0) = u_C(0).$$

Значения  $u_C(0)$  и  $i_L(0)$  называются независимыми начальными условиями. Для идеальных элементов  $R$ ,  $C$  ток в момент коммутации может меняться скачком, т.е.

$$i_R(+0) \neq i_R(-0); \quad i_C(+0) \neq i_C(-0).$$

Для идеальных элементов  $R$  и  $L$  в момент коммутации скачком могут меняться напряжения, т.е.

$$u_R(+0) \neq u_R(-0); \quad u_L(+0) \neq u_L(-0).$$

Значения  $i_R(+0)$ ;  $i_C(+0)$ ;  $u_R(+0)$ ;  $u_L(+0)$  называются зависимыми начальными условиями.

В переходном процесса мгновенные значения напряжений и токов не являются периодическими функциями времени. Если положительные направления напряжения и тока на элементе одинаковы, то уравнения идеальных элементов имеют вид:

$$u_R(t) = Ri_R(t), \quad u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}, \quad i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}.$$

Переходный процесс в цепи с одним реактивным элементом и источни-

ком постоянного напряжения (тока) описывают линейным неоднородным ( $F \neq 0$ ) дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dx(t)}{dt} + ax(t) = bF.$$

В этом уравнение  $x(t) = u_C(t)$  для  $R$ - $C$  цепи,  $x(t) = i_L(t)$  для  $R$ - $L$  цепи.  $F$  – постоянная, зависящая от величин напряжения или тока источников,  $a$  и  $b$  не зависящие от времени коэффициенты.

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$x(t) = x_{CB}(t) + X_{ПР}.$$

Свободная составляющая решения  $x_{CB}(t)$  определяется как общее решение однородного дифференциального уравнения.

$$\frac{dx_{CB}(t)}{dt} + ax_{CB}(t) = 0$$

и имеет вид:

$$x_{CB}(t) = Ae^{pt},$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p = -a$  – корень характеристического уравнения  $p + a = 0$ .

Величина  $\tau = 1/|p|$  имеет размерность времени и называется *постоянной времени*. За интервал времени  $\Delta t = \tau$  свободная составляющая решения уменьшается в  $e$  раз. Выражение

$$x_{CB}(t) = Ae^{-t/\tau}$$

позволяет оценить длительность  $T_{ПП}$  переходного процесса. Можно принять  $T_{ПП}$  от  $4\tau$  до  $5\tau$ .

Величина  $X_{ПР}$  является частным решением уравнения

$$\frac{dX_{ПР}}{dt} + aX_{ПР} = bF.$$

Величина  $X_{ПР} = \frac{b}{a}F$  не зависит от времени и может быть рассчитана в установившемся режиме после коммутации. Общее решение приобретает вид  $x(t) = u_C(t)$ . Постоянная интегрирования  $A$  определяется из независимых начальных условий. При  $t = 0$

$$A + X_{ПР} = x(0) \text{ и } A = x(0) - X_{ПР}.$$

### 3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных резистора и индуктивности или резистора и конденсатора, подключенная к источнику постоянного напряжения.

В лабораторной работе источником напряжения является модуль ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Для наблюдения зависимостей от времени используют осциллограф. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из миниблоков резисторов и реактивных элементов. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

**Важно!** В работе используются электролитические конденсаторы, поэтому при сборке схемы следует обратить внимание на полярность «+» конденсатора.

Электронный осциллограф позволяет наблюдать периодические процессы. Поэтому в работе исследуется переходный процесс при включении цепи на напряжение в форме однополярных импульсов прямоугольной формы (рисунок 12.1). Если интервал времени  $0,5T = T_{III}$  и принять  $T_{III} = 5\tau$ , то частота следования импульсов

$$f = 1/T = 1/10\tau. \quad (12.1)$$

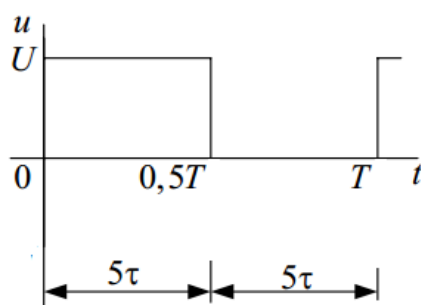


Рисунок 12.1 – Вид напряжения на выходе источника

#### 4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 12.2, рассчитать классическим методом в переходном режиме ток, протекающий в схеме и напряжение на реактивном элементе. Параметры цепи представлены в таблице 12.1.

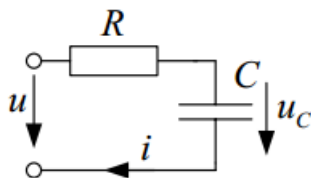


Рисунок 12.2 – Схема замещения исследуемой цепи

4.2 Построить графики переходных процессов рассчитанных тока и напряжения.

Таблица 12.1

№ бригады	$R$ , Ом	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом
1	330	1	10	17,3	10
2	4700	0,1	40	72,8	10
3	33	10	100	180	10
4	470	1	40	72,8	10

4.3 Рассчитать постоянную времени цепи  $\tau_{RC} = RC$  и частоту следования знакопеременных импульсов по выражению (12.1).

4.4 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 12.3, рассчитать классическим методом в переходном режиме ток, протекающий в схеме и напряжение на реактивном элементе. Параметры цепи представлены в таблице 12.1.

4.5 Построить графики переходных процессов рассчитанных тока и напряжения.

4.6 Рассчитать постоянную времени цепи

$$\tau_{RL} = \frac{L}{(R_1 + R_2)},$$

а также частоту следования знакопеременных импульсов по формуле (12.1).

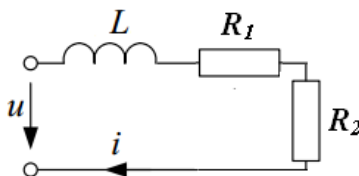


Рисунок 12.3 – Схема замещения исследуемой цепи

## 5 Экспериментальная часть

### 5.1 Исследование электрической цепи с R-C элементами

5.1.1 Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке Ж.5 протокола испытаний (приложение Ж). Подключить к выходу модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ цепь R-C.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Установить заданные по таблице Ж.1 параметры элементов.

5.1.4 Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Переключатель ФОРМА включить в положение «Л». Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ частоту  $f$ , рассчитанную в п. 4.3. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения напряжения  $U_m = 5$  В.



5.1.5 Включить осциллограф. Настроить линию нуля. Ручку регулятора вертикальной развертки повернуть по ходу часовой стрелки до упора.

5.1.6 Подключить ВХОД 1 осциллографа к источнику. Настроить переключатель усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб  $m_U$  на переключателе усиления по напряжению убедиться, что амплитуда входного напряжения  $U_m = 5$  В. В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.

5.1.7 Подключить ВХОД 1 осциллографа к конденсатору  $C$ . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости  $u_C(t)$ . На рисунке указать выбранный масштаб  $m_U$ .

## 5.2 Исследование электрической цепи с $R$ - $L$ элементами

5.2.1 Подключить к выходу модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ цепь  $R$ - $L$ . Измерить мультиметром сопротивление  $R_K$  катушки. Резистор  $R_{ин} = 10$  Ом взять из миниблоков резисторов.

5.2.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.2.3 Установить заданные в таблице Ж.1 параметры элементов.

5.2.4 Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ частоту, рассчитанную в п. 4.6. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения напряжения  $U_m = 5$  В.

5.2.5 Подключить ВХОД 1 осциллографа к резистору  $R_{ин}$ . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости  $u_{ин}(t)$ . На рисунке указать масштаб  $m_U$ .

5.2.6 Приложить осциллограммы сигналов к протоколу испытаний.

5.2.7 Согласовать с преподавателем полученные результаты и утвердить протокол к лабораторной работе.

5.2.8 Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА МОДУЛЬ ПИТАНИЯ, тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и осциллограф.

## 6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, осциллограммы с указанием выбранных масштабов по осям координат, выводы по лабораторной работе.

## 7 Контрольные вопросы

1 Как составить характеристическое уравнение для заданной цепи?

2 Какова теоретически и практически продолжительность переходных процессов в электрических цепях ?

3 Как формулируется закон коммутации для индуктивности, для ёмкости?

4 Может ли скачкообразно изменяться напряжение на индуктивности? Обоснуйте теоретически свой ответ.

6.5 Как определяется постоянная времени цепи расчётным и экспериментальным путём?

6 Как определяются зависимые начальные условия ?

7 Как определить принужденные величины ?

8 Почему свободный процесс является затухающим?

9 Какие цепи называют цепями первого порядка?

Приложение А  
Форма титульного листа к лабораторной работе № \_\_\_\_

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Группа\_\_\_\_\_

Подгруппа № \_\_\_\_\_

## ДОПУСК К РАБОТЕ

Допуск	Дата	Подпись преподавателя

# ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №

(Название работы)

Работа выполнена «    »            201    
число                      месяц                      год

\_\_\_\_\_  
Подпись и фамилия преподавателя

## ЗАЩИТА РАБОТЫ

Оценка	Дата	Подпись преподавателя

Тула 201

Приложение Б  
Лабораторная работа № 7

Цель работы: \_\_\_\_\_

**Этап Б.1 – Расчётно-графическая часть**

Таблица Б.1 – Исходные данные для исследования

$U_\phi$ , В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом

Напряжения источника:  $U_{AN} = \underline{\hspace{1cm}}$  В;  $U_{BN} = \underline{\hspace{1cm}}$  В;  $U_{CN} = \underline{\hspace{1cm}}$  В.

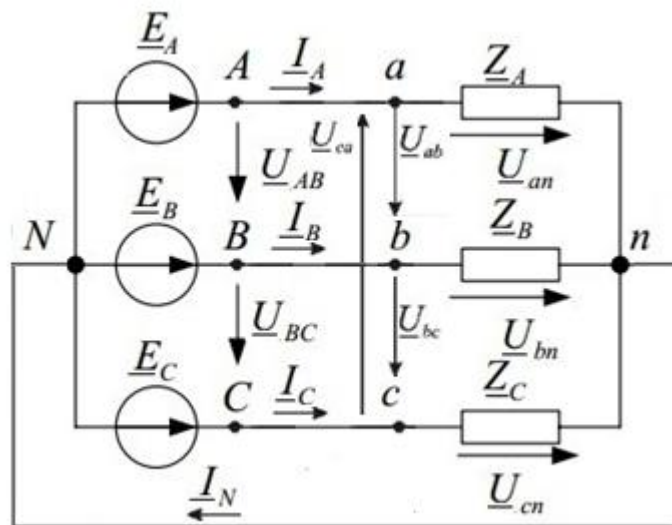


Рисунок Б.1 – Схема замещения исследуемой цепи

**Б.1.1 Исследование симметричного режима**

Расчёт токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_N$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_\Sigma$ :

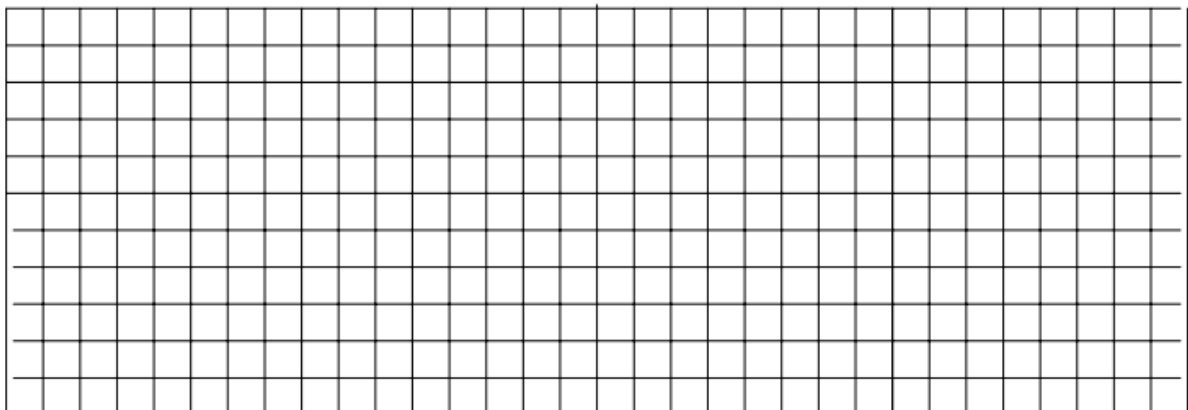


Рисунок Б.2 – Векторная диаграмма симметричного режима

### Б.1.2 Исследование режима работы при обрыве фазы «А»

Расчёт токов  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$ ,  $\underline{I}_N$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_\Sigma$ :

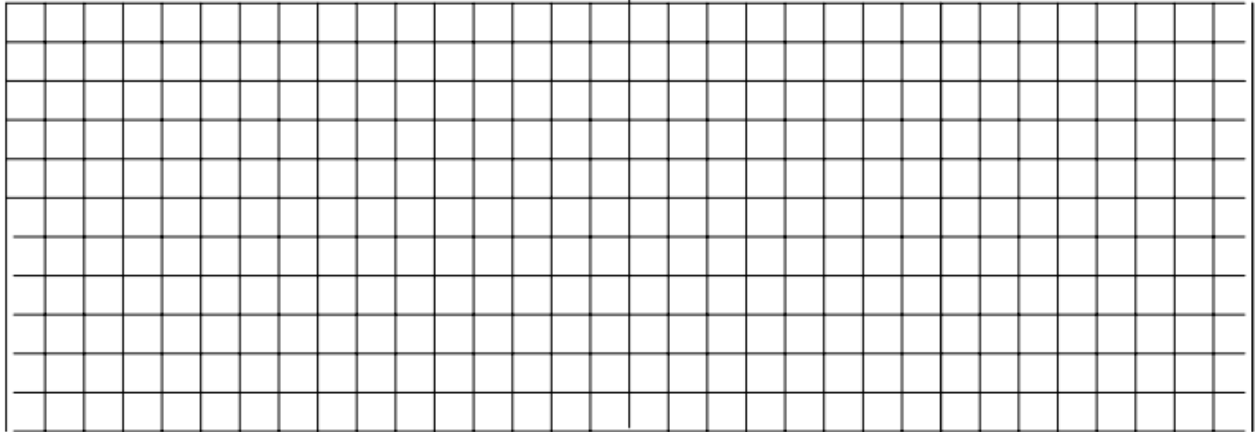


Рисунок Б.3 – Векторная диаграмма при обрыве фазы «А»

### Б.1.3 Исследование режима работы без нейтрального провода

Расчёт токов  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$ ,  $\underline{I}_N$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_\Sigma$ :

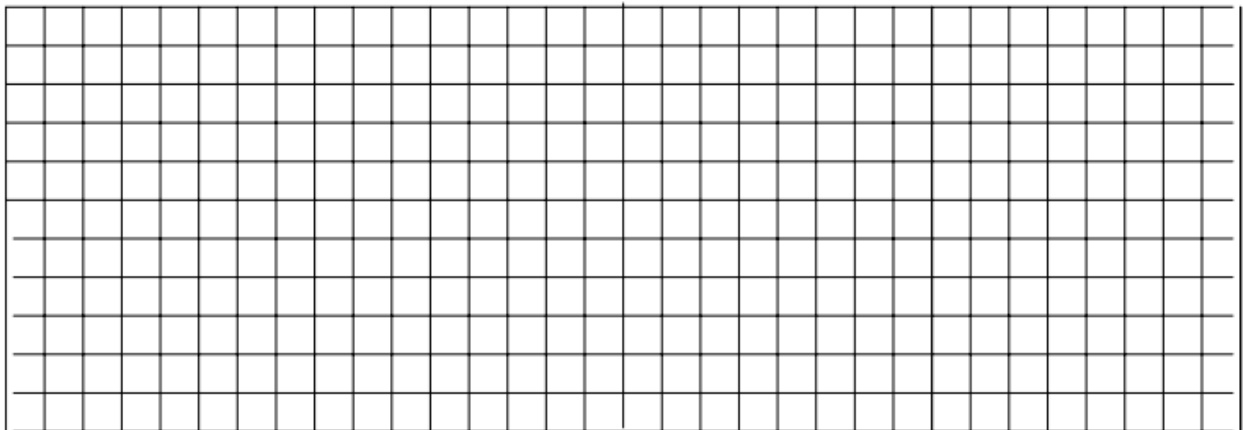


Рисунок Б.4 – Векторная диаграмма симметричной нагрузки без нейтрали

### Б.1.4 Исследование несимметричного режима работы с нейтральным проводом

Расчёт токов  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$ ,  $\underline{I}_N$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_{\Sigma}$ :

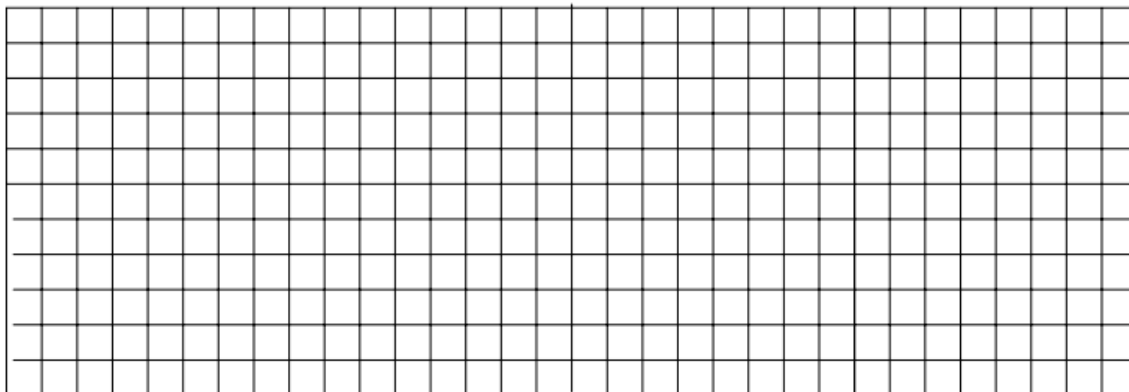


Рисунок Б.5 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки с нейтралью

### Б.1.5 Исследование несимметричного режима без нейтрального провода

Расчёт напряжения смещения нейтрали  $\underline{U}_N$ :

Расчёт токов в цепи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_{\Sigma}$ :

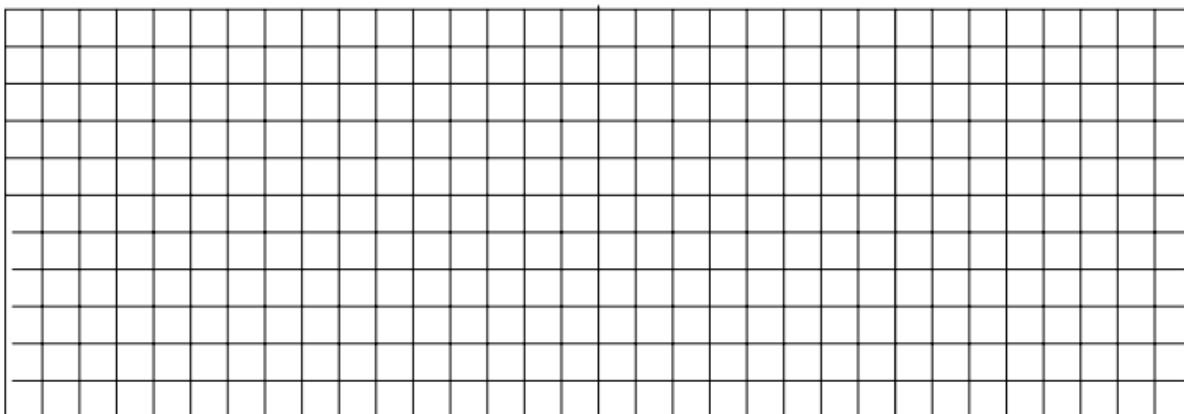


Рисунок Б.6 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки без нейтрали

### Б.1.6 Исследование несимметричного режима при обрыве фазы «А»

Расчёт напряжения смещения нейтрали  $\underline{U}_N$ :

Расчёт токов в цепи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_\Sigma$ :

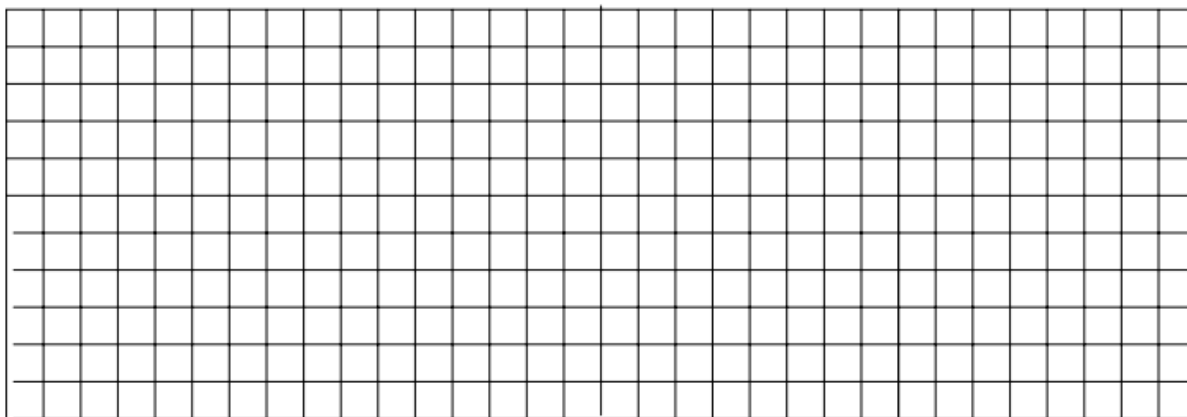


Рисунок Б.7 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки при обрыве фазы «А»

### **Б.1.7 Исследование несимметричного режима при КЗ**

Расчёт напряжения смещения нейтрали  $\underline{U}_{Nn} = \underline{U}_A$ :

Расчёт токов в цепи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ :

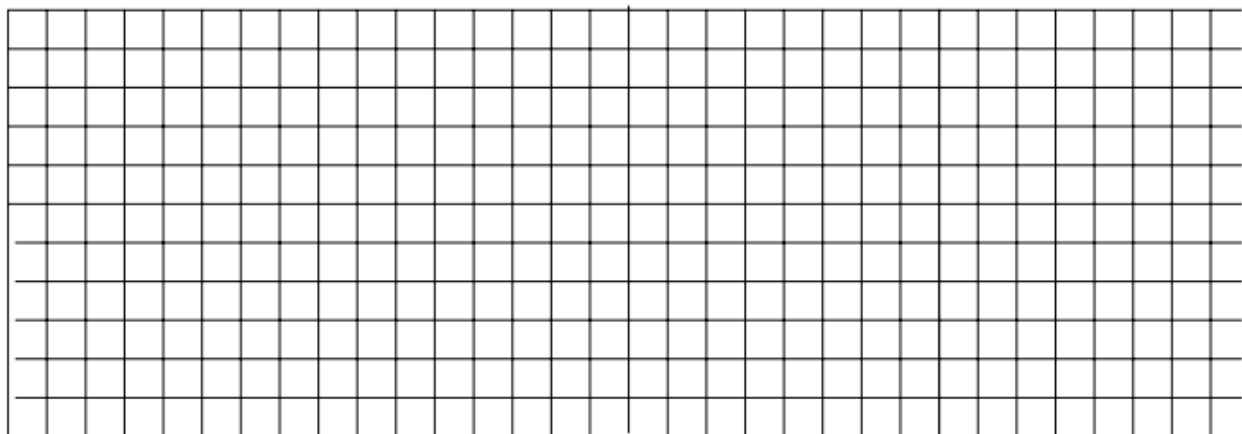


Рисунок Б.8 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки при КЗ фазы «А» ( $\underline{Z}_A = 0$ )

## Этап Б.2 – Экспериментальная часть

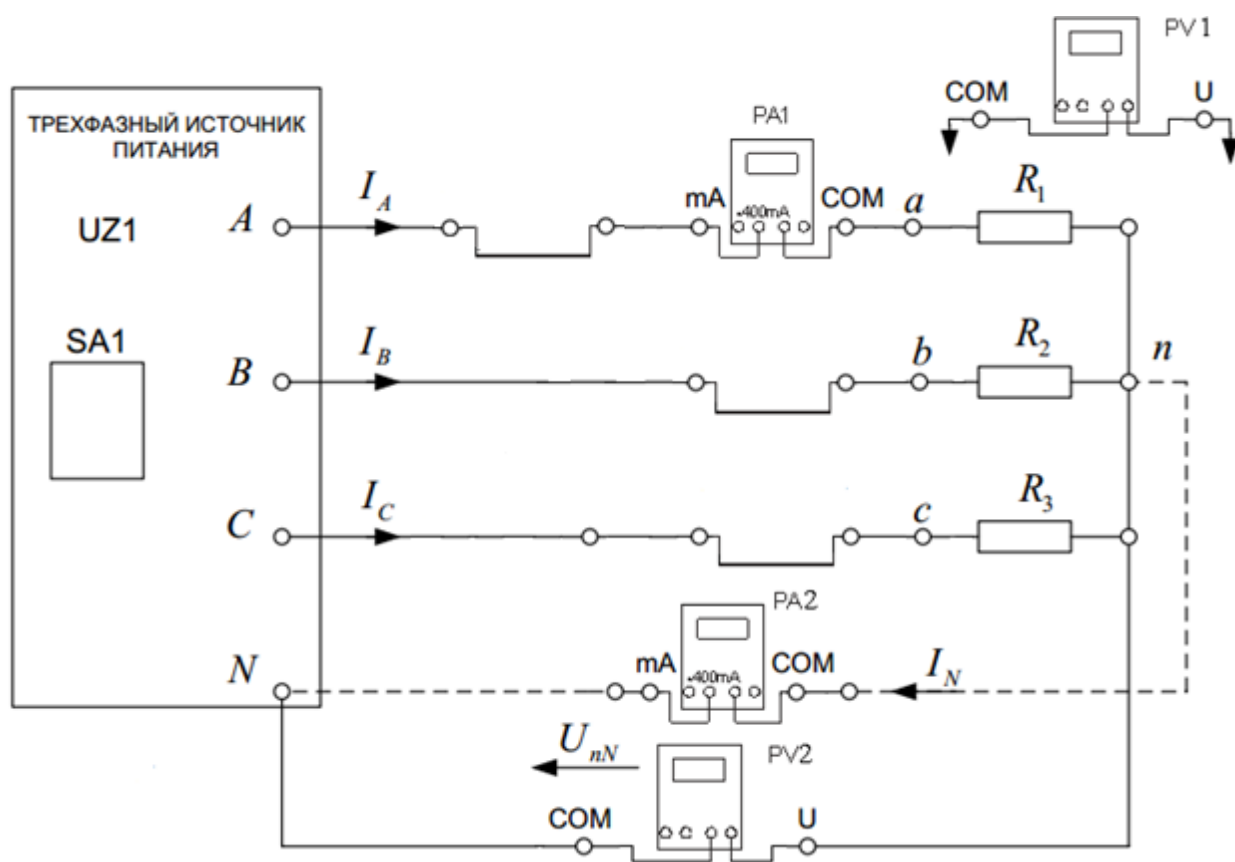


Рисунок Б.9 – Монтажная схема исследуемой электроцепи



Таблица Б.2 – Результаты исследования симметричного режима

[illegible]

Таблица Б.3 – Результаты исследования несимметричного режима

[illegible]

## Приложение В Лабораторная работа № 8

Цель работы: \_\_\_\_\_

### Этап В.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица В.1 – Исходные данные для исследования

$U_\phi$ , В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом	$R_A=R_1$ , Ом	$R_B=R_2$ , Ом	$R_C=R_3$ , Ом

Напряжения источника:  $\underline{U}_{AB} = \underline{\hspace{1cm}}$  В;  $\underline{U}_{BC} = \underline{\hspace{1cm}}$  В;  $\underline{U}_{CA} = \underline{\hspace{1cm}}$  В.

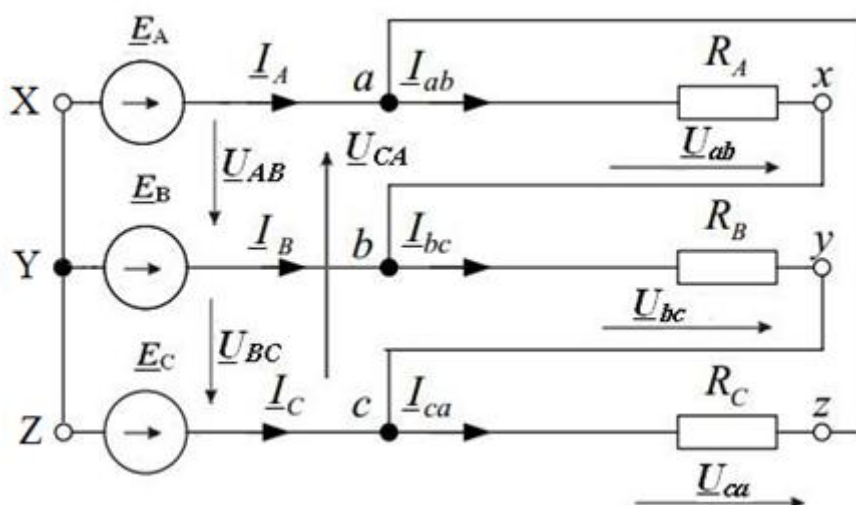


Рисунок В.1 –Схема замещения исследуемой цепи

#### В.1.1 Исследование симметричного режима

Расчёт фазных токов  $\underline{I}_{ab}$ ,  $\underline{I}_{bc}$ ,  $\underline{I}_{ca}$ :

Расчёт линейных токов  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$ :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи  $P_\Sigma$ :

#### В.1.2 Исследование режима работы при обрыве фазного провода $ab$

Расчёт фазных токов  $\underline{I}_{ab}$ ,  $\underline{I}_{bc}$ ,  $\underline{I}_{ca}$ :

Расчёт линейных токов  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ :

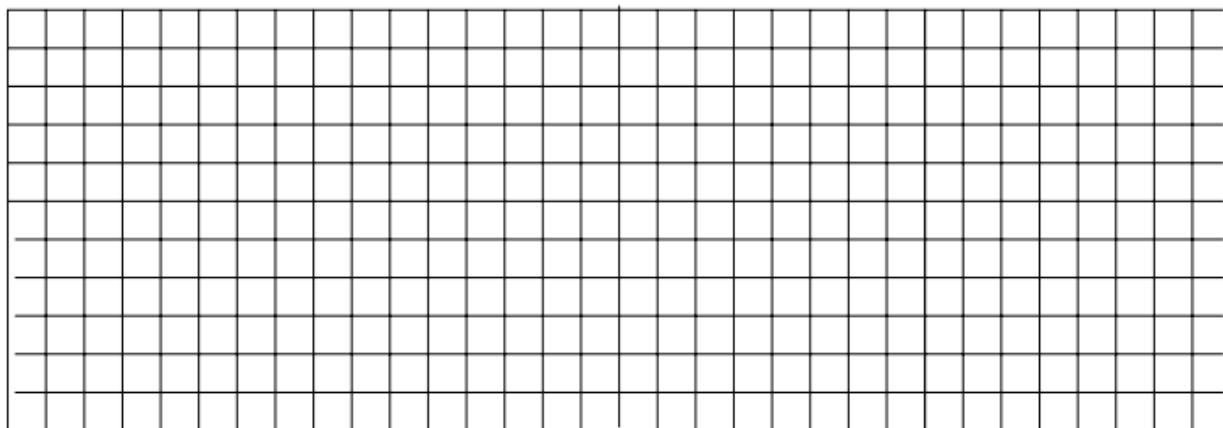


Рисунок В.2 – Векторные диаграммы симметричного режима

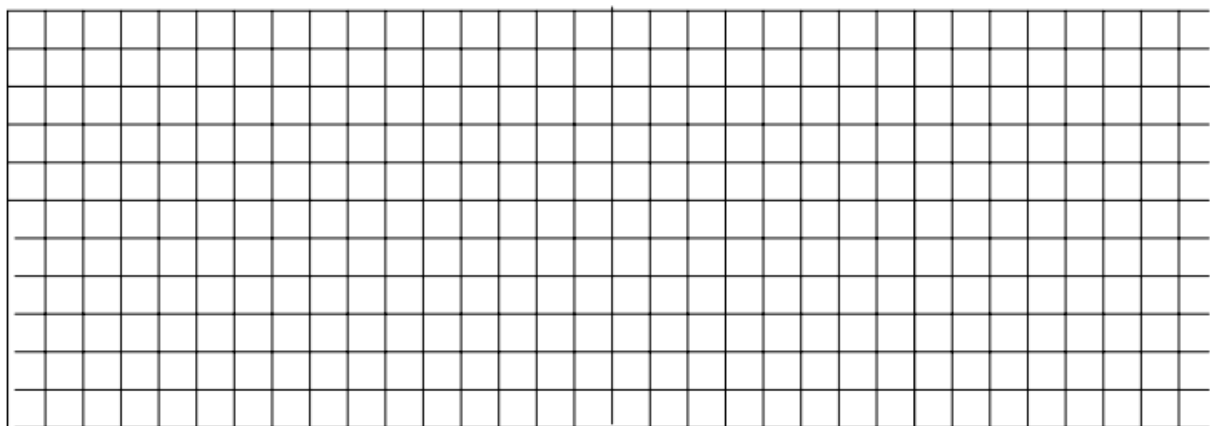


Рисунок В.3 – Векторные диаграммы при обрыве фазного провода  $ab$

### **В.1.3 Исследование режима при обрыве линейного провода $A$**

Расчёт фазных токов  $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{ca}, \underline{I}_{bc}$ :

Расчёт линейных токов  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ :

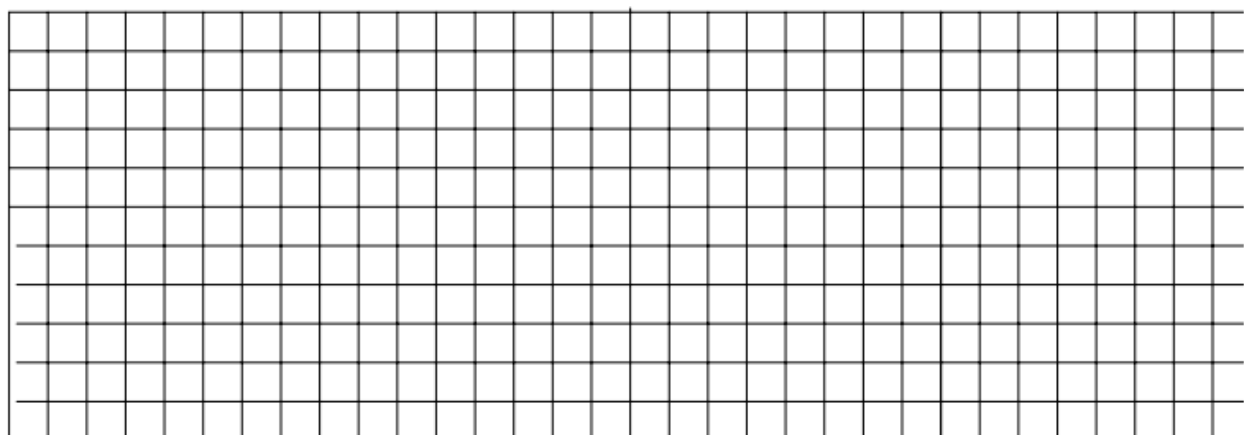


Рисунок В.4 – Векторные диаграммы при обрыве линейного провода  $A$

### В.1.4 Исследование несимметричного режима

Расчёт фазных токов  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ :

Расчёт линейных токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ :

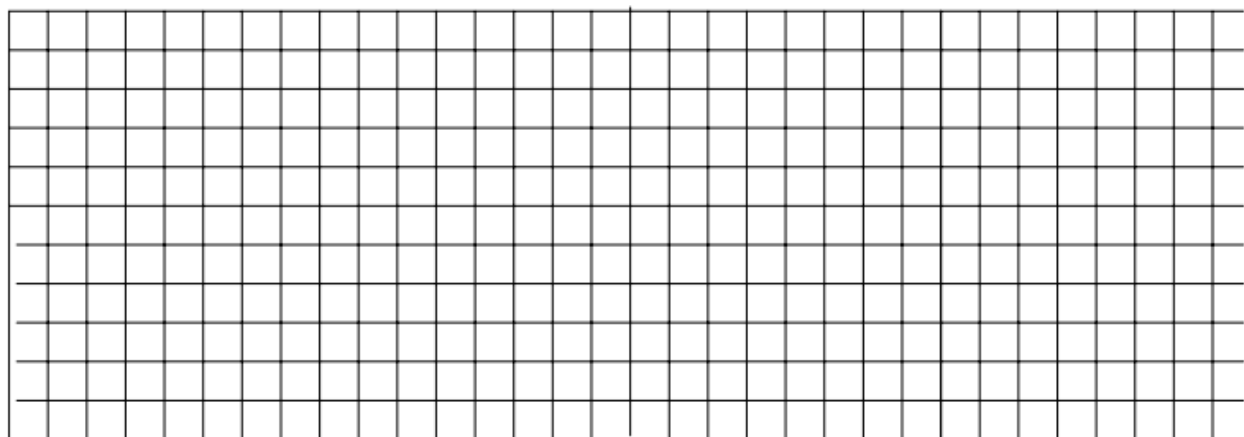


Рисунок В.5 – Векторные диаграммы несимметричного режима

### Этап В.2 – Экспериментальная часть

Линейные напряжения источника  $U_{AB} = \underline{\hspace{1cm}}$  В;  $U_{BC} = \underline{\hspace{1cm}}$  В;  $U_{CA} = \underline{\hspace{1cm}}$  В.

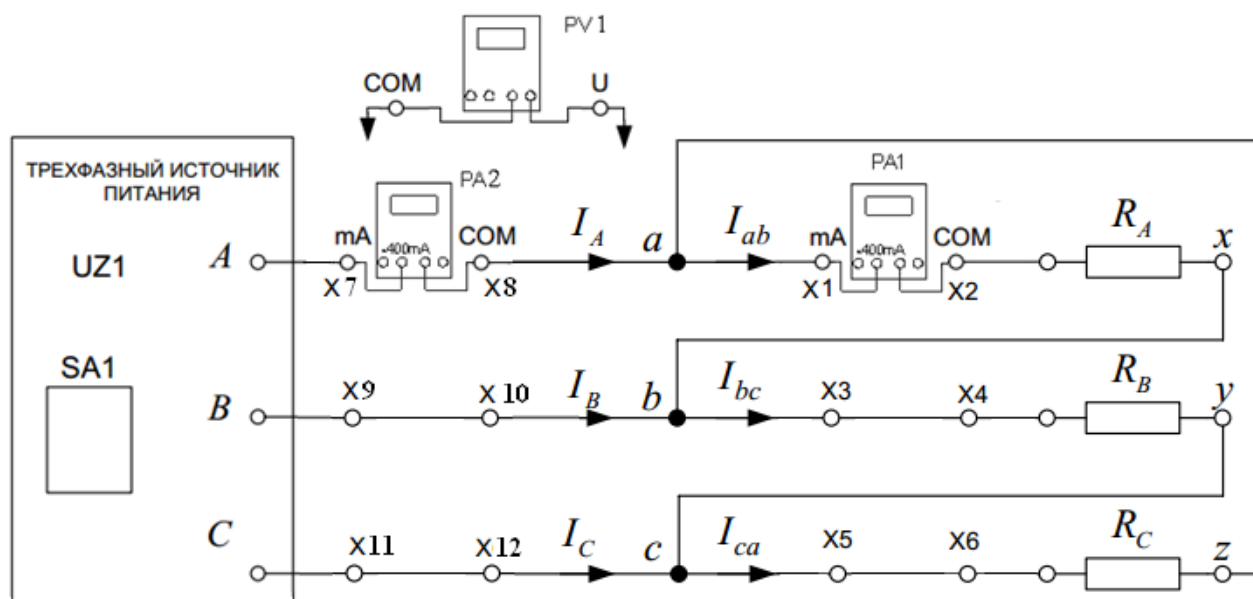


Таблица В.2 – Результаты исследований опытных режимов

[illegible]

## Приложение Г

### **Лабораторная работа № 9**

Цель работы: \_\_\_\_\_

## Этап Г.2 – Экспериментальная часть

### ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

Таблица Г.1 – Исходные данные для исследования

№ бригады	$U_{6x}$ , В

### Г.2.1 Определение ВАХ лампы накаливания

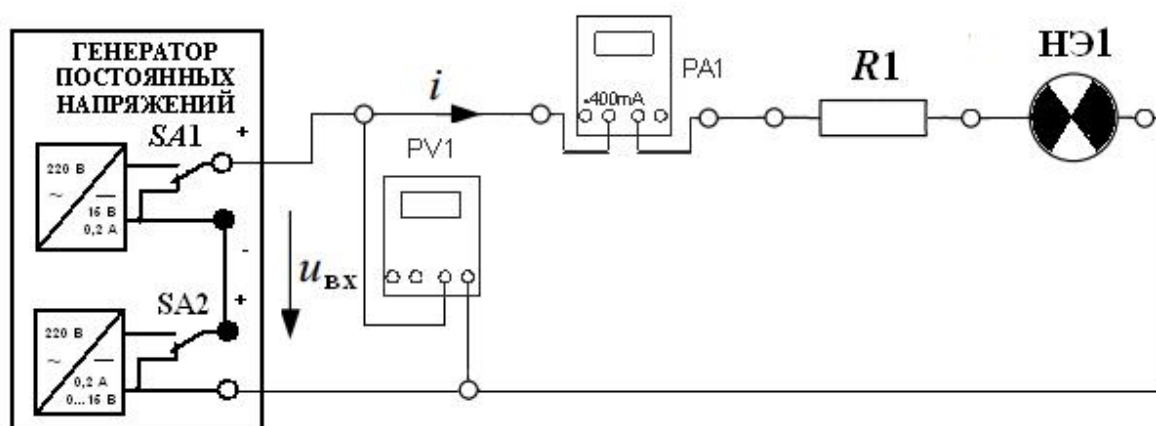


Рисунок Г.1 – Монтажная схема для определения вольтамперной характеристики лампы накаливания

Таблица Г.2 – ВАХ лампы накаливания

[illegible]

### Г.2.2 Определение ВАХ полупроводникового диода

Таблица Г.3 – ВАХ полупроводникового диода

[illegible]

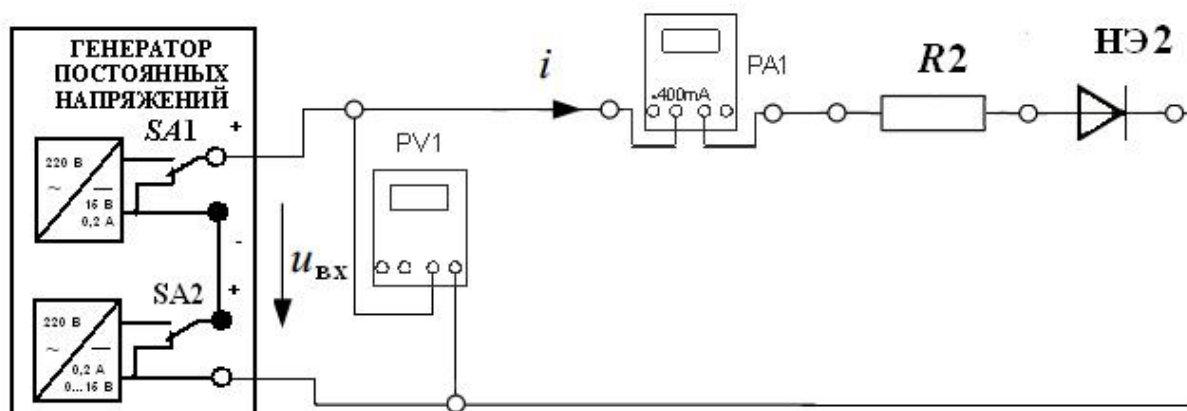


Рисунок Г.2 – Монтажная схема для определения вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Таблица Г.4 – Результаты графо-аналитического расчёта

$U_{BX}$	$U_{ac}$	$U_{cd}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$

### Г.2.3 Определение результирующей ВАХ смешанной цепи

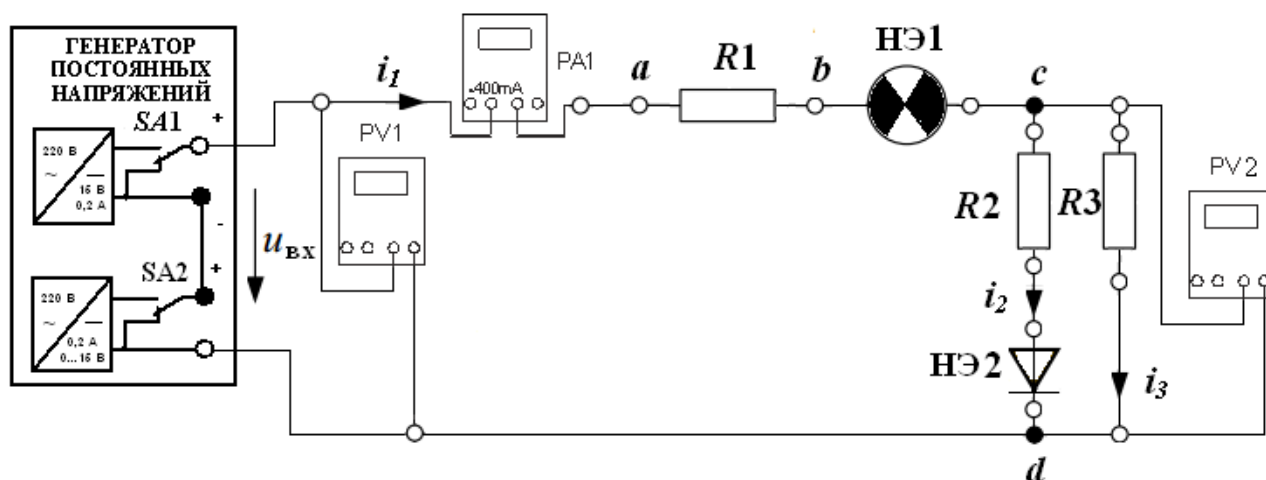


Рисунок Г.3 – Монтажная схема для исследования электрической цепи со смешанным соединением элементов

Таблица Г.5 – Результаты измерений параметров смешанной цепи( рисунок Г.3)

$U_{BX}$	$U_{ac}$	$U_{cd}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$

## Г.2.4 Определение ВАХ параметрического стабилизатора напряжения

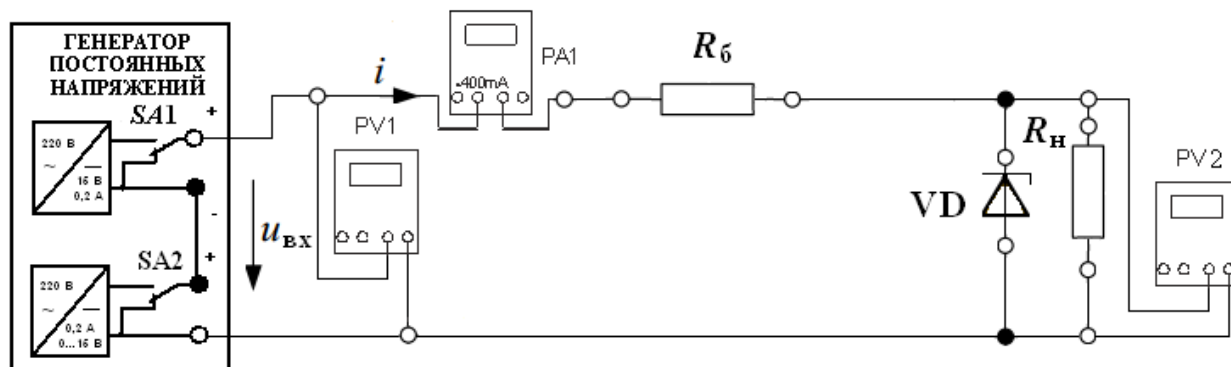


Рисунок Г.4 – Монтажная схема для исследования параметрического стабилизатора напряжения

Таблица Г.6 – Результаты измерений параметров параметрического стабилизатора напряжений при  $R_H = \infty$

$U_{\text{BX}}, \text{ В}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$															
$I, \text{ мА}$															
$U_{\text{BX}}, \text{ В}$	15	16	17	18	19	20									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$															
$I, \text{ мА}$															

Таблица Г.7 – Результаты измерений параметров параметрического стабилизатора напряжений при  $R_H = 1$  кОм

$U_{\text{BX}}, \text{B}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{B}$															
$I, \text{mA}$															
$U_{\text{BX}}, \text{B}$	15	16	17	18	19	20									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{B}$															
$I, \text{mA}$															



Приложение Д  
Лабораторная работа № 10

Цель работы: \_\_\_\_\_

**Этап Д.1 – Расчётно-графическая часть**

Таблица Д.1 – Исходные данные для расчётов

№ бригады	$R$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$f$ , кГц	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , кОм

**Д.1.1 Исследование Т-образного четырёхполюсника**

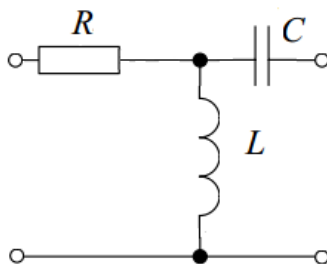


Рисунок Д.1 – Т-образный четырёхполюсник

Предварительный расчёт коэффициентов Т-образного 4-полюсника:

$\underline{A} =$

$\underline{B} =$

$\underline{C} =$

$\underline{D} =$

Проверка правильность расчёта:  $\underline{AD} - \underline{BC} =$

Определение сопротивлений холостого хода и короткого замыкания со стороны первичных и вторичных зажимов четырёхполюсника:

$\underline{Z}_{1XX} =$

$\underline{Z}_{1KЗ} =$

$\underline{Z}_{2XX} =$

$\underline{Z}_{2KЗ} =$

Проверка правильность расчёта:

$$\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX}} = \frac{\underline{Z}_{1KЗ}}{\underline{Z}_{2KЗ}} =$$

**Д.1.2 Исследование П-образного четырёхполюсника**

Предварительный расчёт коэффициентов П-образного 4-полюсника:

$\underline{A} =$

$\underline{B} =$

$\underline{C} =$

$\underline{D} =$

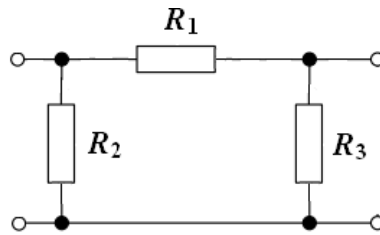


Рисунок Д.2 – П-образный 4-полюсник

Определение характеристического сопротивления и коэффициента передачи четырехполюсника

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}},$$

$$g = \ln(\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}})$$

### Этап Д.2 – Экспериментальная часть ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

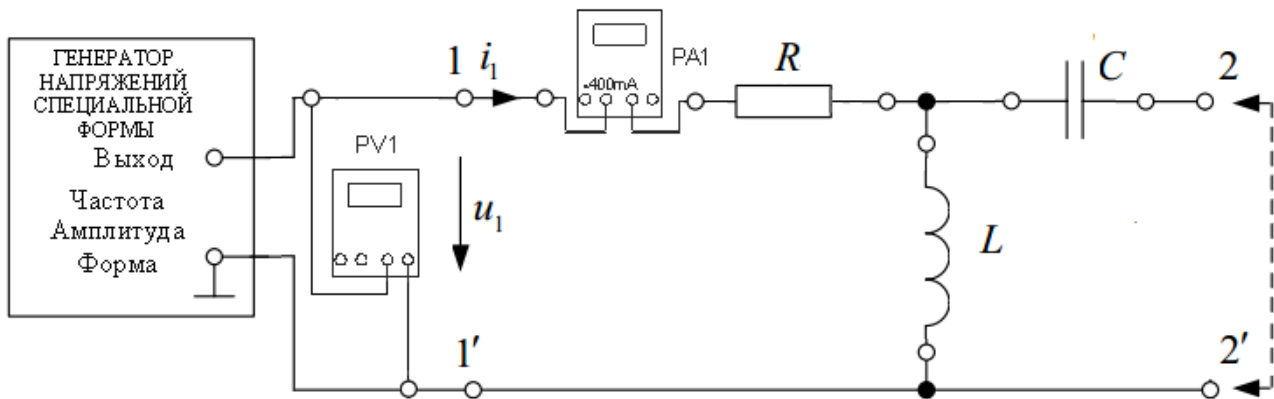


Рисунок Д.3 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Д.2

Опытные данные при $U_1=$ В и $f=$ Гц				Расчётные данные	
Режим		$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$Z, \text{Ом}$	$Z, \text{Ом}$
Прямое включение	ХХ				
	КЗ				
Обратное включение	ХХ				
	КЗ				
Примечание: индексы ХХ – обозначают режим холостого хода, КЗ – режим короткого замыкания					

Расчёт комплексных сопротивлений:

$$Z_{1XX} =$$

$$Z_{2XX} =$$

$$Z_{1K3} =$$

$$Z_{2K3} =$$

Проверка соотношений:

$$\frac{Z_{1XX}}{Z_{2XX}} = \frac{Z_{1K3}}{Z_{2K3}} =$$

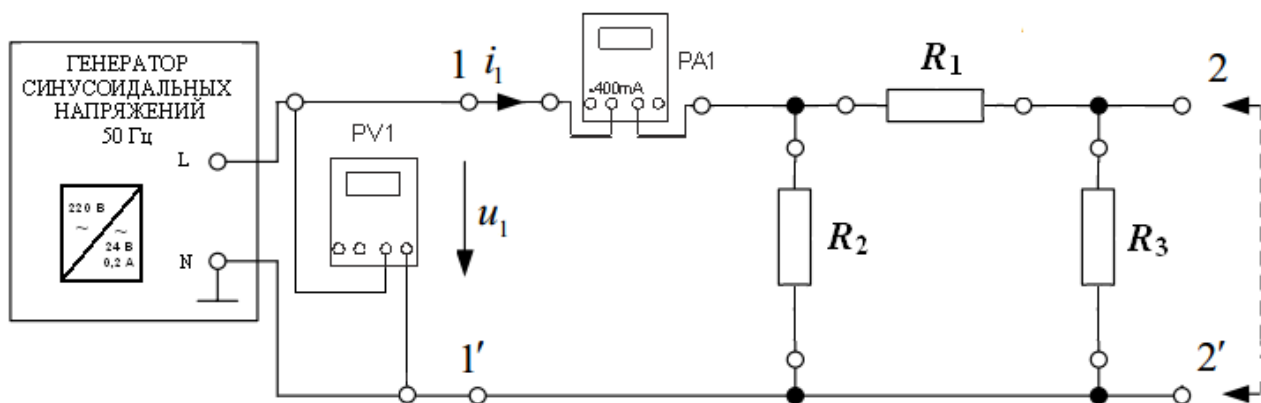


Рисунок Д.4 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Д.3

Расчётные данные					
$A$	$B$ , Ом	$C$ , См	$D$	$Z_C$	$g$

Таблица Д.4

Режим		$U$ , В	$I$ , А	$Z$ , Ом	$A$	$B$ , Ом	$C$ , См	$D$
Прямое включение	ХХ							
	КЗ							
Обратное включение	ХХ							
	КЗ							

Расчёт комплексных сопротивлений из протокола измерений:

$$Z_{1XX} =$$

$$Z_{2XX} =$$

$$Z_{1K3} =$$

$$Z_{2K3} =$$

Определение коэффициентов  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  для П-образного четырёхполюсника:

$$\underline{A} =$$

$$\underline{B} =$$

$$\underline{C} =$$

$$\underline{D} =$$

Таблица Д.5

Опытные данные при $U_1=$ В, $Z_C=$ Ом						
Режим		$U_{BX},$ В	$I_{BX},$ А	$Z_{BX}=U_{BX}/I_{BX},$ Ом	$U_{ВЫХ},$ В	$g=\ln(U_{BX}/U_{ВЫХ})$
Прямое включение						
Обратное включение						

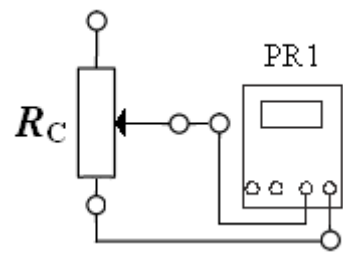


Рисунок Д.5 – Схема подключение мультиметра для определения сопротивления

Приложение Е  
Лабораторная работа № 11

Цель работы: \_\_\_\_\_

**Этап Е.1 – Расчётно-графическая часть**

Таблица Е.1 – Исходные данные для исследования

№ бригады	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	f, Гц

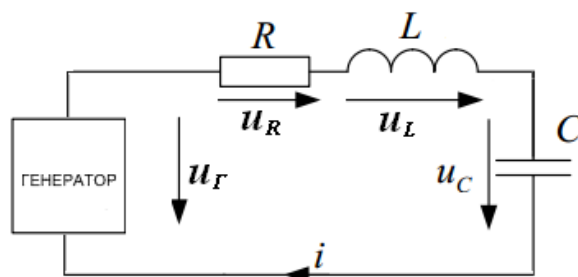


Рисунок Е.1 – Схема замещения исследуемой цепи

**Расчёт цепи комплексным методом:**

Расчёт на 1-й гармонике:

- комплексная амплитуда

$$\underline{U}_{m(1)} =$$

- реактивное сопротивление цепи

$$j(x_{L(1)} - x_{C(1)}) =$$

- комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\Sigma(1)} =$$

- комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_{m(1)} = \frac{\underline{U}_{m(1)}}{\underline{Z}_{\Sigma 1}} =$$

- действующее значение тока

$$I_{(1)} = \frac{I_{m(1)}}{\sqrt{2}} =$$

- комплексная амплитуда напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{mC(1)} =$$

- действующее значение напряжения на ёмкости  $\underline{U}_{C(1)} = \frac{\underline{U}_{mC(1)}}{\sqrt{2}} =$

- активная мощность:

$$P_{(1)} =$$

Расчёт на 3-й гармонике:

- комплексная амплитуда

$$\underline{U}_{m(3)} =$$

- реактивное сопротивление цепи

$$j(x_{L(3)} - x_{C(3)}) =$$

- комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\Sigma(3)} =$$

- комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_{m(3)} = \frac{\underline{U}_{m(3)}}{\underline{Z}_{\Sigma 3}} =$$

- действующее значение тока

$$\underline{I}_{(3)} = \frac{\underline{I}_{m(3)}}{\sqrt{2}} =$$

- комплексная амплитуда напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{mC(3)} =$$

- действующее значение напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{C(3)} = \frac{\underline{U}_{mC(3)}}{\sqrt{2}} =$$

- активная мощность:

$$P_{(3)} =$$

Расчёт на 5-й гармонике:

- комплексная амплитуда

$$\underline{U}_{m(5)} =$$

- реактивное сопротивление цепи

$$j(x_{L(5)} - x_{C(5)}) =$$

- комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\Sigma(5)} =$$

- комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_{m(5)} = \frac{\underline{U}_{m(5)}}{\underline{Z}_{\Sigma 5}} =$$

- действующее значение тока

$$\underline{I}_{(5)} = \frac{\underline{I}_{m(5)}}{\sqrt{2}} =$$

- комплексная амплитуда напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{mC(5)} =$$

- действующее значение напряжения на ёмкости

$$U_{C(5)} = \frac{U_{mC(5)}}{\sqrt{2}} =$$

- активная мощность:

$$P_{(5)} =$$

Действующие значения:

- ток в цепи  $I =$
- напряжение на выходе генератора  $U =$
- напряжение на конденсаторе  $U_C =$
- активная мощность  $P = P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)} =$

### Этап Е.2 – Экспериментальная часть

Амплитуды гармоник напряжения:

$$U_{m(1)} = \frac{4U_m}{\pi} = \text{_____ В}, \quad U_{m(3)} = \frac{4U_m}{3\pi} = \text{_____ В}, \quad U_{m(5)} = \frac{4U_m}{5\pi} = \text{_____ В}$$

По данным эксперимента:

- ток  $I = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2 + I_{(5)}^2} =$
- напряжение  $U_c = \sqrt{U_{C(1)}^2 + U_{C(3)}^2 + U_{C(5)}^2} =$

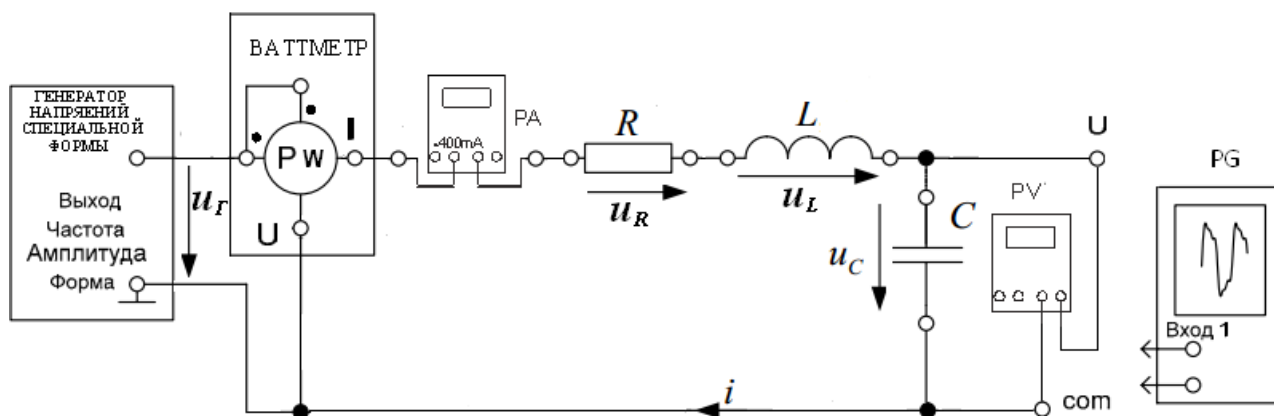


Рисунок Е.2 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Е.2

Результаты измерений	$U_{Гм},$ В	Расчёт			Опыт		
		$I,$ mA	$U_C,$ В	$P,$ Вт	$I,$ mA	$U_C,$ В	$P,$ Вт
Несинусоидальное напряжение							
Синусоидальное напряжение $U_{(1)}$							
Синусоидальное напряжение $U_{(3)}$							
Синусоидальное напряжение $U_{(5)}$							

Мощность:  $P = P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)} =$

Коэффициенты искажения:

$$k_{ucI} = \frac{I_1}{\sqrt{I_3^2 + I_5^2}} =$$

$$k_{ucU} = \frac{U_1}{\sqrt{U_3^2 + U_5^2}} =$$

Коэффициент амплитуды

$$k_{aU} = \frac{U_m}{U} = U_m / \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2}$$

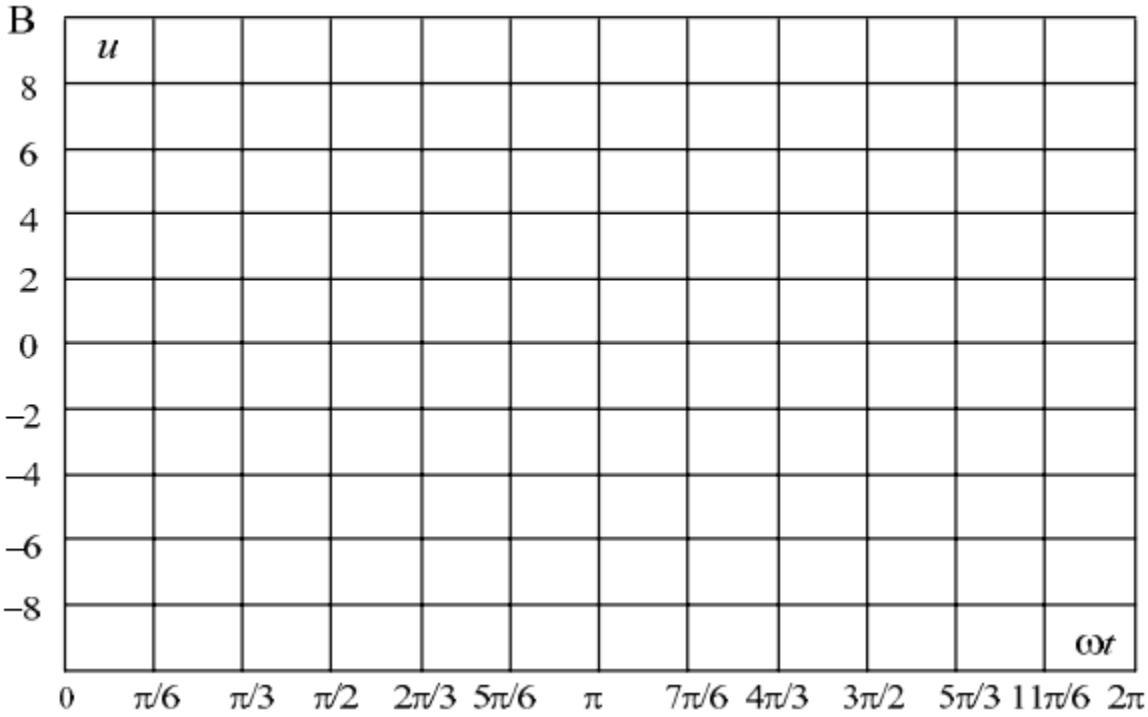


Рисунок Е.3

Таблица Е.3

Результаты расчёта				Результаты эксперимента			
$U_{Г},$ В	$I,$ мА	$U_{С},$ В	$P,$ Вт	$U_{Г},$ В	$I,$ мА	$U_{С},$ В	$P,$ Вт



Приложение Ж  
Лабораторная работа № 12

Цель работы: \_\_\_\_\_

**Этап Ж.1 – Расчётно-графическая часть**

Таблица Ж.1 – Исходные данные для исследования

№ бригады	$R$ , Ом	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом

**Ж.1.1 Исследование переходного процесса в цепи R-C элементов**

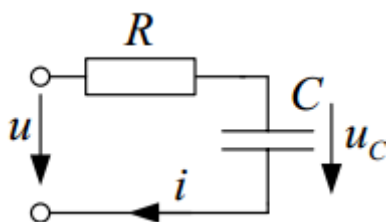


Рисунок Ж.1 – Схема замещения исследуемой цепи R-C элементов

Уравнения переходного процесса для тока, протекающего в цепи и напряжения на ёмкости, представлены ниже

Напряжение на ёмкости изменяется по закону:

$u_C(t) =$

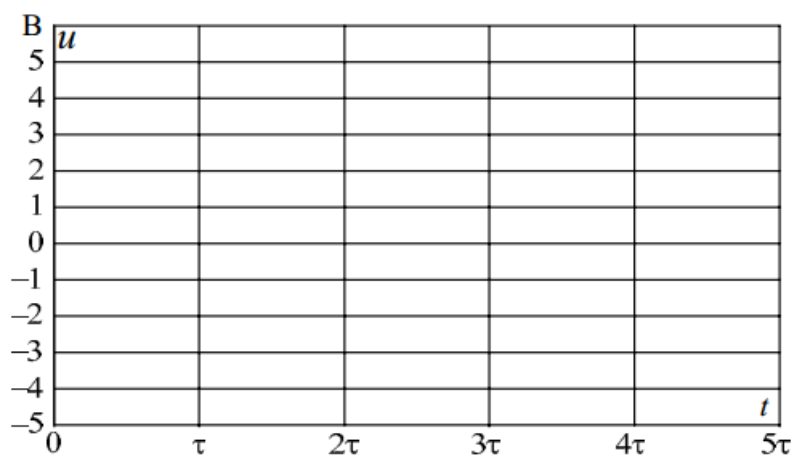


Рисунок Ж.2 – Осциллограммы напряжения  $u_C(t)$

Постоянная времени цепи  $\tau_{RC} =$

Частота следования однополярных импульсов  $f =$

## Ж.1.2 Исследование переходного процесса в цепи $R$ - $L$ элементов

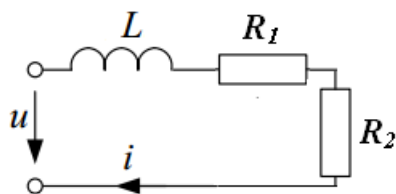


Рисунок Ж.3 – Схема замещения исследуемой цепи  $R$ - $L$  элементов

Уравнения переходного процесса для тока, протекающего в цепи и напряжения на индуктивности, представлены ниже

Ток в цепи изменяется по закону:

$$i_L(t) =$$

Постоянная времени цепи  $\tau_{RL} =$

Частота следования однополярных импульсов  $f =$

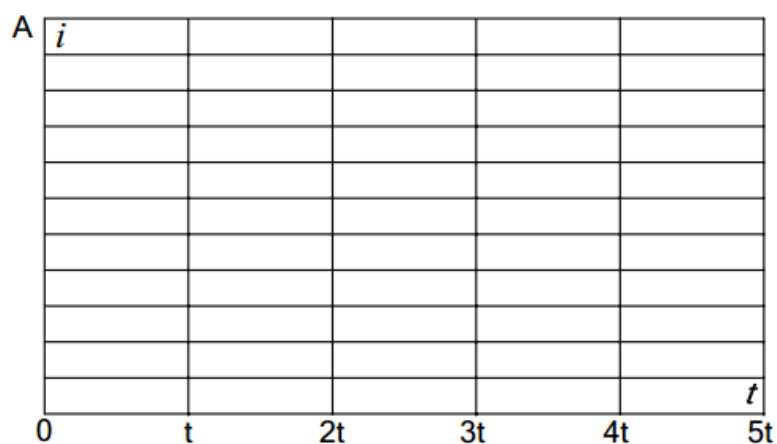


Рисунок Ж.4 – Осциллограмма тока  $i(t)$

## Этап Ж.2 – Экспериментальная часть

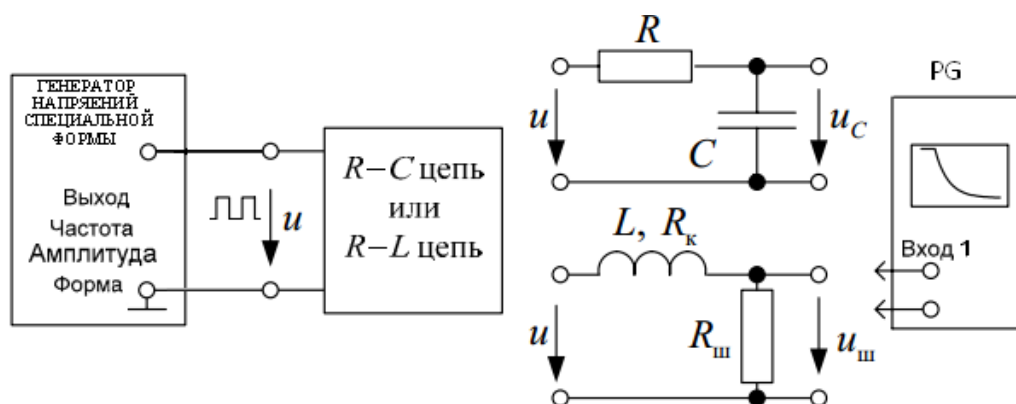


Рисунок Ж.5 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Ж.2

$t, \text{мс}$	0	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
$u_C, \text{В (расчёт)}$						
$u_C, \text{В (опыт)}$						

Таблица Ж.3

$t, \text{мс}$	0	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
$i_L, \text{А (расчёт)}$						
$i_L, \text{А (опыт)}$						

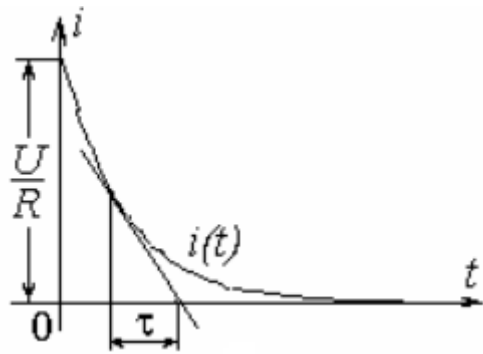


Рисунок Ж.6

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники /Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
- 2 Демирчян К.С Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 2 т. /К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин – М.; СПб.: Питер, 2009.
- 3 Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.Д. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 4 Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей: учеб. пособие для электротехнич. и радиотехнич. спец. вузов/М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М., Высшая школа, 1990. – 544 с.
- 5 Сборник задач по теоретическим основам электротехники: в 2 т. / П.А. Бутырин, Л.В. Алексейчик, С.А. Важнов и др.; под ред. чл.-корр. РАН П.А. Бутырина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Учебное издание

ШПРЕХЕР Дмитрий Маркович  
ПОЛЕВОЙ Валерий Евгеньевич  
ЧУМАКОВ Александр Виссарионович

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕ-  
ПЕЙ В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ

### Лабораторный практикум

Авторское редактирование  
Компьютерная вёрстка В.Е. Полевой

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 15.05.14.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 3,7.

Тираж 300 экз. Заказ           

Тульский государственный университет  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**Д.М. Шпрехер, В.В. Сурков, Е.Б. Колесников, В.Е. Полевой**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

**АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СХЕМЫ**

**Виртуальный лабораторный практикум**

**Тула  
Издательство ТулГУ  
2018**

УДК 621.38

**Рецензент:** Говоров А.А., д-р техн. наук, проф. каф. «Информационная безопасность» Тульского государственного университета.

Шпрехер Д.М. Электроника. Аналоговые элементы и схемы: виртуальный лабораторный практикум / Д.М. Шпрехер, В.В. Сурков, Е.Б. Колесников, В.Е. Полевой. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 170 с.

ISBN 978-5-7679-4199-5

Представлены основы теории, сведения о принципах действия и характеристиках различных аналоговых полупроводниковых приборов и электронных устройств, описания виртуальных лабораторных работ с применением программной среды Electronics Workbench, задания и методические рекомендации по их выполнению дисциплин «Электротехника и электроника», «Электротехника и основы электроники», «Электроника».

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих электронику в объёме общеобразовательной дисциплины, а также может быть полезно для инженеров, занятых схемотехническим моделированием электронных устройств с использованием программной среды Electronics Workbench.

Библиогр. 20 наим.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета  
Тульского государственного университета

ISBN 978-5-7679-4199-5

© Шпрехер Д.М., Сурков В.В.,  
Колесников Е.Б., Полевой В.Е.

© Издательство ТулГУ, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Краткое описание программного комплекса Electronics Workbench.....	6
2. Лабораторная работа № 1 Исследование работы полупроводникового диода .....	19
3. Лабораторная работа № 2 Исследование работы полупроводникового стабилитрона .....	25
4. Лабораторная работа № 3 Исследование работы биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером .....	32
5. Лабораторная работа № 4 Исследование полупроводниковых выпрямителей .....	45
6. Лабораторная работа № 5 Исследование параметрического стабилизатора напряжения .....	64
7. Лабораторная работа № 6 Исследование компенсационного стабилизатора напряжения .....	72
8. Лабораторная работа № 7 Исследование транзисторного усилителя .....	83
9. Лабораторная работа № 8 Исследование характеристик операционного усилителя .....	104
10. Лабораторная работа № 9 Исследование неинвертирующих и инвертирующих усилителей .....	114
11. Лабораторная работа № 10 Исследование типовых каскадов на операционных усилителях .....	125
12. Лабораторная работа № 11 Исследование мультивибраторов на операционных усилителях .....	137
13. Лабораторная работа № 12 Исследование цифровых схем на логических элементах.....	148
Список литературы .....	175



## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития производства требует внедрения во всех отраслях промышленности эффективных систем управления производственными и технологическими процессами, основанных на широком использовании электронной техники и пакетов программ расчёта и моделирования электронных устройств. Поэтому знание основ электроники является необходимым условием продуктивной работы специалистов различных направлений.

Основной целью виртуальных лабораторных является закрепление теоретического материала о принципах работы и характеристиках различных аналоговых полупроводниковых приборов и электронных устройств, получение практических навыков в их применении и исследовании их параметров.

### **Общие требования к подготовке, выполнению и оформлению лабораторных работ**

Прохождение лабораторного практикума включает в себя три этапа:

- 1) самостоятельная подготовка к работе;
- 2) проведение экспериментов на ПЭВМ;
- 3) обработка результатов экспериментов и оформление отчёта.

В процессе самостоятельной подготовки студенты обязаны:

а) изучить или повторить основные теоретические положения по теме, которую отражает лабораторная работа, для чего использовать конспект лекций и рекомендованные преподавателем учебные пособия. Качество своей подготовки можно оценить с помощью контрольных вопросов, приведённых в настоящих методических указаниях к каждой лабораторной работе;

б) подготовить бланки протокола исследований и расчётно-графической части отчёта, формы которых представлены в методических указаниях;

в) уяснить цель работы и изучить порядок её выполнения.

Перед началом работы преподаватель проверяет уровень подготовки студентов. Студент, не подготовленный теоретически или не имеющий подготовленных бланков, к выполнению работы не допускается.

Проведение экспериментов и исследований осуществляется фронтальным методом на ПЭВМ в составе подгрупп по 2-3 человека в соответствии с графиком, составленным преподавателем. Электрические цепи согласно схемам, приведённым в протоколах испытаний, набираются на мониторе ПЭВМ

в соответствии с используемой программой.

Применяя виртуальные измерительные приборы, следует внимательно ознакомиться с передней панелью приборов, назначением ручек, переключателей, прибегая при необходимости к помощи преподавателя.

В процессе выполнения работы протокол испытаний заполняется экспериментальными данными, снимаемыми с измерительных приборов, а также зарисовываются осциллограммы, наблюдаемые на экране виртуального осциллографа. После завершения работы, протокол испытаний предъявляется для проверки преподавателю, который своей подписью удостоверяет правильность результатов.

Обработка результатов измерений, оформление и сдача отчётов производится в лаборатории непосредственно после выполнения работы. Для этого каждый студент обязан иметь с собой на каждом занятии чертёжные принадлежности (карандаш, линейку, лекало) и микрокалькулятор. Содержание расчётно-графической части отчёта представлено в методических указаниях.

Отчёт по лабораторной работе включает в себя:

- номер и название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- протокол испытаний с подписью преподавателя;
- расчётно-графическую часть;
- краткие выводы по работе.

При оформлении отчёта необходимо выполнять требования ЕСКД.

Если студент не успел на занятии оформить отчёт до конца, то он заканчивает оформление дома с предъявлением отчёта на следующем занятии.

### **Техника безопасности**

Основные правила техники безопасности при работе с электрооборудованием изложены в инструкции по технике безопасности, с которой студенты знакомятся на вводном занятии. Кроме того, при выполнении лабораторных работ по разделу «Основы электроники» особое внимание необходимо уделять правильному обращению с ПЭВМ.

## 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ELECTRONICS WORKBENCH

Разработка современных радиоэлектронных устройств требует высокой точности и глубокого анализа. Поэтому при разработке радиоэлектронного оборудования невозможно обойтись без компьютерных методов разработки, ввиду сложности и объемности выполняемых работ.

Приложение Electronics Workbench представляет собой средство программной разработки и имитации электрических цепей. Программный комплекс может применяться как на предприятиях, занимающихся разработкой электрических цепей так и в высших учебных заведениях, занимающихся изучением и разработкой радиоэлектронных устройств.

Electronics Workbench может производить большое количество анализов радиоэлектронных устройств, занимающих достаточно много времени при стандартных методах разработки, а также включает в себя большое количество моделей радиоэлектронных устройств наиболее известных производителей.

Electronics Workbench прост в обращении и не требует глубоких знаний в компьютерной технике. Интерфейс программы можно освоить буквально за несколько часов работы.

### **Компоненты и проведение экспериментов**

В библиотеки компонентов программы входят пассивные компоненты, транзисторы, управляемые источники, управляемые ключи, индикаторы, триггерные устройства и др.

В программе используется большой набор приборов для проведения измерений: амперметр, вольтметр, мультиметр, осциллограф, Боде-плоттер (графопостроитель частотных характеристик схем), функциональный генератор, генератор слов, логический анализатор и преобразователь.

### **Операции, выполняемые при анализе**

Electronics Workbench позволяет строить схемы различной степени сложности при помощи следующих операций:

- выбор элементов и приборов из библиотек;
- перемещение элементов и схем в любое место рабочего поля;
- поворот элементов и групп элементов на углы, кратные 90 градусам;
- копирование, вставка или удаление элементов, групп элементов, фрагментов схем и целых схем;

- изменение цвета проводников;
- выделение цветом контуров схем для более удобного восприятия;
- одновременное подключение нескольких измерительных приборов и наблюдение их показаний на экране монитора;
- присваивание элементу условного обозначения;
- изменение параметров элементов в широком диапазоне.

## Интерфейс программного комплекса Electronics Workbench

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рисунок. 1).

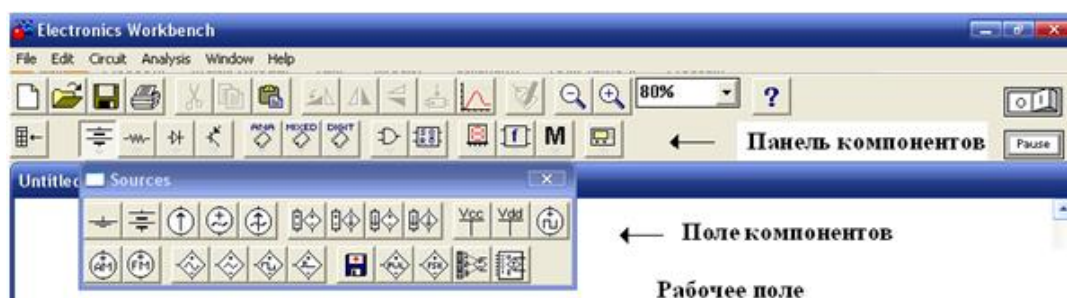


Рисунок. 1 – Общее поле программы

Полоса меню состоит из следующих компонент: меню работы с файлами (File), меню редактирования (Edit), меню работы с цепями (Circuit), меню анализа схем (Analysis), меню работы с окнами (Window), меню работы с файлами справок (Help).

Панель компонентов состоит из пиктограмм полей компонентов, а поле компонентов – из условных изображений компонентов.

При щелчке мыши по одной из пиктограмм полей компонентов, расположенных на панели, можно открыть соответствующее поле.

Все компоненты можно условно разбить на следующие группы: базовые компоненты, источники, линейные компоненты, ключи, нелинейные компоненты, индикаторы, логические компоненты, узлы комбинационного типа, узлы последовательного типа и гибридные компоненты.

### Базовые компоненты

*Пиктограмма в поле компонентов*



*Соединяющий узел*



Узел применяется для соединения проводников и создания контроль-

ных точек. К каждому узлу может подсоединяться не более четырех проводников.



### ***Заземление***



Компонент «заземление» имеет нулевое напряжение и таким образом обеспечивает исходную точку для отсчёта потенциалов. Любая схема, содержащая операционный усилитель, трансформатор, управляемый источник, осциллограф, должна быть обязательно заземлена, иначе приборы не будут производить измерения или их показания окажутся неправильными.

### **Источники**



#### ***Источник постоянного напряжения***



ЭДС источника постоянного напряжения измеряется в вольтах и задаётся производными величинами (от мкВ до кВ). Короткой жирной чертой в изображении батареи обозначается вывод, имеющий отрицательный потенциал.



#### ***Источник постоянного тока***



Стрелка указывает направление тока (от «+» к «-»). Задаётся в амперах (от мкА до кА).



#### ***Источник переменного напряжения***



Действующее значение напряжения источника задаётся в вольтах (от мкВ до кВ). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы. Напряжение источника отсчитывается от вывода со знаком «~».



#### ***Источник переменного тока***



Действующее значение тока источника задаётся в амперах (от мкА до кА). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы. Ток источника отсчитывается от вывода со знаком «~».



#### ***Генератор тактовых импульсов***



Генератор вырабатывает последовательность прямоугольных импульсов. Можно регулировать амплитуду импульсов, коэффициент заполнения (скважность) и частоту следования импульсов. Отсчёт амплитуды импульсов генератора производится от вывода, противоположного выводу «+».

### **Линейные элементы**



#### ***Резистор***



Сопротивление резистора задаётся в Омах (от Ом до МОм).



### ***Переменный резистор***



Положение движка переменного резистора устанавливается при помощи специального элемента – стрелочки регулятора. В диалоговом окне можно установить сопротивление, начальное положение движка (в процентах) и шаг приращения (также в процентах). Имеется возможность изменять положение движка при помощи клавиш-ключей: буквы от A до Z, цифры от 0 до 9, клавиши Enter или пробел [Space].

Пример: движок установлен в положение 45 %, шаг приращения – 5 %, клавиша-ключ – пробел. Нажатием клавиши [Space] положение движка становится равным 40 % и т.д. Если нажать [Space] + (Shift), то положение движка потенциометра увеличится на 5 %.



### ***Конденсатор***



Ёмкость конденсатора измеряется в фарадах и задается производными величинами (от пФ до Ф).



### ***Переменный конденсатор***



Переменный конденсатор допускает изменение величины емкости. Значение ёмкости может устанавливаться с помощью клавиш-ключей так же, как и положение движка переменного резистора.



### ***Катушка индуктивности***



Индуктивность катушки задается в Генри (от мкГн до Гн).



### ***Трансформатор***



Трансформатор используется для преобразования напряжения  $U_1$  в напряжение  $U_2$ . Коэффициент трансформации  $n = U_1 / U_2$  может быть установлен в диалоговом окне свойств модели трансформатора. Трансформатор может быть выполнен отводом средней точки.

*Схема, содержащая трансформатор, должна быть заземлена.*



### ***Ключ***



Ключи могут быть замкнуты или разомкнуты при помощи управляющих клавиш на клавиатуре, таймера, напряжения, тока. Имя управляющей клавиши можно ввести с клавиатуры в диалоговом окне.

## Нелинейные элементы



### Диод



Ток через диод может протекать только в одном направлении – от анода *A* к катоду *K*. Состояние диода (проводящее или непроводящее) определяется полярностью приложенного к диоду напряжения.



### Стабилитрон



Для стабилитрона (диода Зенера) рабочим является отрицательное напряжение. Обычно этот элемент используют для стабилизации напряжения.



### Мостовой выпрямитель



Мостовой выпрямитель предназначен для выпрямления переменного напряжения. При подаче на выпрямитель синусоидального напряжения среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{dc}$  можно приблизительно вычислить по формуле  $U_{dc} = 0,636(U_m - 1,4)$ , где  $U_m$  – амплитуда входного синусоидального напряжения.



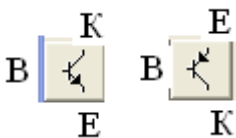
### Операционный усилитель



Операционный усилитель (ОУ) – усилитель, предназначенный для работы с обратной связью. Он обычно имеет очень высокий коэффициент усиления по напряжению, высокое входное и низкое выходное сопротивления. Вход «+» является неинвертирующим, вход «-» – инвертирующим. Модель операционного усилителя позволяет задавать параметры: коэффициент усиления, напряжение смещения, входные токи, входное и выходное сопротивления.

Входные и выходные сигналы ОУ должны быть заданы относительно земли.

## Биполярные транзисторы





(*n-p-n* *p-n-p* соответственно)



Биполярные транзисторы являются усилительными устройствами, управляемыми током. Они бывают двух типов: *p-n-p* и *n-p-n*. Транзистор *n-p-n* имеет две *n*-области (коллектор *K* и эмиттер *E*) и одну *p*-область (базу *B*).

## Приборы для проведения измерений

Простейшими приборами в среде Electronics Workbench являются вольтметр и амперметр, расположенные в поле индикаторов (*Indicators*), открываемом при нажатии кнопки «».

**Вольтметр** обозначается в поле индикаторов символом «», при нажатии левой кнопкой мыши на который, он приобретает вид, изображённый на рисунке 1.1, *а*. после чего его можно переместить, не отпуская левую кнопку мыши, в нужное место поля чертежа.

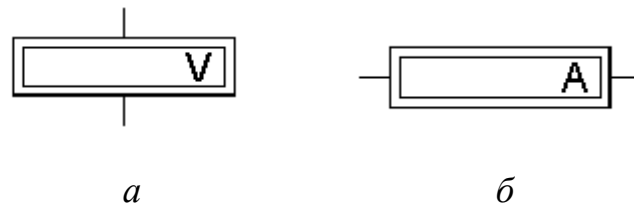


Рисунок 1.1 – Условные обозначения вольтметра (*а*) и амперметра (*б*) на поле чертежа

Вольтметр используется для измерения переменного (*AC*) и постоянного (*DC*) напряжения. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающего вольтметр, соответствует отрицательной клемме. Вид измеряемого напряжения можно установить в диалоговом окне вольтметра (в закладке *Value*). При измерении переменного синусоидального напряжения (*AC*) вольтметр будет показывать его действующее значение, равное


$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$



### Амперметр



Амперметр используется для измерения постоянного и переменного тока. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающего амперметр, соответствует отрицательной клемме. Вид измеряемого тока устанавливается аналогично виду измеряемого напряжения вольтметра.

Электронно-измерительные приборы и генератор расположены в поле инструментов (*Instruments*), открываемом при нажатии кнопки «».




### Мультиметр







Мультиметр используется для измерения: напряжения, тока, сопротивления, уровня напряжения в децибелах. Для настройки мультиметра нужно двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению открыть его увеличенное изображение, где выбираются измеряемая величина, вид измеряемого сигнала (переменный или постоянный), режим установки параметров мультиметра.

Для использования мультиметра в качестве омметра, присоедините его параллельно участку цепи, сопротивление которого нужно измерить, на увеличенном изображении мультиметра нажмите кнопку  $\Omega$  и кнопку  переключения в режим постоянного тока. Чтобы избежать ошибочных показаний, схема должна иметь соединение с землёй и не иметь контакта с источниками питания. Источники питания должны быть исключены из схемы (идеальный источник тока должен быть заменён разрывом цепи, а идеальный источник напряжения – короткозамкнутым участком).



### **Осциллограф**



Осциллограф, имитируемый программой Electronics Workbench, представляет собой аналог двухлучевого запоминающего осциллографа, имеет два канала *A* и *B* и может использоваться для визуального наблюдения двух сигналов одновременно. Он имеет две модификации – простую и расширенную. Условное обозначение осциллографа на схеме имеет вид, представленный на рисунке 1.2, *а*. При этом к нижним точкам (клеммам) подключаются входные каналы: *A* и *B*, а к правым – «Общий» (он соединяется, как правило, с массой) и «Синхронизация».

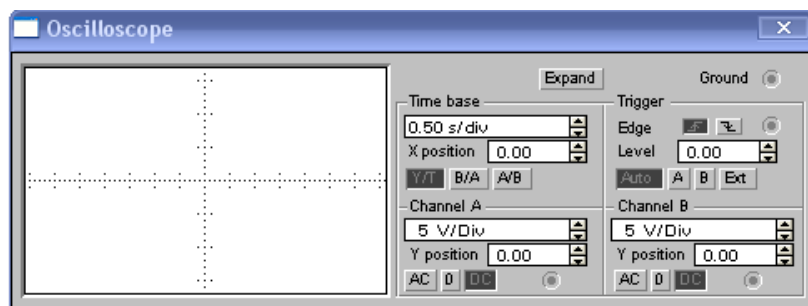
Осциллограф можно подключить к уже включённой схеме или во время работы схемы переставить выводы к другим точкам – изображение на экране осциллографа изменится автоматически.

Остановить процесс расчёта схемы в любой момент времени можно нажатием клавиши F9 или Pause в правом верхнем углу экрана. Продолжить расчёт можно повторным нажатием этих клавиш.

Двойным щелчком мыши по условному изображению на схеме открывается изображение передней панели простой модели осциллографа с кнопками управления (рисунок 1.2, *б*).



*a*



*б*

Рисунок.1.2 – Осциллограф: *a* – условное обозначение на схеме;  
*б* – вид простой модели

Осциллограф имеет два канала *Channel A* и *Channel B* с отдельной регулировкой чувствительности от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел и регулировкой смещения по вертикали *Y Position*. Режим по входу выбирается кнопками *AC* (наблюдается только переменный сигнал) и *DC* (наблюдается переменная и постоянная составляющие сигнала). Обычный режим развертки (по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время) выбирается кнопкой *Y/T*. В режиме *B/A* по вертикали откладывается напряжение канала *B*, по горизонтали – канала *A*. В режиме *Y/T* длительность развертки (*Time Base*) может быть задана в пределах от 0,1 нс/дел до 1с/дел. Развертка может иметь ждущий режим (*Trigger*) с запуском (*Edge*) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне (*Level*) запуска. Режимы запуска развертки выбираются либо *Auto* (от канала *A* или *B*), от канала *A*, от канала *B* или от внешнего источника (*Ext*). При нажатии на кнопку *Expand* открывается расширенная модель осциллографа, имеющая увеличенный экран (рисунок 1.3).

Для проведения измерений мгновенных значений сверху экрана расширенной модели осциллографа расположены два курсора, обозначенные цифрами 1 и 2, с вертикальными линиями, при помощи которых можно измерить мгновенные значения напряжений в любой точке осциллограммы. Для этого необходимо левой кнопкой мыши переместить курсоры вдоль верхней части экрана в требуемое положение. Координаты точек пересечения линии первого курсора с осциллограммами отображаются на левом табло, координаты второй линии курсора – на среднем табло. На правом табло отображаются значения разностей между соответствующими координатами первого и второго курсоров.

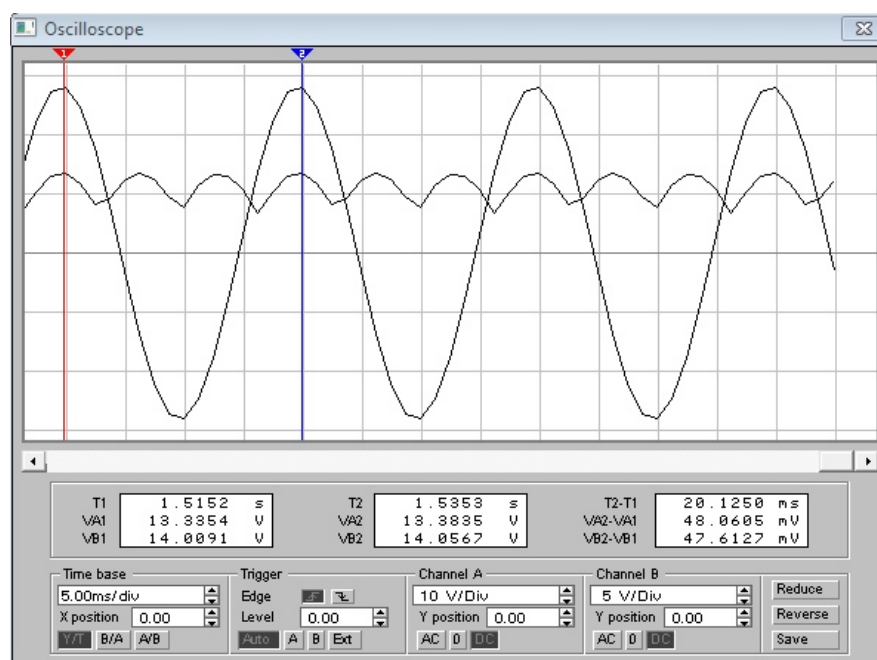


Рисунок 1.3 – Расширенная модель осциллографа

Осциллограмму можно записать в файл. Для этого нажмите кнопку *SAVE* и в диалоговом окне введите имя файла. Чтобы вернуться к прежнему изображению осциллографа, нажмите клавишу *REDUCE*.



### Бode-плоттер (графопостроитель)



Бode-плоттер используется для получения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик схемы. Он измеряет отношение амплитуд сигналов в двух точках схемы в децибелах и фазовый сдвиг между ними. Для измерения Бode-плоттер генерирует собственный спектр частот, диапазон которого может задаваться при настройке прибора. Частота любого переменного источника в исследуемой схеме игнорируется, однако схема должна включать какой-либо источник переменного тока.

Бode-плоттер имеет четыре зажима – два входных (IN) и два выходных (OUT). Для измерения отношения амплитуд или фазового сдвига нужно подключить положительные выводы входов IN и OUT (левые выводы соответствующих входов) к исследуемым точкам, а два других заземлить.

При двойном щелчке мыши по уменьшенному изображению Бode-плоттера открывается его увеличенное изображение (рисунок 1.4). Верхняя часть плоттера задаёт вид получаемой характеристики – АЧХ или ФЧХ. Для получения АЧХ нажмите кнопку *MAGNITUDE*, для получения ФЧХ – кнопку *PHASE*.

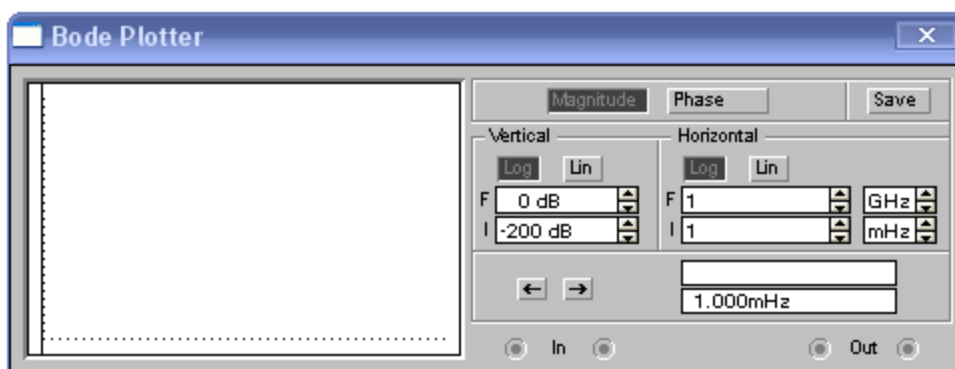


Рисунок 1.4 – Увеличенное изображение графопостроителя

Левая панель управления (VERTICAL) задаёт:

- начальное (I - initial) и конечное (F - final) значения параметров, откладываемых по вертикальной оси;
- вид шкалы вертикальной оси – логарифмическая или линейная. Правая панель управления (HORIZONTAL) настраивается аналогично.

При получении АЧХ по вертикальной оси откладывается отношение напряжений: в линейном масштабе от 0 до  $10^9$ , в логарифмическом масштабе от  $-200$  dB до  $200$  dB.

При получении ФЧХ по вертикальной оси откладываются градусы (от  $-720^\circ$  до  $720^\circ$ ). По горизонтальной оси всегда откладывается частота в герцах или в производных величинах.

Вначале горизонтальной шкалы расположен курсор. Его можно перемещать нажатием на кнопки со стрелками, расположенными справа от экрана, либо «тащить» с помощью мыши. Координаты точки пересечения курсора с графиком характеристики выводятся на информационных полях внизу.



### ***Функциональный генератор***



Генератор является идеальным источником напряжения, вырабатывающим сигналы синусоидальной, прямоугольной или треугольной формы.

Средний вывод генератора при подключении к схеме обеспечивает общую точку для отсчёта амплитуды переменного напряжения. Для отсчета напряжения относительно нуля общий вывод заземляют. Крайние правый и левый выводы служат для подачи переменного напряжения на схему. Напряжение на правом выводе изменяется в положительном направлении относительно общего вывода, на левом выводе – в отрицательном.

Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению открывается увеличенное изображение генератора (рисунок 1.5), где можно задать следу-

ющие параметры: частоту выходного напряжения, скважность, амплитуду выходного напряжения, постоянную составляющую выходного напряжения

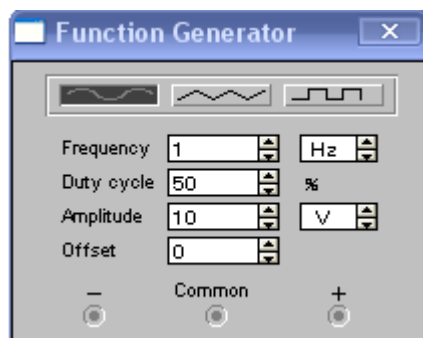


Рисунок 1.5 – Увеличенное изображение функционального генератора

## Настройка генератора

### *Установка формы сигнала*

Выберите требуемую форму выходного сигнала и нажмите на кнопку с соответствующим изображением. Форму треугольного и прямоугольного сигналов можно изменить, уменьшая и увеличивая значение в поле **DUTY CYCLE** (скважность). Этот параметр определяется для сигналов треугольной и прямоугольной формы. Для треугольной формы напряжения он задаёт длительность (в процентах от периода сигнала) между интервалом нарастания напряжения и интервалом спада. Установив, например, значение 20, мы получим длительность интервала нарастания 20 % от периода, а длительность интервала спада – 80 %. Для прямоугольной формы напряжения этот параметр задаёт соотношение между длительностями положительной и отрицательной частей периода.

### *Установка частоты сигнала*

Частота генератора может регулироваться от 1 Гц до 999 МГц. Значение частоты устанавливается в строке FREQUENCY с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, а в правом – единица измерения (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц соответственно).

### *Установка амплитуды выходного напряжения*

Амплитуда выходного напряжения может регулироваться от 0 мВ до 999 кВ. Значение амплитуды устанавливается в строке AMPLITUDE с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками.

### *Установка постоянной составляющей выходного напряжения*

Постоянная составляющая переменного сигнала устанавливается в строке OFFSET при помощи клавиатуры или кнопок со стрелками. Она мо-

жет иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это позволяет получить, например, последовательность однополярных импульсов.

## Моделирование схем

### *Выбор компонентов из библиотеки компонентов*

Выбор нужного компонента производится из поля компонентов, нужное поле компонентов выбирается нажатием левой кнопки мыши по одной из пиктограмм панели компонентов. После выбора поля компонентов нужный компонент при помощи мыши перемещается на рабочее поле.

Объект можно поворачивать на угол, кратный  $90^\circ$ . Для этого на объект нужно нажать правой клавишей мыши, а затем выбрать команду Rotate. Удаление объекта осуществляется командами Cut и Delete. Копирование производится при помощи команды Copy, вставка – при помощи команды Paste.

### *Соединение компонентов схемы проводниками*

Для соединения компонентов проводниками нужно подвести указатель мыши к выводу компонента. При этом на выводе компонента появится большая жирная точка (рисунок 1.6). Нажав левую кнопку мыши, переместите её указатель к выводу компонента, с которым нужно соединиться, и отпустите кнопку мыши. Выводы компонентов соединятся проводником.

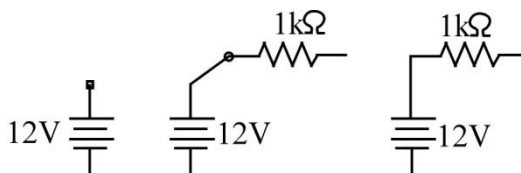


Рисунок 1.6 – Соединение компонентов

### *Установка значений параметров компонентов*

Установка значений параметров компонентов производится в диалоговом окне свойств компонента, которое открывается двойным щелчком левой клавиши мыши по изображению компонента или командой Value из меню Circuit (при этом компонент должен быть выделен).

Выбор модели компонента осуществляется в диалоговом окне выбора модели компонента, которое открывается двойным щелчком мыши по изображению компонента. Для редактирования значений параметров модели нужно нажать кнопку Edit.

### ***Подключение приборов***

В Electronics Workbench имеется семь приборов, формирующих различные воздействия и анализирующих реакцию схемы. Эти приборы представлены в виде пиктограмм, расположенных на панели инструментов.

Для подключения прибора к схеме нужно мышью «перетащить» прибор с панели инструментов на рабочее поле и подключить выводы прибора к исследуемым точкам. Некоторые приборы нужно заземлять, иначе их показания будут неверными.

Расширенное изображение прибора выводится в окне, которое появляется после двойного щелчка мыши по уменьшенному изображению прибора.

### ***Вставка компонентов в цепь***

После того как схема построена, можно вставить в неё дополнительные компоненты. Для этого нужно мышью переместить компонент в требуемую точку схемы и, поместив его над проводником, отпустить кнопку мыши. Компонент автоматически вставится в цепь, как показано ниже на рисунке 1.7.

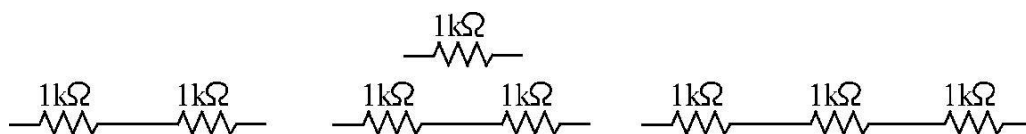
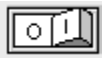


Рисунок 1.7 – Вставка компонентов в цепь

После построения схемы и подключения приборов анализ её работы начинается нажатием выключателя  в правом верхнем углу окна программы (рисунок 1.1).

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципа действия, исследование статических вольтамперных характеристик полупроводникового диода и его работы в простейших цепях.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Вольтамперная характеристика (ВАХ)  $p$ - $n$ -перехода и идеализированного диода имеет вид

$$I = I_0 \left( e^{U/\Phi_T} - 1 \right), \quad (2.1)$$

где  $I_0$  – тепловой ток обратносмещенного  $p$ - $n$  перехода;  $U$  – падение напряжения на диоде;  $\Phi_T$  – температурный потенциал, определяемый соотношением  $\Phi_T = K \cdot T / q$  ( $K$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура перехода;  $q$  – заряд электрона). Для нормальных условий ( $T = 300^\circ K$ )  $\Phi_T = 26$  мВ.

2.2. Ток диода  $I$  и напряжение  $U$  положительны при прямом смещении (плюс к аноду, минус к катоду). При обратном смещении ток и напряжение отрицательны. Вольт-амперная (ВАХ) характеристика диода показана на рисунок 2.1. На прямой ветви  $U_{пр} > 0$  и ток  $I_{пр}$  экспоненциально растет, на обратной ветви  $U_{обр} < 0$  и ток имеет выраженный участок насыщения  $I_{обр} = I_0$ .

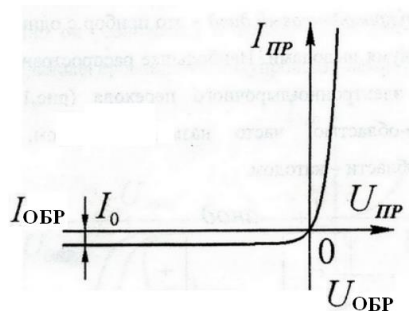


Рисунок 2.1 – Вольт-амперная характеристика диода



Совокупность постоянных напряжений и токов на диоде определяет режим диода по постоянному току. Рабочей точкой называется соответствующая режиму по постоянному току точка на ВАХ диода. Параметром нелинейного элемента в этом режиме является статическое сопротивление:

$$R_{cm} = U/I, \quad (2.2)$$

где  $U$  и  $I$  – соответственно напряжение и ток в рабочей точке.

Совокупность переменных напряжений и токов на диоде определяет режим работы диода по переменному току. Сопротивления нелинейных элементов для малых переменных токов называются динамическими или дифференциальными. Если известны формула или график, описывающие ВАХ диода, то дифференциальное сопротивление вычисляют, определяя производную в рабочей точке

$$R_{диф} = dU/dI \approx \Delta U/\Delta I. \quad (2.3)$$

Графическое определение дифференциального сопротивления в рабочей точке  $B$  показано на рисунке 2.2.

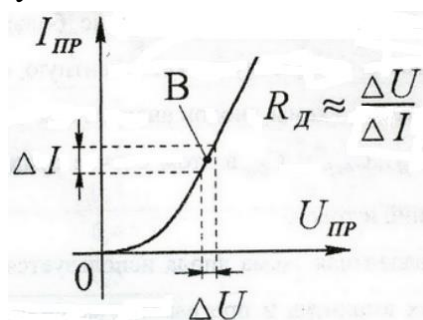


Рисунок 2.2 – Графическое определение дифференциального сопротивления

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Выбрать из таблицы 2.1 тип диода, для своего варианта и выписать из справочной литературы параметры исследуемого прибора.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6
Тип диода	D1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006

3.2. Изучить принцип работы полупроводникового диода, его ВАХ характеристику и параметры.

3.3. Начертить по ГОСТу схемы для исследования полупроводниковых диодов в прямом и обратном включении, а также в цепи с нагрузкой.

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. На компьютере запустить программу Electronics Workbench «Wewb32.exe».

4.2. Построить прямую ветвь ВАХ диода. Для этого на мониторе компьютера собрать схему в соответствии с рисунком 2.3. При выборе диода в группе диодных компонентов библиотеки, имеющихся в меню, выбрать по таблице 2.1 из библиотеки *internat* диод для своего варианта. При задании параметров измерительных приборов установить в опции *Mode* род измеряемого тока – *DC* (постоянный), а в опции *Resistance (R)* – величину внутреннего сопротивления для вольтметра – 10 МОм, а внутреннее сопротивление амперметра – 1 мОм.

4.3. Скорректировать модель своего варианта диода в соответствии с его справочными параметрами. Для этого установив мышку на марку диода из таблицы 2.1 библиотеки *internat*, нажать кнопку **Edit**. В появившемся окне последовательно установить значения параметров **Saturation current [IS]** (обратный ток диода  $I_{обр}$ ) и **Reverse breakdown voltage [BV]** (обратное напряжение пробоя  $U_{обр}$ ).  $I_{обр}$  принять равным 1 мкА, а  $U_{обр}$  следующим образом: для 1N4001  $U_{обр}=50$  В, для 1N4002 - 100 В, для 1N4003 - 200 В, для D1N4004 - 400 В, для 1N4005 - 500 В, для 1N4006 - 600 В.

4.4. Изменяя значения ЭДС источника  $E_1$ , от 0 до 5 В, снять показания амперметра и вольтметра. (Шаг изменения входного напряжения принять равным 0,1 В при изменении  $E_1$  от 0 до 1 В и 1 В при изменении  $E_1$  от 1 до 5 В). Полученные результаты занести в таблицу 2.2.

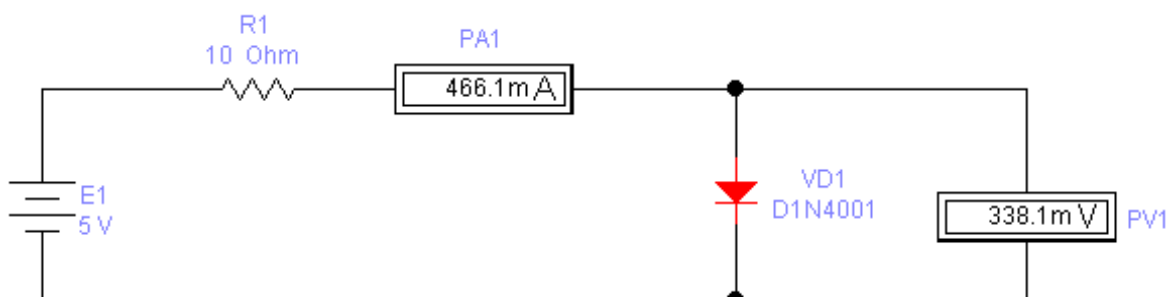


Рисунок 2.3 – Схема для снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики диода в среде программы Electronics Workbench

Таблица 2.2

$E_1, B$	0									5
$I_{np}, mA$										
$U_{np}, mB$										

4.5. Построить обратную ветвь характеристики диода, для чего на мониторе компьютера собрать схему в соответствии с рисунком 2.4. В последующем, изменяя значения ЭДС источника  $E_1$ , от 0 до 15 В, снять показания амперметра и вольтметра. Шаг изменения входного напряжения принять равным 2-3 В. Полученные результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

$E_1, B$	0									15
$I_{обр}, mA$										
$U_{обр}, B$	0									

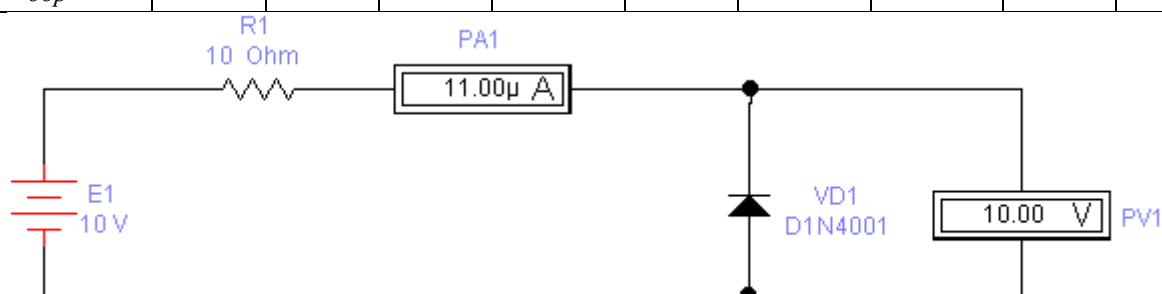


Рисунок 2.4 – Схема для снятия обратной ветви вольт-амперной характеристики диода в среде программы Electronics Workbench

4.6. По данным таблиц 2.2 и 2.3 построить в масштабе ВАХ диода (прямую  $I_{np} = f(U_{np})$  и обратную  $I_{обр} = f(U_{обр})$  ветви). Проверить соотношение измеренных токов диода в прямом и обратном направлении с теоретическими формулами  $I_{np} = \frac{(E_1 - U_{np})}{R}$ ,  $I_{обр} = \frac{(E_1 - U_{обр})}{R}$  для двух любых значений из табл. 2.2 и 2.3.

4.7. Определить статическое сопротивление диода при  $E_1 = 0 \div 5$  В по (2.2) и построить его зависимость от тока.

4.8. Построить касательную к графику прямой ветви ВАХ при  $I_{np} = 400$  мА и оценить дифференциальное сопротивление диода по наклону касательной. Прделайте ту же процедуру для  $I_{np} = 200$  мА и  $I_{np} = 50$  мА.

4.9. Аналогично п. 4.6, оценить дифференциальное сопротивление диода при обратном напряжении 5 В.

4.10. Построить на мониторе компьютера схему, изображённую на рисунке 2.5 для получения вольт-амперной характеристики диода с помощью осциллографа.

4.11. Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению осциллографа открыть изображение передней панели осциллографа с кнопками управления, информационными полями и экраном (рисунок 2.6).

При таком подключении координата точки по горизонтальной оси осциллографа будет пропорциональна напряжению, а по вертикальной – току через диод. Поскольку напряжение в вольтах на резисторе 1 Ом численно равно току через диод в амперах ( $I = U/R = U/1 = U$ ), по вертикальной оси можно непосредственно считывать значения тока. Если на осциллографе выбран режим В/А, то величина, пропорциональная току через диод (канал В), будет откладываться по вертикальной оси, а напряжение (канал А) – по горизонтальной.

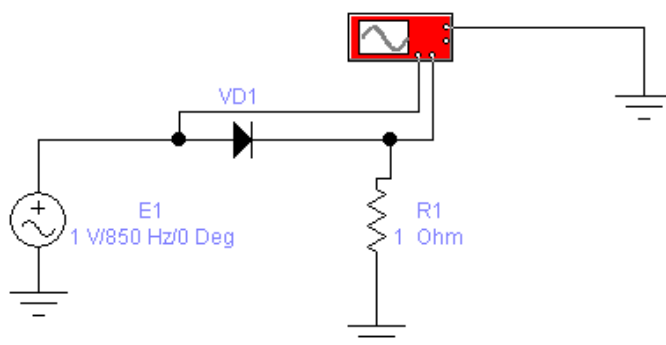


Рисунок 2.5 – Схема для снятия вольт-амперной характеристики диода с помощью осциллографа.

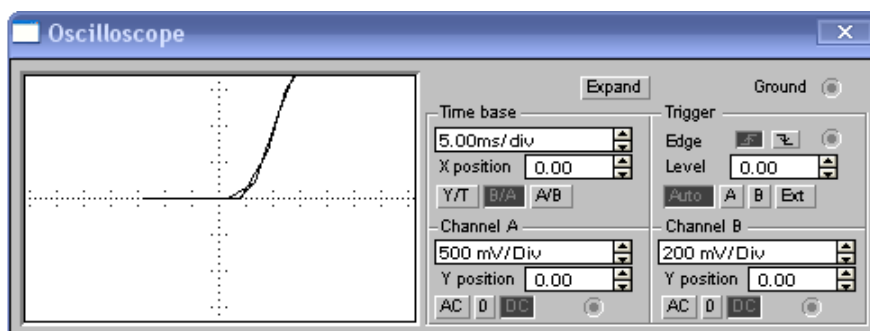


Рисунок 2.6 – Изображение передней панели осциллографа при нажатой кнопке «В/А»

4.12. Перечертить график (рисунок 2.6) в отчёт (или вывести на печать и приложить к отчёту) для разных напряжений источника (от 0 до 5 В). Сравнить ВАХ, полученные экспериментальным и расчётным путём.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать принципиальные схемы для снятия ВАХ, таблицы с экспериментальными результатами, графики ВАХ, построенные в масштабе, результаты расчетов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Что такое полупроводник? Чем обусловлена электропроводность полупроводника? Какие бывают типы полупроводников?

6.2. Что такое  $p$ - $n$  переход? Чем объясняется наличие запирающего слоя и потенциального барьера  $p$ - $n$  перехода?

6.3. Какие токи протекают через  $p$ - $n$  переход при прямом и обратном включении?

6.4. Какие токи протекает через  $p$ - $n$  переход при отсутствии внешнего напряжения, и чем они обусловлены?

6.5. Как изменяется толщина запирающего слоя и высота потенциального барьера при прямом и обратном включении  $p$ - $n$  перехода?

6.6. Какова зависимость между током, протекающим через  $p$ - $n$  переход, и напряжением, приложенным к нему? Как изменяется она с температурой?

6.7. Что такое пробой  $p$ - $n$  перехода? Какие бывают виды пробоев?

6.8. Как зависит напряжение пробоя  $p$ - $n$  перехода от температуры?

6.9. Чем объясняется отклонение экспериментальной ВАХ полупроводникового диода от теоретической?

6.10. Что такое дифференциальное сопротивление диода и сопротивление постоянному току и как они зависят от прямого тока?

6.11. Каково соотношение между сопротивлением диода, включенного в прямом и обратном направлениях?

6.12. Какие бывают типы полупроводниковых диодов и как они классифицируются?

6.13. Какими эксплуатационными параметрами характеризуется полупроводниковый диод?

6.14. Каков верхний предел рабочей температуры германиевых и кремниевых диодов?

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СТАБИЛИТРОНА

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципа действия, исследование статических вольтамперных характеристик полупроводникового стабилитрона и его работы в простейших цепях.

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Стабилитроны – это полупроводниковые диоды, работающие в режиме лавинного пробоя. Они предназначены для стабилизации уровня напряжения в нелинейных цепях постоянного тока. В качестве стабилитронов используются плоскостные кремниевые диоды (обозначают КС 168А). При использовании высоколегированного кремния (высокая концентрация примесей, а, следовательно, и свободных носителей заряда) напряжение стабилизации понижается, а с уменьшением степени легирования – повышается. Напряжение стабилизации лежит в диапазоне от 3 до 180 В. Вольтамперная характеристика полупроводникового стабилитрона изображена на рисунке 3.1.

На характеристике (рисунок 3.1) точками *A* и *B* отмечены границы рабочего участка. Положение точки *A* соответствует напряжению пробоя *p-n* перехода, которое зависит от удельного сопротивления исходного материала. Точка *B* соответствует предельному режиму, в котором на стабилитроне рассеивается максимально допустимая мощность

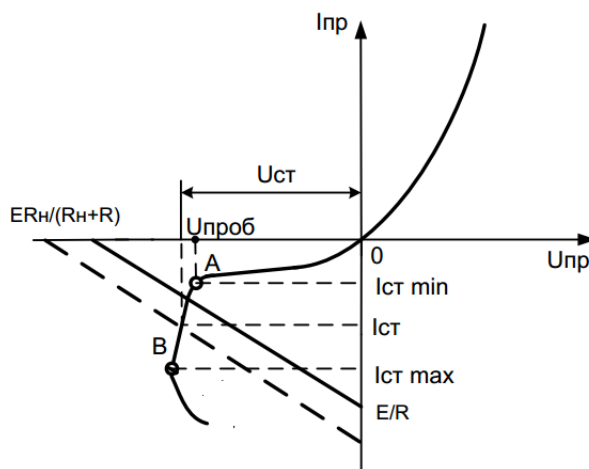


Рисунок 3.1 – Вольтамперная характеристика стабилитрона

Ток стабилизации стабилитрона  $I_{ст}$  может быть определен вычислени-

ем падения напряжения на резисторе  $R$ , которое еще называют *балластным*.

$$I_{cm} = \frac{(E - U_{cm})}{R}, \quad (3.1)$$

где  $E$  – напряжение, подаваемое на вход стабилитрона;

$U_{cm}$  – напряжение стабилизации стабилитрона.

Напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{cm}$  определяется точкой на вольтамперной характеристике, в которой ток стабилитрона резко увеличивается. Дифференциальное сопротивление стабилитрона вычисляется так же, как для диода, по наклону вольтамперной характеристики:  $R_{диф} = dU_{cm}/dI_{cm}$ .

На практике схема стабилизатора напряжения содержит нагрузочное сопротивление, присоединённое параллельно стабилитрону.

Тогда будет справедливо соотношение

$$E = (I_{cm} + I_H)R + U_{cm} = (I_{cm} + U_{cm}/R_H)R + U_{cm}. \quad (3.2)$$

Из этого уравнения получим выражение для тока стабилизации

$$I_{cm} = \left( \frac{E}{R} \right) - \left( \frac{U_{cm}(R + R_H)}{RR_H} \right). \quad (3.3)$$

На основании уравнения (3.3) может быть построена нагрузочная прямая, точка пересечения, которой с вольтамперной характеристикой является рабочей (рисунок 3.1).

При изменении напряжения источника питания  $E$  нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе (пунктирная линия на рисунке 3.1), а при изменении сопротивления нагрузки изменяется ее наклон.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Выбрать из таблицы 3.1 тип стабилитрона, для своего варианта и выписать из справочной литературы параметры исследуемого прибора.

Таблица 3.1 – Варианты исследуемых стабилитронов

Вариант	1	2	3	4	5	6
Тип стабилитрона	KC133A	KC139A	KC137A	KC156A	KC162A	KC168A

3.2. Изучить принцип работы полупроводникового стабилитрона, его ВАХ и параметры.

3.3. Начертить схемы для исследования полупроводниковых стабилитронов в прямом и обратном включении, а также в цепи с нагрузкой.

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. На компьютере запустить программу Electronics Workbench.

4.2. Построить прямую ветвь ВАХ стабилитрона. Для этого на мониторе компьютера набрать схему согласно рисунку 3.2. При выборе стабилитрона в группе диодных компонентов библиотеки, имеющихся в меню, выбрать библиотеку *motor 1n* и в ней соответствующий таблице 3.1 тип стабилитрона для своего варианта. При задании параметров измерительных приборов установить в опции *Mode* род измеряемого тока – *DC* (постоянный), а в опции *Resistance (R)* – величину внутреннего сопротивления для вольтметра – 10 МОм, а внутреннее сопротивление амперметра – 1 мОм.

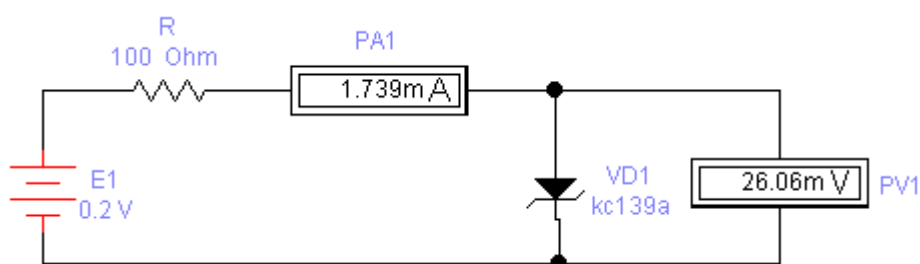


Рисунок 3.2 – Схема для снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики стабилитрона

4.3. Скорректировать модель своего варианта стабилитрона в соответствии с его справочными параметрами. Для создания модели стабилитрона в соответствии с вариантом задания по таблице 3.1, необходимо щелкнуть два раза клавишей указания мыши на изображении стабилитрона и выбрать в появившемся окне **Zener Diode Properties** в разделе **Library** библиотеку **default**, а затем в разделе **Model** – тип стабилитрона **ideal**. Выбрать последовательно клавишей указания мыши кнопки **Copy** и **Paste**, записать латинскими буквами в появившемся окне тип стабилитрона в соответствии с вариантом задания и нажать кнопку **OK**. В результате в разделе **Model** добавится новый тип стабилитрона. Для корректировки его параметров нажать кнопку **Edit** и установить значения параметров **Zener test voltage at IZT [VZT]** (напряжение стабилизации  $U_{cm}$ ), **Zener test current [IZT]** (максимальный ток стабилизации  $I_{cm\ max}$ ) в соответствии с данными п.3.1. Значения других параметров оставить без изменения.

4.4. Изменяя значения ЭДС источника напряжения  $E_1$  на стабилитроне от 0 до 1,2 В, снять показания амперметра и вольтметра. Полученные результаты занести в таблицу 3.2.



Таблица 3.2

$E_1, B$	0	0,2	0,4	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
$I_{ст.пр}, mA$											
$U_{ст.пр}, B$											

4.5. Построить обратную ветвь характеристики стабилитрона. Для этого на мониторе компьютера набрать схему согласно рисунку 3.3 и, изменяя значения источника  $E_1$  на стабилитроне от 0 до 20 В, снять показания амперметра и вольтметра, измеряя тем самым значения напряжение  $U_{ст.обр}$  на стабилитроне и ток через стабилитрон  $I_{ст.обр}$  при значениях ЭДС источника  $E_1$ . В интервале от 0 до  $U_{ст.обр}$  использовать более мелкий шаг изменения  $E_1$  (например, 0,2-0,4 В). При превышении  $U_{ст.обр}$  можно использовать шаг изменения  $E_1$  равный 1-2 В. Результат записать в таблицу 3.3 в раздел «эксперимент».

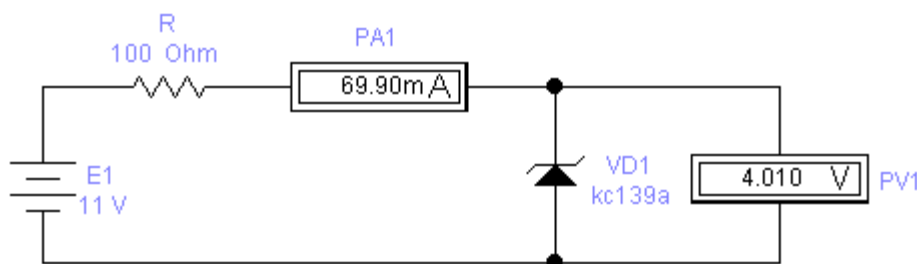


Рисунок 3.3 – Схема для снятия обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилитрона

4.6. Вычислить ток  $I_{ст.обр}$  стабилитрона для каждого значения напряжения  $U_{ст.обр}$ , используя (3.3). Результаты вычислений занесите в таблицу 3.3 в раздел «расчёт».

Таблица 3.3

$E_1, B$											
$I_{ст.обр}, mA$	эксперимент										
	расчет										
$U_{ст.обр}, B$											

Поскольку в программе EWB в параметрах моделей стабилитронов не предусмотрено значение  $I_{ст.мах}$  (т.е. стабилитроны не горят при превыше-

нии определенных значений  $I_{cm}$ ) то под напряжением  $U_{cm.max}$  соответствующем  $I_{cm.max}$  будем подразумевать величину отрицательного напряжения, падающего на стабилитроне при протекании через него обратного тока равного  $\approx 10I_{cm.min}$ . Для нахождения параметра  $U_{cm.min}$  использовать более мелкий шаг изменения величины  $E_1$ .

4.7. По данным таблиц 3.2 и 3.3 построить вольтамперную характеристику стабилитрона.

4.8. На полученной в п.4.7 ВАХ стабилитрона, построить нагрузочные прямые для следующих значений:

а)  $E_1=20V$ ;  $R=300\text{ Ом}$ ;  $R_H=200\text{ Ом}$ ;

б)  $E_1=20V$ ;  $R=300\text{ Ом}$ ;  $R_H=1\text{ кОм}$ ;

в)  $E_1=35V$ ;  $R=300\text{ Ом}$ ;  $R_H=200\text{ Ом}$ .

Для каждого случая определить рабочую точку.

4.9. Собрать схему, представленную на рисунке 3.4. Значение ЭДС источника  $E_1$  установить равным 20 В. Принять  $R=300\text{ Ом}$ , а  $R_H=75\text{ Ом}$ . Включить схему. Записать значения напряжения  $U_{cm}$  на стабилитроне и токов через резисторы:  $R - I_R$ ;  $R_H - I_H$  и через стабилитрон  $I_{cm}$  в таблицу 3.4.

4.10. Повторить п. 4.7 при коротком замыкании и при сопротивлениях резистора  $R_H$  взятых из таблицы 3.4.

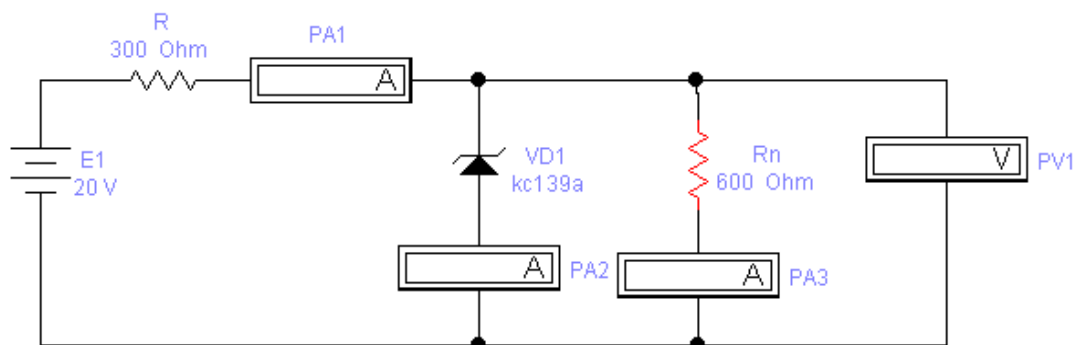


Рисунок 3.4 – Схема для исследования работы стабилитрона под нагрузкой

Таблица 3.4

$R_H, \text{Ом}$	75	100	200	300	600	1000	$\infty$	к.з.
$U_{cm}, \text{В}$								
$I_R, \text{мА}$								
$I_{cm}, \text{мА}$								
$I_H, \text{мА}$								

4.11. Рассчитать ток  $I_H$  через резистор  $R_H$ , и ток стабилитрона  $I_{cm}$  по (3.3) для каждого значения  $R_H$  (таблица 3.4) и сравнить их с экспериментальными значениями из п. 4.9-4.10.

4.12. Собрать схему, представленную на рисунке 3.5. Включить схему. Записать экспериментальное значение напряжения стабилизации, полученное из графика на экране осциллографа (рисунок 3.6).

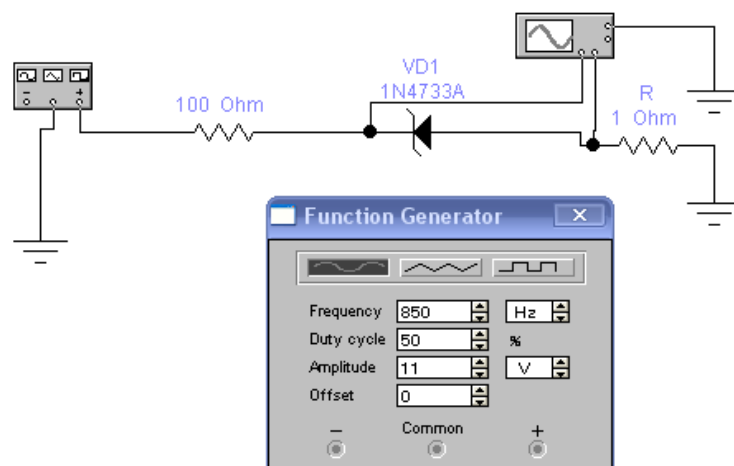


Рисунок 3.5 – Схема для измерения напряжения стабилизации

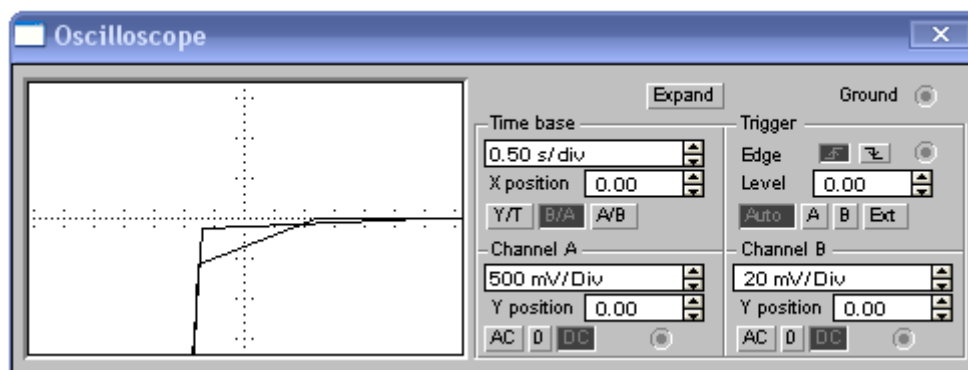


Рисунок 3.6 – Изображение передней панели осциллографа при нажатой кнопке «В/А»

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать принципиальные схемы для снятия ВАХ, таблицы с экспериментальными результатами, графики ВАХ, построенные в масштабе, результаты расчётов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Что называется стабилитроном?

6.2. Какая ветвь ВАХ стабилитрона используется при стабилизации напряжений?

6.3. От чего зависит напряжение стабилизации стабилитрона?

6.4. Перечислить основные параметры стабилитрона.

6.5. Влияет ли значение сопротивления нагрузки на степень стабилизации выходного напряжения стабилизатора?

6.6. Как изменяется напряжение  $U_{ст}$  на выходе стабилизатора, при уменьшении сопротивления  $R$ ?

#### 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципа работы биполярного транзистора, экспериментальное исследование входных и выходных статических характеристик транзистора включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ), исследование работы транзистора в электрической цепи с нагрузкой, определение малосигнальных  $h$ -параметров.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Биполярный транзистор (рисунок 4.1) – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими  $p$ - $n$  переходами и тремя выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. В биполярном транзисторе используются одновременно два типа носителей заряда – электроны и дырки (отсюда и название – биполярный). Транзистор позволяет усиливать электрические сигналы.

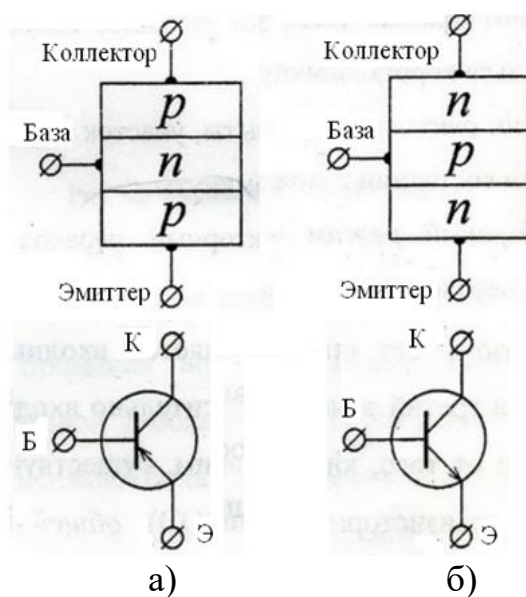


Рисунок 4.1 – Структура биполярного транзистора:

а – транзистор типа  $p$ - $n$ - $p$ ; б – транзистор типа  $n$ - $p$ - $n$

Центральная часть транзистора называется базой (Б), крайние области – коллектором (К) и эмиттером (Э). Переход, возникающий между коллектором и базой, называется коллекторным переходом, а переход, возникающий между эмиттером и базой – эмиттерным. В зависимости от чередования переходов различают транзисторы  $p-n-p$  и  $n-p-n$  типов.

Существуют три основных режима работы биполярного транзистора:

1. Активный режим (режим А).

Управляющий  $p-n$  переход база-эмиттер открыт:  $U_B = U_{\text{Э}} + 0,7 \text{ В}$ , а переход база-коллектор закрыт:  $U_K > U_B$ . Ток коллектора линейно зависит от тока базы. В этом режиме транзистор используется для усиления непрерывно изменяющихся сигналов, например синусоиды.

2. Режим отсечки (режим В).

Транзистор закрыт, оба  $p-n$  перехода: база-коллектор и база-эмиттер закрыты. Коллекторный ток равен нулю (точнее, пренебрежимо малому обратному току коллектора  $I_0$ ), участок Э-К находится в высокоомном состоянии и может считаться разомкнутым.

3. Режим насыщения (режим S).

Оба  $p-n$  перехода открыты и через них протекают прямые токи. Коэффициент  $\beta$  минимален. Ток базы –  $I_B > I_K / \beta$ . Напряжение база-коллектор –  $U_{BK} \geq 0,7 \text{ В}$ , напряжение база-эмиттер –  $U_{BЭ} \geq 0,7 \text{ В}$  и напряжение коллектор-эмиттер насыщения –  $U_{KЭ.нас} = 0,2-1,0 \text{ В}$ . Участок Э-К имеет высокую проводимость и его можно считать короткозамкнутым.

Режимы отсечки и насыщения используются в ключевом режиме работы транзистора при усилении двухуровневых сигналов (высокий уровень – низкий уровень).

В качестве элемента электрической цепи транзистор используется таким образом, что один из его выводов является входным, другой – выходным, а третий вывод является общим относительно входа и выхода. В зависимости от того, какой вывод является общим, существуют три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) и общей базой (ОБ).

При включении биполярного транзистора с общим эмиттером (ОЭ) цепь базы является входной, а цепь коллектора – выходной. Схема включения транзистора с ОЭ в активном режиме показана на рисунке 4.2.

Физические процессы в транзисторе с ОЭ аналогичны при включении транзистора с общей базой (ОБ). Под действием напряжения  $U_{БЭ}$  в цепи эмиттера проходит ток  $I_{Э}$ . В базе этот ток разветвляется. Основная его часть идет в коллектор, создавая управляемую составляющую тока коллектора, другая часть – в цепь базы, определяя ток базы рекомбинации. Основное соотношение для токов на выводах транзистора соответствует первому закону Кирхгофа:

$$I_{Э} = I_{К} + I_{Б}. \quad (4.1)$$

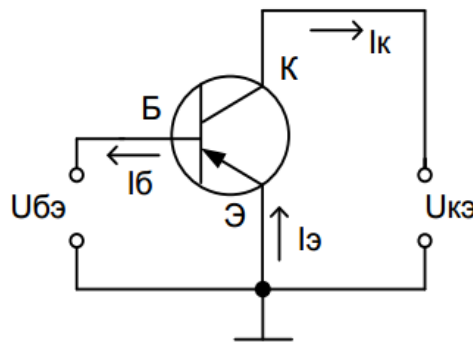


Рисунок 4.2 – Схема включения транзистора с ОЭ в активном режиме

Навстречу току рекомбинации в базе проходит обратный ток коллектора  $I_{КБ0}$ . С учётом теплового тока  $I_{КБ0}$  и коэффициента передачи тока эмиттера,  $\alpha$  ток  $I_{Б}$  можно выразить таким образом:

$$I_{Б} = I_{Э} - I_{К} = (1 - \alpha)I_{Э} - I_{КБ0}. \quad (4.2)$$

откуда видно, что ток базы является незначительным по сравнению с током эмиттера.

2.2. Статические вольтамперные характеристики транзистора включенного по схеме с ОЭ

При использовании транзистора в различных схемах практический интерес представляют зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ). Статические характеристики снимают при относительно медленных изменениях тока и напряжения (по постоянному току). Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

2.3. Выходными статическими характеристиками транзистора с ОЭ является семейство характеристик  $I_{К}$  от напряжения  $U_{КЭ}$  при фиксированном токе базы  $I_{Б}$

$$(I_K = f(U_{KЭ}) | I_B = const)$$

Вид этих характеристик отражает особенности работы транзистора с ОЭ в различных режимах (рисунок 4.3).

В активном режиме и режиме насыщения эмиттерный переход включается в прямом направлении. Под действием напряжения в цепи базы проходит ток  $I_B$ . За счёт напряжения  $U_{БЭ}$  при нулевом напряжении коллектора оба  $p-n$  перехода транзистора смещены в прямом направлении. Транзистор работает в режиме насыщения и через коллектор проходит ток инжекции, направление которого противоположно направлению коллекторного тока в активном режиме. В базе накапливаются неосновные носители заряда.

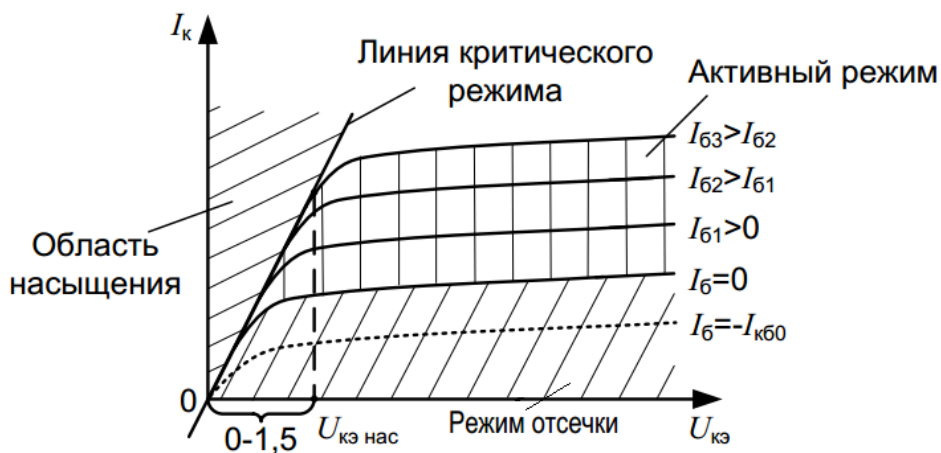


Рисунок 4.3 – Выходные характеристики транзистора с ОЭ

С появлением небольшого отрицательного напряжения на коллекторе ток инжекции из коллектора уменьшается, а ток обусловленный экстракцией дырок из базы в коллектор увеличивается. Поэтому при увеличении отрицательного напряжения коллектора до значения  $U_{KЭ} = U_{БЭ}$  наблюдается значительный рост коллекторного тока. При  $|U_{KЭ}| > |U_{БЭ}|$  транзистор из режима насыщения переходит в активный режим. Рост коллекторного тока при дальнейшем увеличении отрицательного напряжения  $U_{KЭ}$  замедляется. Но наклон выходных характеристик в схеме с ОЭ оказывается больше, чем в схеме с ОБ.

Увеличение тока базы вызывает увеличение коллекторного тока, то есть смещение выходных характеристик вверх.

2.4. Входные характеристики транзистора в схеме с ОЭ (рисунок 4.4) представляют собой зависимость  $I_{Э} = f(U_{БЭ}) | U_{КБ} = const$  и по виду близки к прямой ветви ВАХ  $p-n$  перехода (диода).



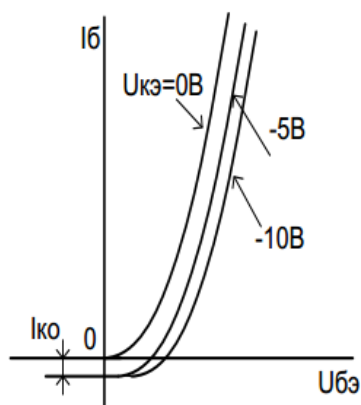


Рисунок 4.4 – Входные характеристики транзистора с ОЭ

При  $U_{КЭ} = 0$  оба  $p-n$  перехода транзистора оказываются включенными в прямом направлении. Из эмиттера и коллектора осуществляется инжекция дырок в базу. В цепи базы проходит ток рекомбинации обоих переходов. Поэтому входная характеристика представляет собой ВАХ двух параллельно включенных  $p-n$ -переходов.

При  $U_{КЭ} < 0$  коллекторный переход включается в обратном направлении и в цепи базы проходит ток  $I_B > 0$ .

Если  $U_{БЭ} = 0$ , то  $I_Э = 0$  и в цепи базы проходит ток  $I_B = -I_{КБ0}$ . Увеличение напряжения  $U_{БЭ}$  сопровождается рекомбинационной составляющей тока базы, и при некотором напряжении  $U_{БЭ}$  ток базы становится равным нулю. Дальнейшее увеличение напряжения  $U_{БЭ}$  сопровождается ростом тока базы. При увеличении отрицательного напряжения коллектора наблюдается смещение характеристик в сторону оси токов. Это связано с прохождением обратного тока коллектора  $I_{КБ0}$ .

Статический коэффициент передачи транзистора по постоянному току определяется как отношение тока коллектора  $I_K$  к току базы  $I_B$ :

$$\beta_{DC} = I_K / I_B. \quad (4.3)$$

Статический коэффициент передачи транзистора по переменному току определяется как отношение приращения тока коллектора  $\Delta I_K$  к приращению тока базы  $\Delta I_B$ :

$$\beta_{AC} = \Delta I_K / \Delta I_B. \quad (4.4)$$

## 2.5. Транзистор как активный четырёхполюсник

Для транзистора как четырёхполюсника в качестве независимых пере-

менных обычно принимают приращения входного тока  $\Delta I_1$  и выходного напряжения  $\Delta U_2$ , а приращения входного напряжения  $\Delta U_1$  и выходного тока  $\Delta I_2$  выражают через так называемые  $h$ -параметры транзистора (рисунок 4.5):

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2; \\ \Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2, \end{cases} \quad (4.5)$$

где индекс 1 для входной цепи, индекс 2 – для выходной.

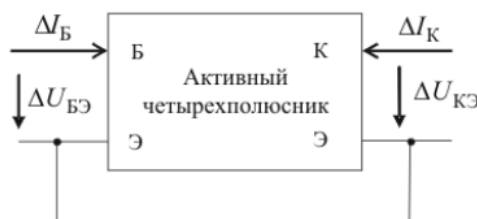


Рисунок 4.5 – Транзистор, включенный по схеме ОЭ как активный четырехполюсник

Тогда связь согласно выражению (4.5) между входными  $(\Delta U_{БЭ}, \Delta I_Б)$  и выходными  $(\Delta U_{КЭ}, \Delta I_К)$  приращениями напряжений и токов для транзистора, включенного по схеме общий эмиттер будет иметь вид:

$$\begin{cases} \Delta U_{БЭ} = h_{11Э}\Delta I_Б + h_{12Э}\Delta U_{КЭ}; \\ \Delta I_К = h_{21Э}\Delta I_Б + h_{22Э}\Delta U_{КЭ}. \end{cases} \quad (4.6)$$

Неизвестные  $h$ -параметры транзистора легко определяются опытным путем:

- входное дифференциальное сопротивление транзистора при неизменном выходном напряжении ( $U_{КЭ} = const$ )

$$h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б}; \quad (4.7)$$

- коэффициент передачи тока при неизменном выходном напряжении ( $U_{КЭ} = const$ )

$$h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0} = \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б} = \beta; \quad (4.8)$$

- коэффициент внутренней обратной связи по напряжению при неизменном входном токе ( $I_Б = const$ )

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}}; \quad (4.9)$$

- выходная проводимость транзистора при неизменном входном токе ( $I_B = const$ )

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}}. \quad (4.10)$$

Для схемы с ОЭ входное сопротивление составляет единицы кОм, а выходная проводимость – от  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  См.

$h$ -параметры транзистора в рабочей точке  $A$  можно определить графическим путём. Параметры  $h_{11Э}$  находят по входной характеристике (рисунок 4.6).

На входной характеристике выбирают вблизи рабочей точки  $A$  две вспомогательные точки  $A_1$  и  $A_2$  (приблизительно на одинаковом расстоянии), находят приращения напряжения и тока базы и рассчитывают входное дифференциальное сопротивление  $h_{11Э}$ . Параметры  $h_{22Э}$  и  $h_{21Э}$  определяются из семейства выходных характеристик транзистора (рисунок 4.7):

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta = \frac{I_{K2} - I_{K1}}{I_{B2} - I_{B1}}; \quad h_{22Э} = \frac{\Delta I_K^*}{\Delta U_{КЭ}^*} = \frac{I_{K2}^* - I_{K1}^*}{U_{K2}^* - U_{K1}^*}. \quad (4.11)$$

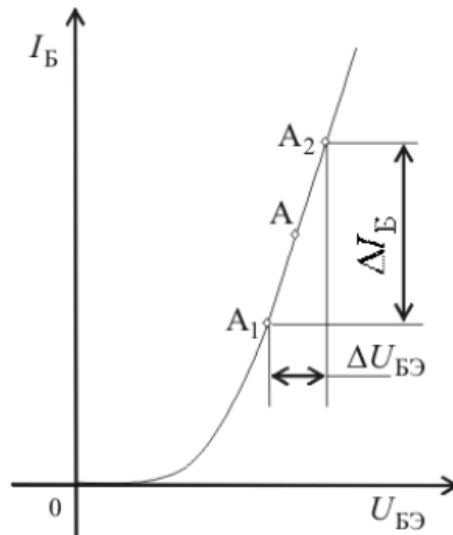


Рисунок 4.6 – Построения для определения  $h_{11Э}$

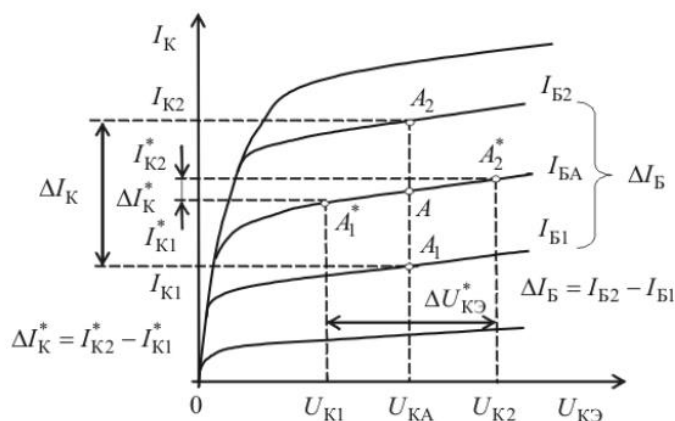


Рисунок 4.7 – Построения для определения  $h_{22Э}$  и  $h_{21Э}$

## 2.6. Работа транзистора с нагрузкой

При работе транзистора в качестве усилителя электрических сигналов последовательно с ним в цепь коллектор-эмиттер включается сопротивление, с которого снимается выходное усиленное напряжение.

## 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Выбрать из таблицы 4.1 тип транзистора, согласно своего варианта и выписать из справочной литературы параметры исследуемого прибора.

Таблица 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6
Тип транзистора	2N712	2N3392	2N5172	MPS3395	MPSW10	PN4141

3.2. Изучить принцип работы биполярного транзистора, его характеристики и параметры.

3.3. Начертить схемы для исследования входных и выходных характеристик биполярного транзистора для схемы включения с общей базой, общим эмиттером или общим коллектором (по заданию преподавателя).

3.4. Представить начерченные схемы преподавателю для проверки.

## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. На компьютере запустить программу Electronics Workbench.

4.2. С помощью инструментальных средств программы Electronics Workbench набрать на мониторе компьютера схему, изображенную на рисунке 4.8, для исследования входных и выходных характеристик биполярного транзистора.

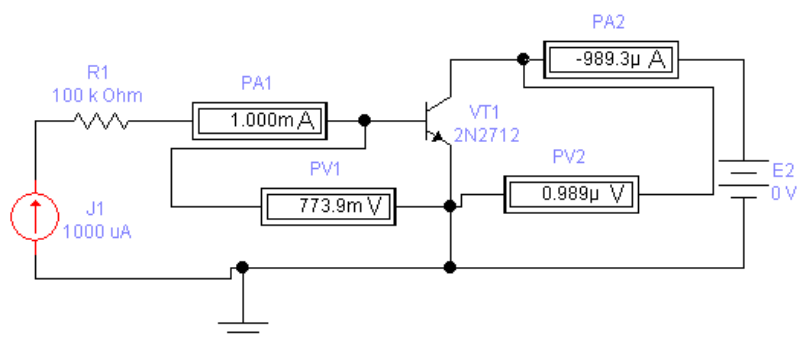


Рисунок 4.8 – Схема установки для исследования ВАХ биполярного транзистора

4.3. Выбрать модель транзистора из библиотеки *nation2* вкладке *Models* свойств транзистора (*NPN Transistor Properties*).

4.3.1. Во вкладке *Value* свойств вольтметров (*Voltmeter Properties*) установить режим измерения постоянного тока (*Mode: DC*) и задать внутреннее сопротивление вольтметра (*Resistance*)  $R = 100 \text{ МОм}$ .

4.3.2. Во вкладке *Value* свойств амперметров (*Ammeter Properties*) установить режим измерения постоянного тока (*Mode: DC*) и задать внутреннее сопротивление амперметра (*Resistance*)  $R = 1 \mu\text{Ом}$ . Включить лабораторную установку.

4.4. Снять семейство входных зависимостей биполярного транзистора. Для этого, изменяя величину тока источника  $I_B$  от 1 до 1000 мкА в соответствии с данными таблицы 4.1, измерить напряжение между базой и эмиттером  $U_{БЭ}$  при двух значениях напряжения между коллектором и эмиттером ( $U_{КЭ} = 0\text{В}$  и  $U_{КЭ} = 5\text{В}$ ). Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

$I_B, \text{мкА}$	0	1	3	10	30	100	300	1000
$U_{БЭ}, \text{мВ}$ при $U_{КЭ} = 0\text{В}$								
$U_{БЭ}, \text{мВ}$ при $U_{КЭ} = 5\text{В}$								

4.5. Снять семейство выходных зависимостей биполярного транзистора при токах базы  $I_B = 0; 50; 100; 150 \text{ мкА}$  по схеме рисунка 4.8.

4.6. Установить величину тока источника тока  $I_B = 0$  и, изменяя величину напряжения источника  $E_1 (U_{KЭ})$  в соответствии с данными таблицы 4.3, снять зависимость  $I_K = f(U_{KЭ})$  при  $I_B = 0$ . Результаты измерений занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

$I_B$ , мкА	$U_{KЭ}$ , В	$I_K$ , мА
0	0	
	1	
	2	
	5	
	10	
	15	
50	0	
	1	
	2	
	5	
	10	
	15	
100	0	
	1	
	2	
	5	
	10	
	15	
150		

4.7. Повторить измерения по п. 4.6 при других токах базы.

4.8. По полученным результатам (таблица 4.2 и 4.3) построить в масштабе входные и выходные ВАХ биполярного транзистора.

4.9. Рассчитать, используя выражение (4.7), при токе базы  $I_B = 50$  мкА для двух значений коллекторного напряжения ( $U_{KЭ} = 0В$  и  $U_{KЭ} = 5В$ ) входное сопротивление  $R_{вх}$  транзистора при включении его по схеме с ОЭ:

$$R_{BX} = h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B}.$$

4.10. Рассчитать, используя выражение (4.8), значение выходного сопро-

тивления транзистора при включении его по схеме с ОЭ, при  $I_B = 100$  мкА и  $U_{KЭ} = 5$  В.

$$R_K = (h_{22})^{-1} = \frac{\Delta U_{KЭ}}{\Delta I_K} = \frac{U_{K2}^* - U_{K1}^*}{I_{K2}^* - I_{K1}^*}.$$

4.11. Рассчитать, используя выражение (4.11), значение коэффициента усиления по току для транзистора при его включении по схеме с ОЭ, при  $U_{KЭ} = 5$  В и  $I_B = 100$  мкА.

4.12. Набрать на мониторе компьютера изображённую на рисунке 4.9 схему для исследования входных ВАХ биполярного транзистора на осциллографе в среде программы Electronics Workbench.

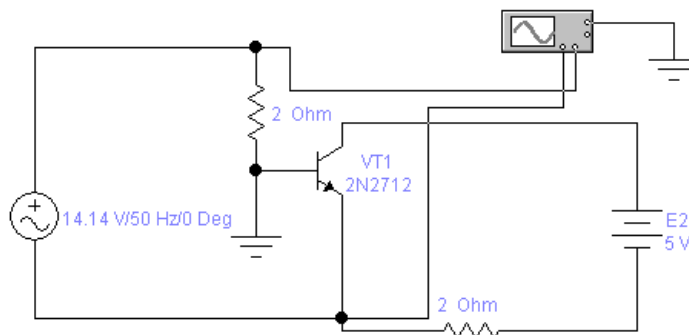


Рисунок 4.9 – Схема для исследования входных вольтамперных характеристик биполярного транзистора на осциллографе

Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению осциллографа открыть изображение передней панели осциллографа с кнопками управления, информационными полями и экраном (рисунок 4.10). Перечертить график (рисунок 4.10) в отчет (или вывести на печать и приложить к отчету) для разных напряжений источника  $E_2$ . Сравнить ВАХ, полученные в п.4.8.

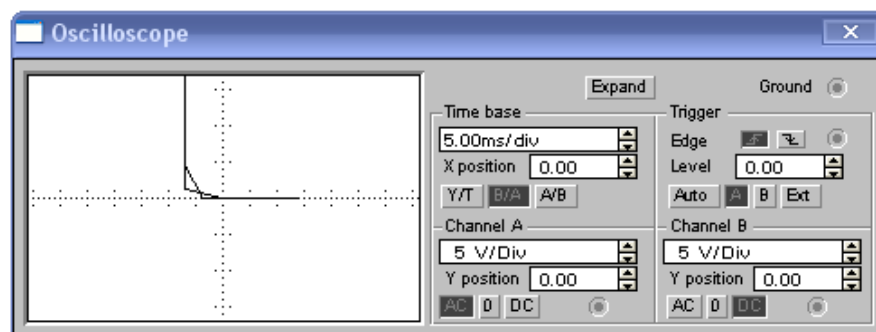


Рисунок 4.10 – Изображение входной ВАХ биполярного транзистора на осциллографе

4.12. Набрать на мониторе компьютера изображённую на рисунке 4.9 схему для исследования входных ВАХ биполярного транзистора на осциллографе в среде программы Electronics Workbench.

4.13. Набрать на мониторе компьютера изображённую на рисунке 4.11 схему для исследования выходных ВАХ биполярного транзистора на осциллографе в среде программы Electronics Workbench.

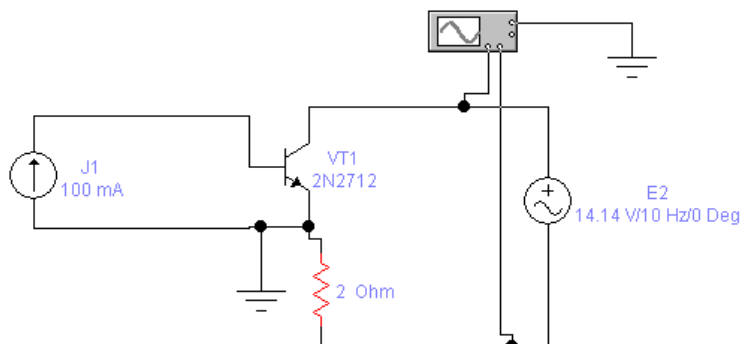


Рисунок 4.11 – Схема для исследования выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора на осциллографе

Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению осциллографа открыть изображение передней панели осциллографа с кнопками управления, информационными полями и экраном (рисунок 4.12). Перечертить графики (рисунок 4.12) в отчёт (или вывести на печать и приложить к отчёту) для разных значений токов источника  $J_1$ . Сравнить ВАХ, полученные в п.4.8.

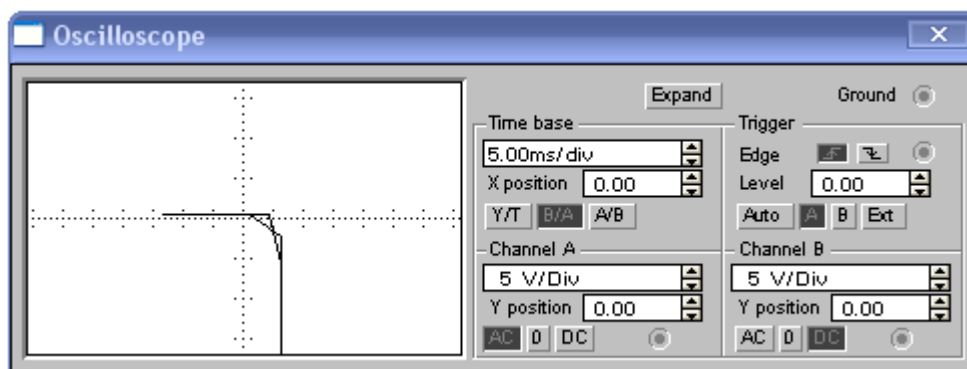


Рисунок 4.12 – Изображение выходной ВАХ биполярного транзистора на осциллографе

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать цель работы, исследуемые схемы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицы с экспериментальными



результатами, графики полученных характеристик, построенные в масштабе. Характеристики одного типа строятся для сравнения в одних координатах. В отчёте также приводятся результаты расчётов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Объяснить принцип действия биполярного транзистора.
- 6.2. Объяснить входные и выходные статические характеристики транзистора в схеме с ОБ (ОЭ).
- 6.3. Каково влияние «модуляции базы» на статические характеристики?
- 6.4. Сравнить входные и выходные сопротивления транзисторов в схеме с ОБ и с ОЭ.
- 6.5. Объяснить усилительные свойства транзистора по току в схеме с ОБ (ОЭ).
- 6.6. Привести Т-образную схему замещения транзистора, дать характеристику ее элементам.
- 6.7. Дать понятие малосигнальным  $h$ -параметрам транзистора для схемы с ОБ и ОЭ, объяснить их физическую сущность и взаимосвязь между собой и с параметрами Т-образной схемы замещения.
- 6.8. Дать определение  $h$ -параметров по статическим характеристикам.
- 6.9. Начертить схему замещения транзистора в  $h$ -параметрах.
- 6.10. Объяснить работу транзистора с нагрузкой в коллекторной цепи.
- 6.11. Построить нагрузочную прямую, определить усилительные свойства по напряжению транзистора с нагрузкой по статическим характеристикам.
- 6.12. Объяснить влияние коллекторного сопротивления  $R_K$  и напряжения питания  $E_K$  на положение нагрузочной прямой и усилительные свойства транзистора с нагрузкой.
- 6.13. Дать анализ усилительных свойств транзистора с нагрузкой по схеме замещения в  $h$ -параметрах.

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целями работы являются:

- исследование работы выпрямителей переменного напряжения на примере схем: однополупериодной, двухполупериодной со средней точкой, однофазной мостовой, трёхфазной с нулевой точкой и трехфазной мостовой;
- ознакомление с принципом действия и основными характеристиками сглаживающих фильтров.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Выпрямителем называется устройство, преобразующее энергию переменного тока в энергию постоянного тока.

Схемы выпрямителей строятся в большинстве случаев на полупроводниковых диодах и тиристорах.

Основными показателями работы выпрямителей являются:

- среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке  $U_{н. ср}$ ;
- среднее значение выпрямленного тока в нагрузке  $I_{н. ср}$ ;
- среднее значение прямого тока через диод (тиристор)  $I_{пр. ср}$ ;
- максимальное обратное напряжение на закрытом диоде (тиристоре)

$U_{обр. max}$ .

**Однофазный однополупериодный выпрямитель.** Схема однофазного однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой и трансформатором приведена на рисунке 5.1, *а*. Выпрямитель состоит из одного диода  $VD$ , через который вторичная обмотка трансформатора  $T$  подключена к нагрузочному резистору  $R_n$ . Первичная обмотка трансформатора  $T$  подключена к питающей сети с напряжением  $u_1$ .

Работу выпрямителей удобно рассматривать с помощью временных диаграмм. На рисунке 5.1, *б* приведены временные диаграммы, поясняющие работу однополупериодного выпрямителя. В течение первого полупериода (от 0 до  $\pi$ ) напряжения  $u_2$  верхний вывод вторичной обмотки трансформатора  $T$  имеет более высокий потенциал, чем нижний (полярность напряжения  $u_2$  указана на рисунке 5.1, *а* без скобок). При этом напряжение  $u_2$  приложено к диоду  $VD$  в прямом направлении, диод  $VD$  открыт и в цепи под действием

напряжения  $u_2$  протекает ток  $i_H = i_2$ . Так как диод  $VD$  идеален, то протекающий через него ток  $i_H$  не создает на нем падения напряжения и всё напряжение  $u_2$  в этот полупериод будет приложено к нагрузке  $R_H$ , т. е.  $u_H = u_2$ . Так как нагрузка имеет активный характер, то форма тока нагрузки  $i_H$  повторяет форму напряжения  $u_H$  (рисунок 5.1, б).

В течение второго полупериода (от  $\pi$  до  $2\pi$ ) напряжения  $u_2$  нижний вывод вторичной обмотки трансформатора  $T$  имеет более высокий потенциал, чем верхний (полярность напряжения  $u_2$  указана на рисунке 5.1, а в скобках). В этом случае напряжение  $u_2$  приложено к диоду  $VD$  в обратном направлении, диод  $VD$  закрыт и ток в цепи не протекает. Так как диод  $VD$  идеален, то все напряжение  $u_2$  будет приложено к закрытому диоду, т.е.  $u_{VD} = u_2$ .

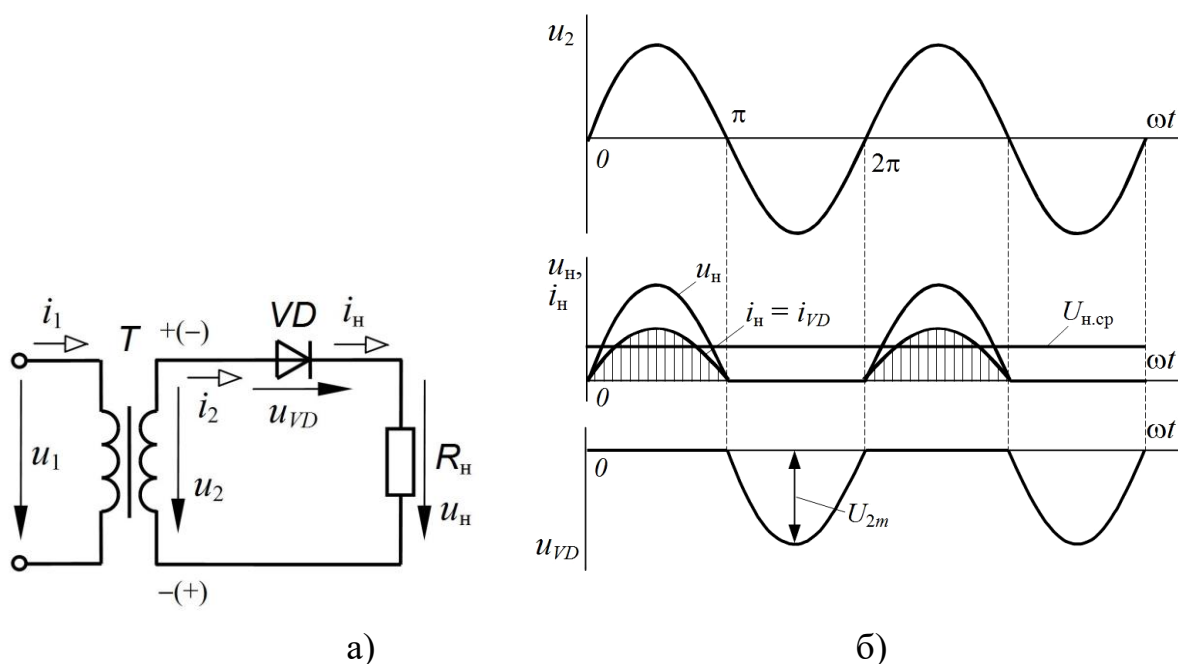


Рисунок 5.1 – Схема (а) и временные диаграммы (б) токов и напряжений однофазного однополупериодного выпрямителя

Из временных диаграмм (рисунок 5.1, б) видно, что напряжение на нагрузке  $u_H$  имеет одну полярность и пульсирующий характер.

Основные показатели работы однофазного однополупериодного выпрямителя:

1) среднее значение напряжения на нагрузке:

$$U_{H,ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} \left( -\cos \omega t \Big|_0^{\pi} \right) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{2\pi} \approx 0,45U_2; \quad (5.1)$$

2) среднее значение тока в нагрузке:

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_H} \approx \frac{0,45U_2}{R_H}; \quad (5.2)$$

3) среднее значение прямого тока через диод (так как весь ток нагрузки протекает через диод  $VD$ ) определяется выражением:

$$I_{пр.ср} = I_{н.ср};$$

4) максимальное обратное напряжение, приложенное к закрытому диоду, равно амплитуде напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  (рисунки 5.1, б):

$$U_{обр.макс} = \sqrt{2}U_2. \quad (5.3)$$

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота. К недостаткам следует отнести: большой коэффициент пульсаций, малые значения выпрямленного напряжения и тока. Кроме того, ток  $i_2$  вторичной обмотки трансформатора  $T$  имеет постоянную составляющую, которая вызывает подмагничивание сердечника трансформатора, что снижает индуктивность его обмоток. Это приводит к росту тока холостого хода трансформатора, и, следовательно, к снижению КПД всего выпрямителя.

Однополупериодные выпрямители применяются обычно для питания высокоомных нагрузочных устройств, допускающих повышенную пульсацию напряжения.

**Однофазный нулевой выпрямитель.** Другое его название – выпрямитель с выводом средней или нулевой точки вторичной обмотки трансформатора. Схема однофазного нулевого выпрямителя приведена на рисунке 5.2, а. Данный выпрямитель является двухполупериодным и его можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей на диодах  $VD1$  и  $VD2$ , работающих на один и тот же нагрузочный резистор  $R_H$ . Вторичная обмотка трансформатора  $T$  имеет вывод средней точки и содержит две секции с одинаковыми напряжениями  $u_2'$  и  $u_2''$ , равными  $u_2$ . Катоды диодов  $VD1$  и  $VD2$  соединены вместе и образуют «плюс» выпрямителя, а средняя (нулевая) точка вторичной обмотки трансформатора  $T$  – «минус». Первичная обмотка трансформатора  $T$  подключена к питающей сети с напряжением  $u_1$ .

На рисунке 5.2, б приведены временные диаграммы, поясняющие работу однофазного нулевого выпрямителя.

В течение первого полупериода (от 0 до  $\pi$ ) напряжения  $u_2$  верхние выводы секции вторичных обмоток трансформатора  $T$  имеют более высокий потенциал, чем нижние (полярность напряжений  $u_2'$  и  $u_2''$  указана на рисунке

5.2, а без скобок). При этом напряжение  $u_2'$  приложено к диоду  $VD1$  в прямом направлении, диод  $VD1$  открыт и под действием напряжения  $u_2'$  в верхнем контуре схемы протекает ток  $i_H = i_{VD1}$ . Одновременно напряжение  $u_2''$  приложено к диоду  $VD2$  в обратном направлении и он закрыт. Учитывая то, что диоды  $VD1$  и  $VD2$  идеальные, протекающий через диод  $VD1$  ток  $i_H$  не создает на нем падения напряжения и всё напряжение  $u_2'$  в первый полупериод будет приложено к нагрузке, т. е.  $u_H = u_2'$ .

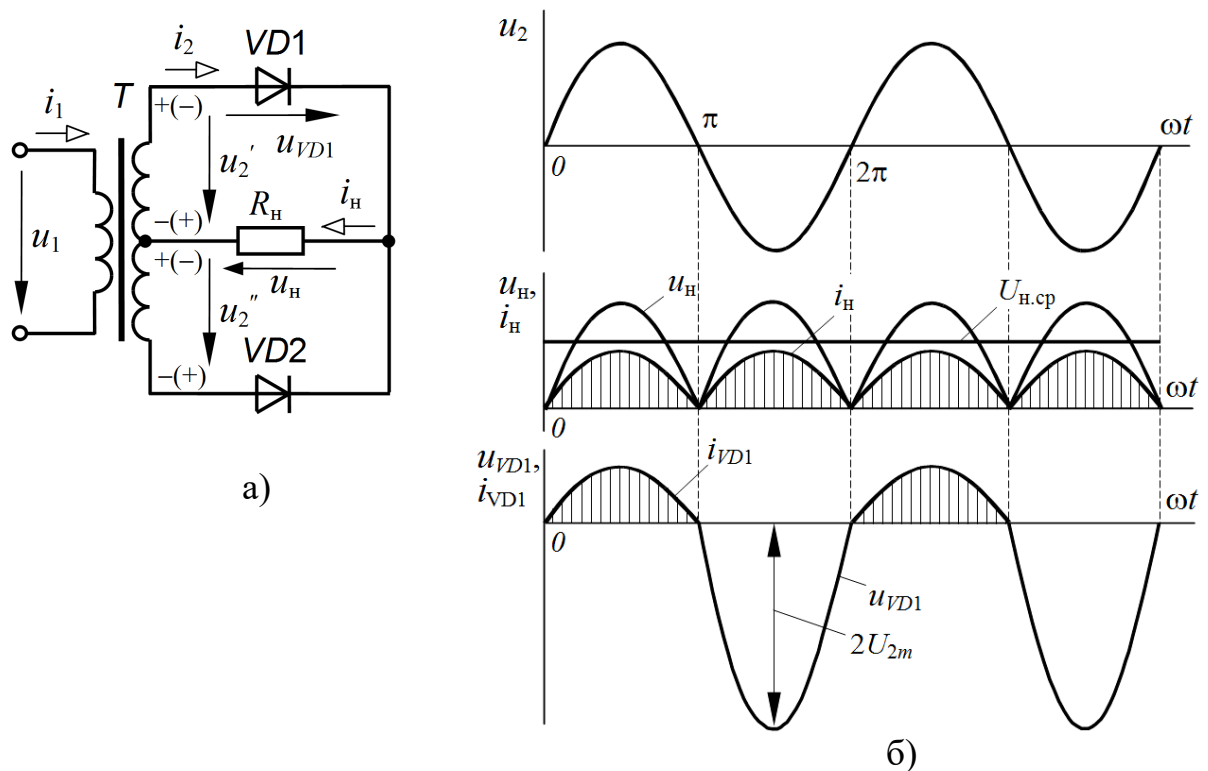


Рисунок 5.2 – Схема (а) и временные диаграммы (б) токов и напряжений однофазного нулевого выпрямителя

В течение второго полупериода (от  $\pi$  до  $2\pi$ ) напряжения  $u_2$  нижние выводы секций вторичных обмоток трансформатора  $T$  имеют более высокий потенциал, чем верхние (полярность напряжений  $u_2'$  и  $u_2''$  указана на рисунке 5.2, а в скобках). В этом случае напряжение  $u_2''$  приложено к диоду  $VD2$  в прямом направлении, он открыт, а напряжение  $u_2'$  приложено к диоду  $VD1$  в обратном направлении и он закрыт.

В нижнем контуре схемы под действием напряжения  $u_2''$  протекает ток  $i_H = i_{VD2}$ , а так как диод  $VD2$  идеален, то все напряжение  $u_2''$  во второй полупериод будет приложено к нагрузке, т. е.  $u_H = u_2''$ . Следовательно, ток  $i_H$  в нагрузке  $R_H$  протекает в течение обоих полупериодов, а его форма повторяет форму напряжения  $u_H$ , т. к. нагрузка носит активный характер.

Из временных диаграмм (рисунок 5.2, б) видно, что напряжение на нагрузке  $u_n$  имеет одну полярность и пульсирующий характер.

Основные показатели работы однофазного нулевого выпрямителя:

1) среднее значение напряжения на нагрузке:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \left( -\cos \omega t \Big|_0^{\pi} \right) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,9U_2; \quad (5.4)$$

2) среднее значение тока в нагрузке:

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx \frac{0,9U_2}{R_n}; \quad (5.5)$$

3) среднее значение прямого тока через каждый диод (так как через диод протекает половина тока нагрузки  $I_{н.ср}$ ) определяется выражением:

$$I_{пр.ср} = I_{н.ср}/2.$$

4) максимальное обратное напряжение, приложенное к запертому диоду, равное в непроводящий полупериод удвоенному значению напряжения  $u_2$  секции вторичной обмотки трансформатора, определяется удвоенной амплитудой напряжения  $U_2$  (рисунок 5.2, б):

$$U_{обр\ max} = 2\sqrt{2}U_2. \quad (5.6)$$

Достоинством данного выпрямителя является небольшое (два) для двухполупериодного выпрямителя количество диодов. Анализ полученных соотношений показывает, что при одинаковых значениях параметров трансформатора  $T$  и нагрузки  $R_n$  однофазный нулевой выпрямитель по сравнению с однополупериодным имеет в два раза большие средние значения  $U_{н.ср}$  и  $I_{н.ср}$ , а коэффициент пульсации значительно меньше. Однако  $U_{обр\ max}$ , приложенное к диодам, имеет в два раза большее значение. Недостатками также являются большие габариты, масса и стоимость трансформатора, поскольку вторичная обмотка имеет две секции и требуется вывод средней точки обмотки.

**Однофазный мостовой выпрямитель.** Схема однофазного мостового выпрямителя приведена на рисунке 5.3, а. Выпрямитель также является двухполупериодным и содержит четыре диода  $VD1$ - $VD4$ , включенные по мостовой схеме. К одной диагонали моста подключена нагрузка  $R_n$ , а к другой – вторичная обмотка трансформатора  $T$  с напряжением  $u_2$ . Диоды  $VD1$  и  $VD3$ , у которых объединены катоды, образуют катодную группу и «плюс» выпрямителя. Два других диода  $VD2$  и  $VD4$ , у которых объединены аноды, образуют анодную группу и «минус» выпрямителя. В каждой из групп в любой момент

времени открыт только один диод.

Для упрощения анализа работы схем выпрямителей, имеющих анодную и (или) катодную группы соединений диодов, можно сформулировать следующие правила. В любой момент времени в катодной группе открыт диод с наибольшим потенциалом анода, а в анодной группе открыт диод с наименьшим потенциалом катода.

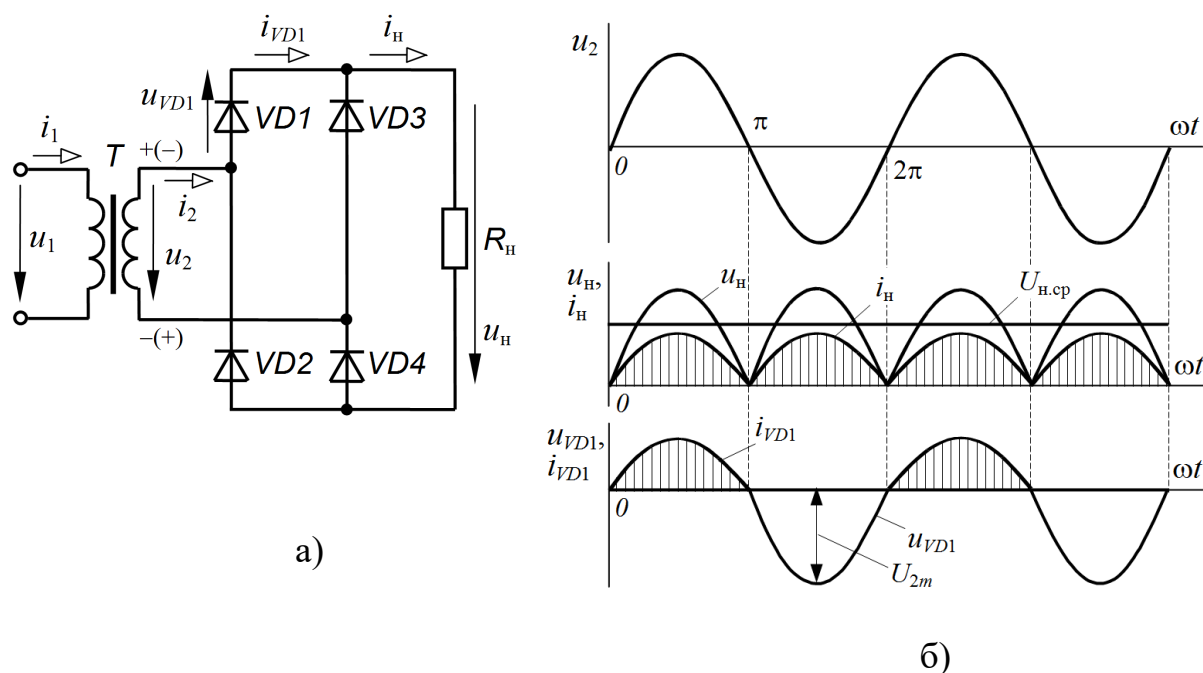


Рисунок 5.3 – Схема (а) и временные диаграммы (б) токов и напряжений однофазного мостового выпрямителя

На рисунке 5.3, б приведены временные диаграммы, поясняющие работу однофазного мостового выпрямителя. В течение первого полупериода (от 0 до  $\pi$ ) напряжения  $u_2$  верхний вывод вторичной обмотки трансформатора  $T$  имеет более высокий потенциал, чем нижний (полярность напряжения  $u_2$  указана на рисунке 5.3, а без скобок). При этом в катодной группе открыт диод  $VD1$ , имеющий более высокий потенциал анода, а в анодной группе открыт диод  $VD4$ , имеющий более низкий потенциал катода. К диодам  $VD2$  и  $VD3$  напряжение  $u_2$  приложено в обратном направлении и они закрыты. Ток в этот полупериод протекает по цепи: «плюс» вторичной обмотки трансформатора  $T$ , диод  $VD1$ , нагрузочный резистор  $R_n$ , диод  $VD4$  и «минус» вторичной обмотки трансформатора  $T$ . Учитывая то, что диоды идеальные, все напряжение  $u_2$  в этот полупериод будет приложено к нагрузке, т. е.  $u_H = u_2$ .

В течение второго полупериода (от  $\pi$  до  $2\pi$ ) напряжения  $u_2$  нижний вывод вторичной обмотки трансформатора  $T$  имеет более высокий потенциал,

чем верхний (полярность напряжения  $u_2$  указана на рисунке 5.3, *a* в скобках). При этом в катодной группе открыт диод  $VD3$ , имеющий более высокий потенциал анода, а в анодной группе открыт диод  $VD2$ , имеющий более низкий потенциал катода. К диодам  $VD1$  и  $VD4$  напряжение  $u_2$  приложено в обратном направлении и они закрыты. Ток в этот полупериод протекает по цепи: «плюс» вторичной обмотки трансформатора  $T$ , диод  $VD3$ , нагрузочный резистор  $R_n$ , диод  $VD2$  и «минус» вторичной обмотки трансформатора  $T$ . При этом всё напряжение  $u_2$  в этот полупериод будет приложено к нагрузке в той же полярности, что и в первый полупериод, т. е.  $u_n = u_2$ . В результате ток в нагрузке  $R_n$  имеет одно и то же направление в течение всего периода. Форма тока в нагрузке  $i_n$  повторяет форму напряжения  $u_n$ , т. к. нагрузка носит активный характер.

Основные показатели работы однофазного мостового выпрямителя:

1) среднее значение напряжения на нагрузке:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \left( -\cos \omega t \Big|_0^{\pi} \right) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,9U_2; \quad (5.7)$$

2) среднее значение тока в нагрузке:

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx \frac{0,9U_2}{R_n}; \quad (5.8)$$

3) среднее значение прямого тока через каждый диод, так как через диод протекает половина тока нагрузки  $I_{н.ср}$ , определяется выражением:

$$I_{пр.ср} = I_{н.ср} / 2;$$

4) максимальное обратное напряжение, приложенное к закрытому диоду, определяется в непроводящий полупериод величиной  $u_2$  (рисунок 5.2, *б*):

$$U_{обр.маx} = \sqrt{2}U_2. \quad (5.9)$$

По сравнению с однофазным нулевым выпрямителем мостовой выпрямитель при одинаковых значениях  $U_2$  и  $R_n$  имеет следующие преимущества: напряжение  $U_{обр.маx}$  в два раза меньше, отсутствует вывод средней точки вторичной обмотки трансформатора, меньше габариты и масса трансформатора. Недостатком является вдвое большее число диодов выпрямителя.

**Трёхфазный нулевой выпрямитель.** Схема трёхфазного нулевого выпрямителя приведена на рисунке 5.4, *a*. Выпрямитель состоит из трех диодов  $VD1$ – $VD3$ , включенных в каждую фазу вторичной обмотки трехфазного трансформатора  $T$  с фазным напряжением  $U_{2ф}$ . Катоды диодов  $VD1$ – $VD3$  и



один из выводов нагрузочного резистора  $R_H$  объединены и образуют плюс выпрямителя. Нейтральная точка вторичной обмотки трансформатора  $T$ , соединенной звездой, подключена к другому выводу нагрузочного резистора  $R_H$  и образует минус выпрямителя. Первичная обмотка трансформатора  $T$  соединена в звезду и подключена к трехфазной сети с фазным напряжением  $U_{1\phi}$ .

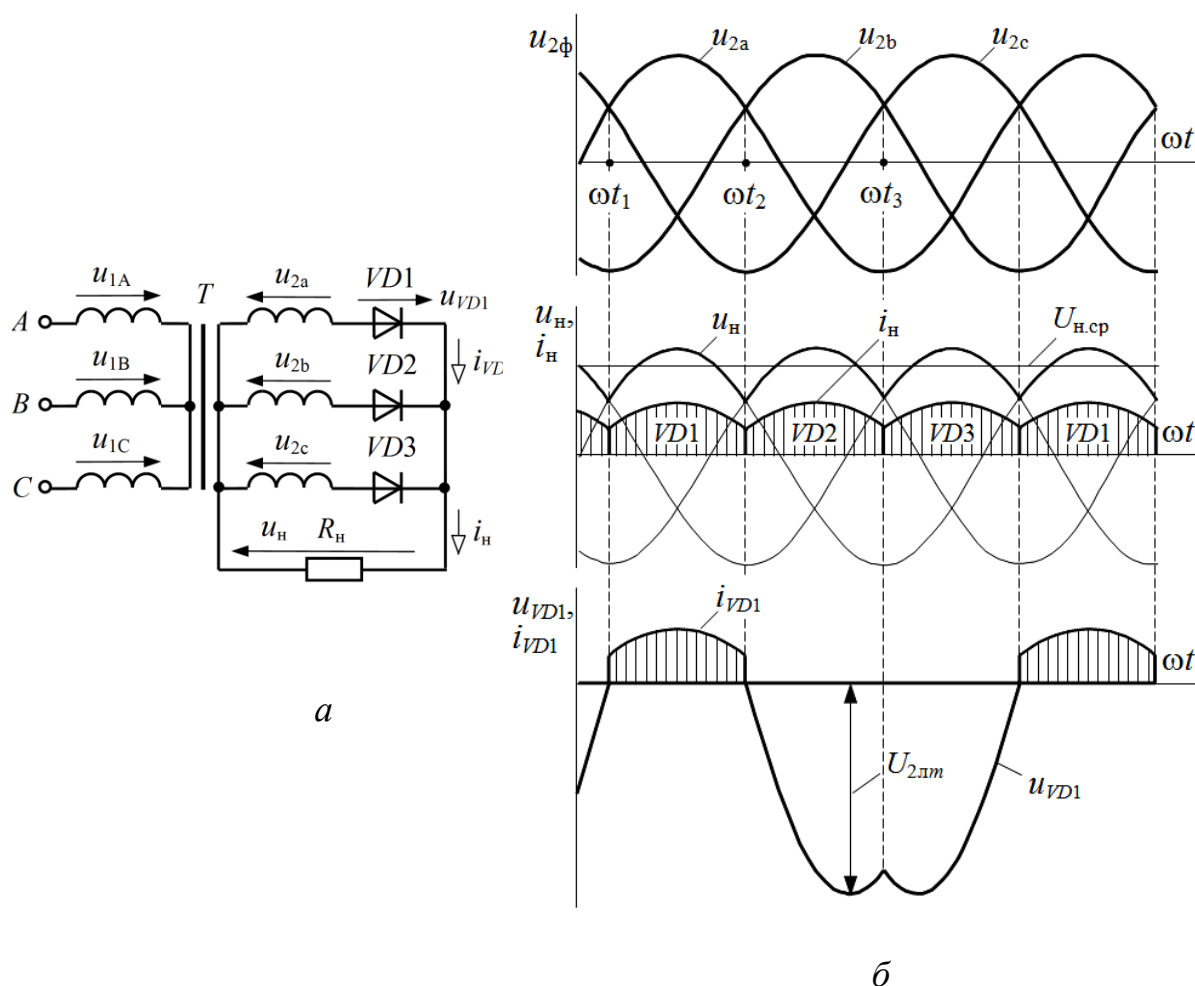


Рисунок 5.4 – Схема (а) и временные диаграммы (б) токов и напряжений трёхфазного выпрямителя с нулевой точкой

На рисунке 5.4, б приведены временные диаграммы, поясняющие работу трехфазного нулевого выпрямителя. Поскольку катоды диодов объединены, то в любой момент времени в схеме (рисунок 5.4, а) открыт тот диод, у которого потенциал анода выше. Так, в интервале времени  $t_1 - t_2$  максимальное значение имеет напряжение  $u_{2a}$  во вторичной обмотке фазы А, следовательно, потенциал анода диода  $VD1$  выше, чем у остальных, и диод  $VD1$  открыт. Так как диод идеален, то всё напряжение  $u_{2a}$  в этом интервале приложено к нагрузке  $R_H$  (рисунок 5.4, б). В интервале времени  $t_2 - t_3$  максимальное значение имеет напряжение  $u_{2b}$  в фазе В, следовательно, открыт диод  $VD2$  и к

нагрузке  $R_H$  в этом интервале приложено всё напряжение  $u_{2b}$ . В интервале времени  $t_3 - t_4$  максимальное значение имеет напряжение  $u_{2c}$  в фазе  $C$ , следовательно, открыт диод  $VD3$  и к нагрузке  $R_H$  в этом интервале приложено всё напряжение  $u_{2c}$ . В результате напряжение  $u_H$  на нагрузке  $R_H$  представляет собой огибающую положительных полуволн фазных напряжений  $u_{2\phi}$  (рисунок 5.4, б).

Длительность интервала проводимости каждого диода составляет третью часть периода или  $120^\circ$ . Так как нагрузка носит активный характер, то форма тока в нагрузке  $i_H$  повторяет форму напряжения  $u_H$ , (рисунок 5.4, б).

Основные показатели работы трёхфазного нулевого выпрямителя:

1) среднее значение напряжения на нагрузке:

$$U_{H.c.p.} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}U_{2\phi} \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}U_{2\phi}}{2\pi} \left( \sin \omega t \Big|_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} \right) =$$

$$= \frac{3\sqrt{6}U_{2\phi}}{2\pi} \approx 1,17U_{2\phi}; \quad (5.10)$$

2) среднее значение тока в нагрузке:

$$I_{H.c.p.} = \frac{U_{H.c.p.}}{R_H} \approx \frac{1,17U_{2\phi}}{R_H}; \quad (5.11)$$

3) среднее значение прямого тока через каждый диод определяется 1/3 частью ток нагрузки  $I_{H.c.p.}$ :

$$I_{пр.ср} = I_{H.c.p.}/3;$$

4) максимальное обратное напряжение, приложенное к закрытому диоду, равное в непроводящий полупериод напряжению  $u_{2л}$  (рисунок 5.4, б):

$$U_{обр\max} = \sqrt{2}U_{2л} \quad (5.12)$$

Трёхфазный нулевой выпрямитель используется для питания нагрузочных устройств средней и большой мощности. Достоинством такого выпрямителя является достаточно высокая надежность, что определяется минимальным количеством диодов. К недостаткам следует отнести подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током, что приводит к снижению КПД выпрямителя.

**Трёхфазный мостовой выпрямитель.** Схема трёхфазного мостового выпрямителя приведена на рисунке 5.5. Выпрямитель состоит из шести дио-

дов  $VD1$ - $VD6$ , включенных по мостовой схеме (схема Ларионова). Вход выпрямителя подключен к выводам вторичной обмотки трёхфазного трансформатора  $T$ , соединенной по схеме «звезда», с фазным напряжением  $U_{2ф}$ . Диоды  $VD1$ ,  $VD3$ ,  $VD5$ , у которых объединены катоды, образуют катодную группу и плюс выпрямителя. Диоды  $VD2$ ,  $VD4$ ,  $VD6$ , у которых объединены аноды, образуют анодную группу и минус выпрямителя. К выходу выпрямителя подключен нагрузочный резистор  $R_n$ .

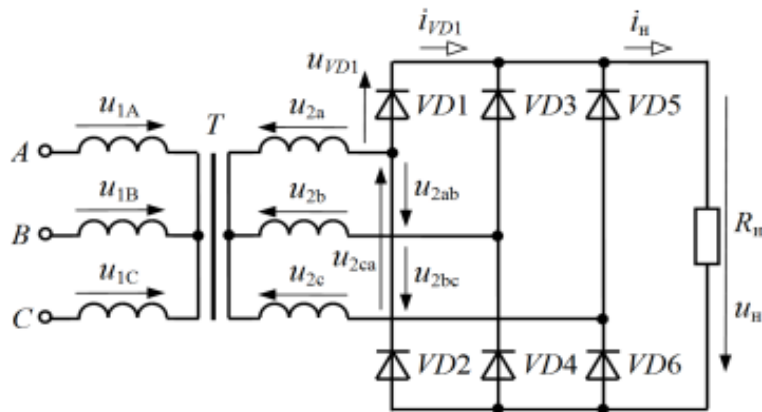


Рисунок 5.5 – Схема трёхфазного мостового выпрямителя

На рисунке 5.6 приведены временные диаграммы, поясняющие работу трёхфазного мостового выпрямителя. Диоды работают попарно – один из катодной и один из анодной группы. В интервале времени  $t_1 - t_2$  в схеме открыты диоды  $VD1$ ,  $VD4$  и к нагрузке  $R_n$  приложено линейное напряжение  $u_{2ab}$ . В интервале времени  $t_2 - t_3$  открыты диоды  $VD1$ ,  $VD6$  и к нагрузке приложено напряжение  $-u_{2ca}$ . В интервале времени  $t_3 - t_4$  открыты диоды  $VD3$ ,  $VD6$  и к нагрузке приложено напряжение  $u_{2bc}$ . В интервале  $t_4 - t_5$  открыты диоды  $VD2$ ,  $VD3$  и к нагрузке приложено напряжение  $-u_{2ab}$ . В интервале  $t_5 - t_6$  открыты диоды  $VD2$ ,  $VD5$  и к нагрузке приложено напряжение  $u_{2ca}$ . В интервале  $t_6 - t_7$  открыты диоды  $VD4$ ,  $VD5$  и к нагрузке приложено напряжение  $-u_{2bc}$ . Таким образом, учитывая, что диоды идеальные, напряжение на нагрузке  $u_n$  состоит из участков линейных напряжений  $u_{2ab}$ ,  $-u_{2ca}$ ,  $u_{2bc}$ ,  $-u_{2ab}$ ,  $u_{2ca}$ ,  $-u_{2bc}$  продолжительностью по  $60^\circ$  (рисунок 5.6).

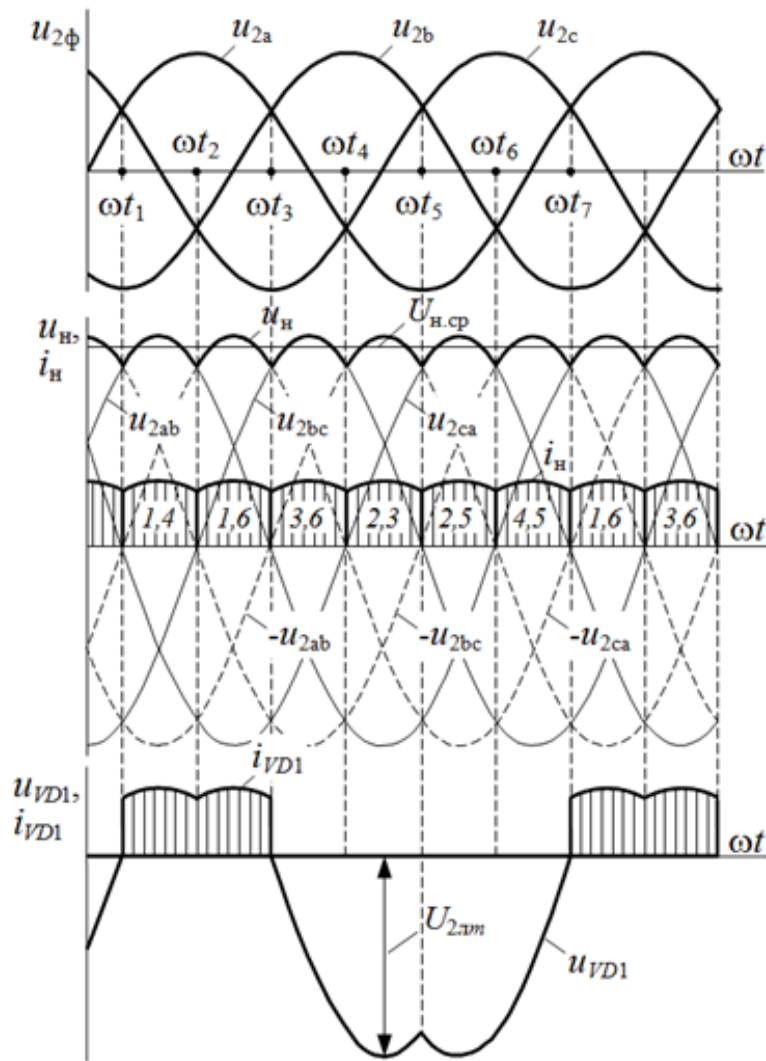


Рисунок 5.6 – Временные диаграммы токов и напряжений трёхфазного мостового выпрямителя

Основные показатели работы трёхфазного нулевого выпрямителя:

1) среднее значение напряжения на нагрузке:

$$\begin{aligned}
 U_{н.ср} &= \frac{1}{\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \sqrt{2}U_{2л} \cos \omega t d\omega t = \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U_{2л}}{\pi} \left( \sin \omega t \Big|_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \right) = \frac{3\sqrt{2}U_{2л}}{\pi} \approx 1,35U_{2л} = 2,34U_{2ф}; \quad (5.13)
 \end{aligned}$$

2) среднее значение тока в нагрузке:

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_H} \approx \frac{1,17U_{2\phi}}{R_H}; \quad (5.14)$$

3) среднее значение прямого тока через диод определяется временем работы – 1/3 часть периода:

$$I_{пр. ср} = I_{н. ср} / 3;$$

4) максимальное обратное напряжение, приложенное к закрытому диоду, определяемое напряжением  $u_{2л}$  (рисунок 5.6):

$$U_{обр..max} = \sqrt{2}U_{2л} \quad (5.15)$$

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Подготовить протокол исследования схем выпрямителей и временные диаграммы их работы.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Запустить на компьютере программу Electronics Workbench.

4.2. Исследуйте работу однофазного однополупериодного выпрямителя, для этого соберите схему, изображённую на рисунке 5.7.

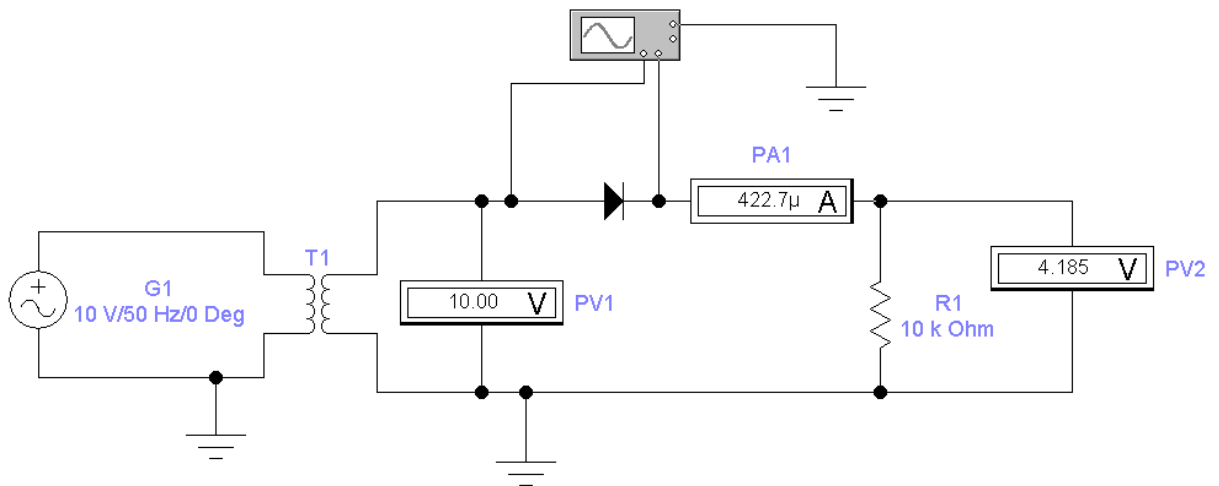


Рисунок 5.7 – Схема для исследования однофазного однополупериодного выпрямителя в среде моделирования Electronics Workbench

4.2.1. Установите во вкладке *Value* (значение) источника переменного напряжения величину напряжения  $U_1$  согласно индивидуальному варианту (таблица 5.1), частоту сигнала – 50 Гц, фазу – ноль градусов. Величину сопротивления  $R1$ , выполняющего роль нагрузки, установите равную 10 кОм. Параметры трансформатора оставьте по умолчанию. Обратите внимание,

чтобы на канал  $A$  осциллографа поступал сигнал со входа диода  $VD$ , а на канал  $B$  – сигнал с выхода диода  $VD$ .

Таблица 5.1 – Напряжение источника согласно индивидуальному варианту

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_1, B$	10	15	20	25	30	35	40	12	18	22
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_1, B$	8	14	24	32	36	45	42	28	9	6
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$U_1, B$	38	45	50	55	60	65	70	75	80	85

4.2.2. Включите схему клавишей в правом верхнем углу экран. Настройте на осциллографе необходимые параметры моделирования: величину чувствительности каналов ( $V/Div$ ) такой, чтобы амплитуда сигнала не выходила за границы экрана, а временную развёртку ( $Time\ base$ ) – в 3-4 периода (рисунок 5.8). Режимы по входу каналов выберите  $DC$ . Чтобы осциллограммы было удобно наблюдать, и они не накладывались друг на друга, на лицевой панели осциллографа в разделе *Channel B* установите чувствительность канала  $B$  чуть меньше величины канала  $A$ . Нарисуйте полученные осциллограммы (или снимите скриншот).

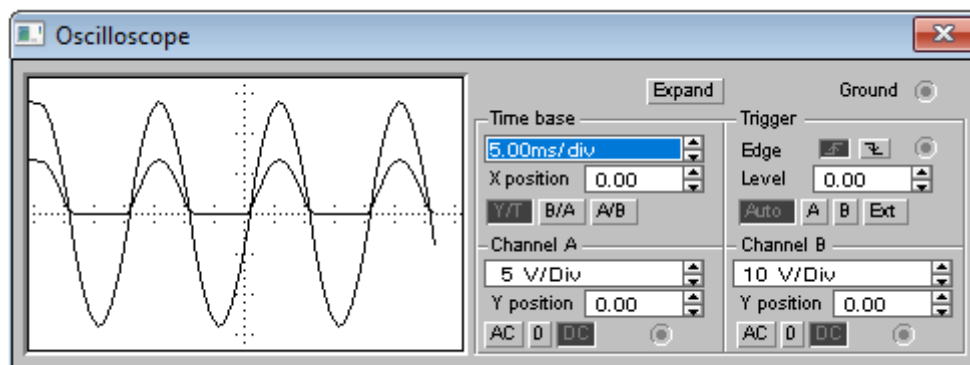


Рисунок 5.8 – Изображения входной (канал  $B$ ) и выходной (канал  $A$ ) осциллограмм для однополупериодного выпрямителя (каналы  $A$  и  $B$  имеют различную чувствительностью для устранения наложения сигналов)

4.3. Измерьте максимальные (по осциллографу), действующее (по вольтметру  $PV1$ ) и среднее выпрямленное (по вольтметру  $PV2$ ) значения входных и выходных напряжений, а также ток через нагрузку (по амперметру  $PA1$ ). При этом, вольтметр  $PV1$  должен быть настроен на измерение переменного

напряжения, а вольтметр  $PV2$  и амперметр  $PA1$  на измерение постоянных величин. Результаты измерений запишите в таблицу 5.2.

4.4. Определите по осциллографу максимальное обратное напряжение  $U_{обр.мах}$  на диоде, подключив, например, вход  $A$  осциллографа к аноду диода, а общий вход осциллографа к катоду диода. Запишите результат в таблицу 5.2 и зарисуйте полученные диаграммы (или снимите скриншот).

4.5. Вычислите среднее значение выходного напряжения  $U_{н.ср}$  (постоянная составляющая), среднее значение тока через нагрузку  $I_{н.ср}$  и обратное максимальное напряжение на диоде  $U_{обр.мах}$  по формулам (18-20). Сравните их с измеренными по п.п. 4.3-4.4, записав результаты в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты исследований и расчётов

Схема выпрямителя		$U_{1max},$ $B$	$U_2,$ $B$	$U_{н.ср},$ $B$	$U_{обр.мах},$ $B$	$I_{н. ср},$ $A$
Однофазный однополупериодный	опыт					
	расчёт					
Однофазный с нулевой точкой	опыт					
	расчёт					
Однофазный мостовой	опыт					
	расчёт					

4.6. Исследуйте работу однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой, для этого соберите схему, изображённую на рисунке 5.9. На вход  $A$  осциллографа подается входной сигнал (величину входного напряжения установить согласно таблице 5.1), а на вход  $B$  - выходной. При этом по входу  $A$  осциллографа установите режим  $AC$  (наблюдается только переменный сигнал), а по вход  $B$  режим  $DC$  (наблюдается переменная и постоянная составляющие сигнала). Сопротивление  $R = 10$  кОм. Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рисунок 5.10).

4.7. Выполните исследование данного выпрямителя, выполнив для него п.п. 4.3-4.5. Заполните таблицу 5.2 с результатами этого исследования.

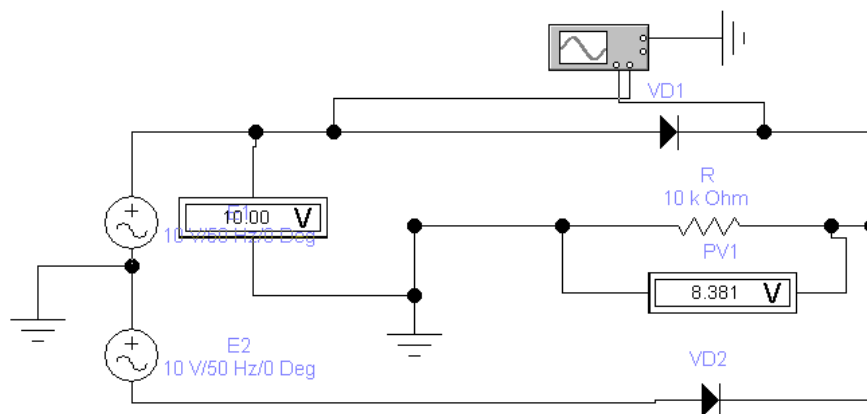


Рисунок 5.9 – Схема для исследования однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой в среде моделирования Electronics Workbench

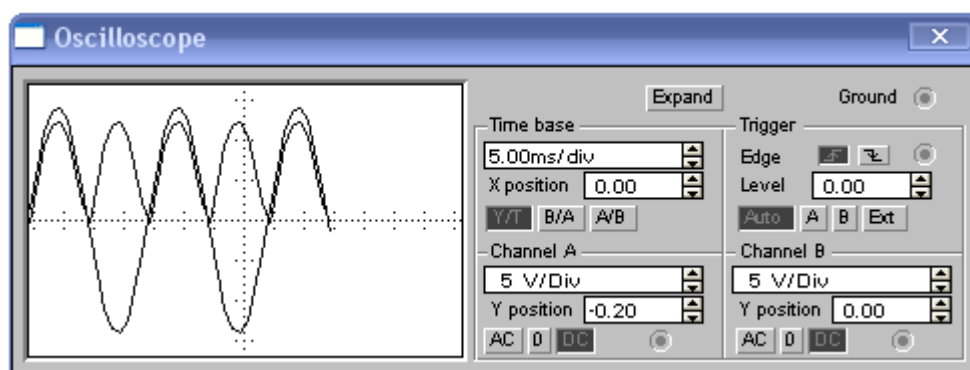


Рисунок 5.10 – Изображения осциллограмм для двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой

4.8. Исследуйте работу однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя, для этого соберите схему, изображённую на рисунке 5.11. На вход *A* осциллографа подается входной сигнал (величину входного напряжения установите согласно таблице 5.1), а на вход *B* - выходной. Сопротивление  $R = 10$  кОм. Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рисунок 5.12).

4.9. Выполните исследование данного выпрямителя, выполнив для него п.п. 4.3-4.5. Заполните таблицу 5.2 с результатами этого исследования.



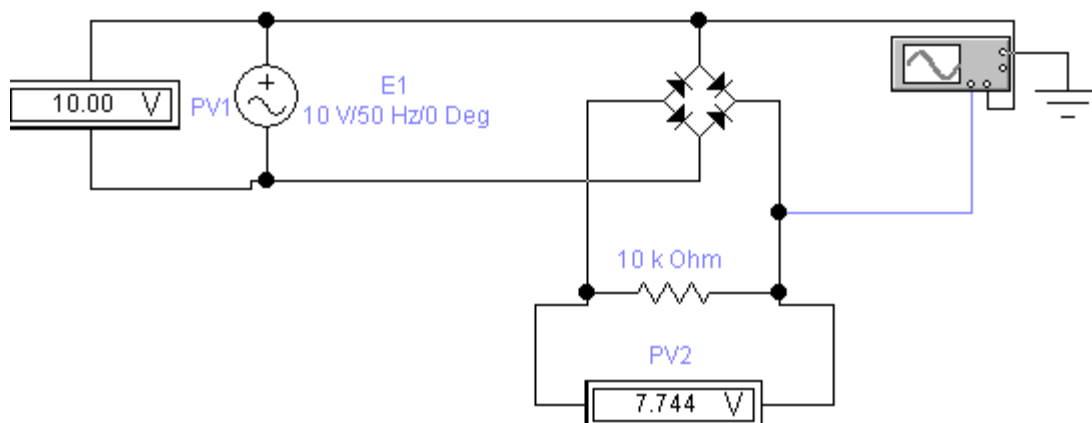


Рисунок 5.11 – Схема для исследования однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя

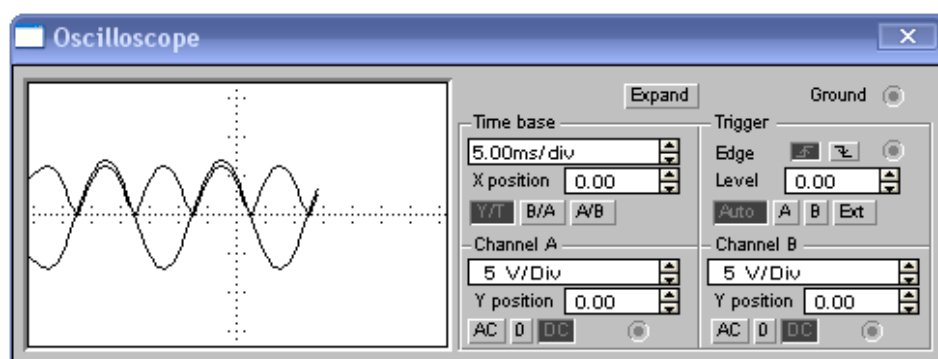


Рисунок 5.12 – Изображения осциллограмм для однофазного мостового выпрямителя

4.10. Исследуйте работу трёхфазного выпрямителя с нулевой точкой, для этого соберите схему, изображённую на рисунке 5.13. Установить угол сдвига напряжения 0, 120, 240 градусов в фазах VD1, VD2, VD3 соответственно. На вход *A* осциллографа подается входной сигнал (величину входного напряжения установите согласно таблице 5.1), а на вход *B* - выходной. Сопротивление  $R=10$  кОм. Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рисунок 5.14).

4.11. Выполните исследование данного выпрямителя, выполнив для него п.п. 4.3-4.5. Заполните таблицу 5.3 с результатами этого исследования.

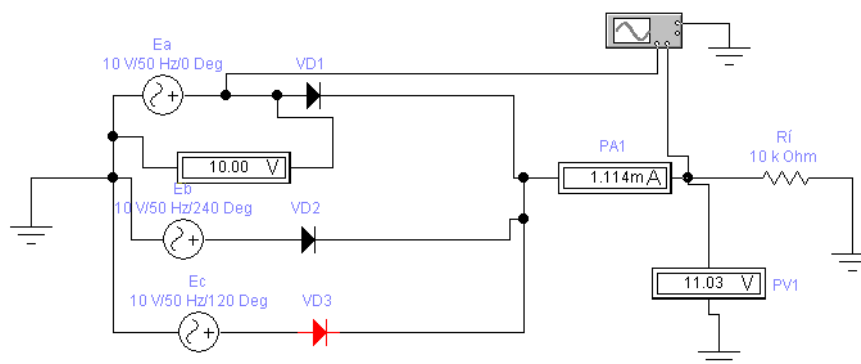


Рисунок 5.13 – Схема для исследования трехфазного выпрямителя с нулевой точкой

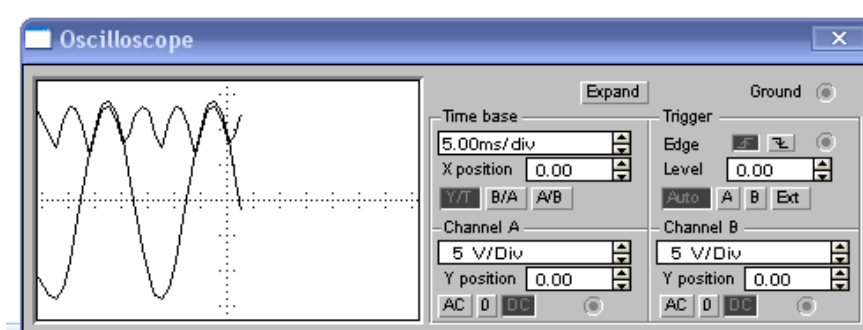


Рисунок 5.14 – Изображения осциллограмм для трёхфазного выпрямителя с нулевой точкой

Таблица 5.3

Схема выпрямителя		$U_{1max}, B$	$U_{н.ср}, B$	$U_{обр..max}, B$	$I_{н.ср}, A$
Трёхфазный с нулевой точкой	опыт				
	расчет				
Трёхфазный мостовой	опыт				
	расчет				

4.12. Исследуйте работу трёхфазного мостового выпрямителя, для этого соберите схему, изображённую на рисунке 5.15. Установить угол сдвига напряжения 0, 120, 240 градусов в фазах VD1, VD2, VD3 соответственно. На вход A осциллографа подается входной сигнал (величину входного напряжения установить согласно таблице 5.1), а на вход B – выходной. Сопротивление  $R = 10 \text{ кОм}$ . Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рисунок 5.16).

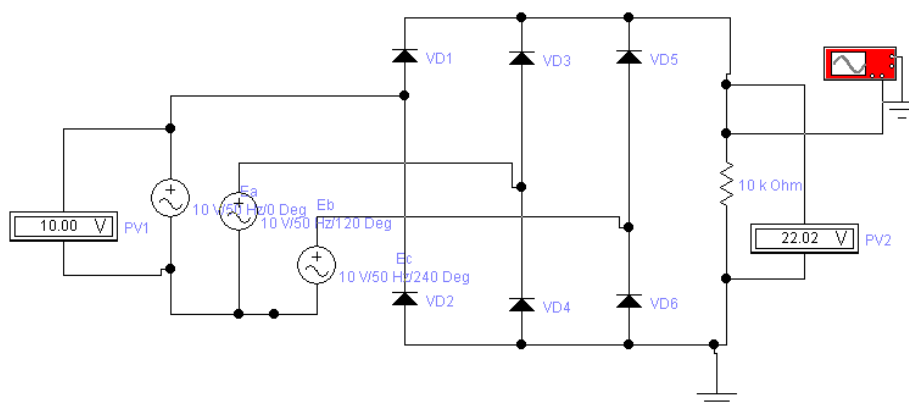


Рисунок 5.15 – Схема исследования трёхфазного мостового выпрямителя

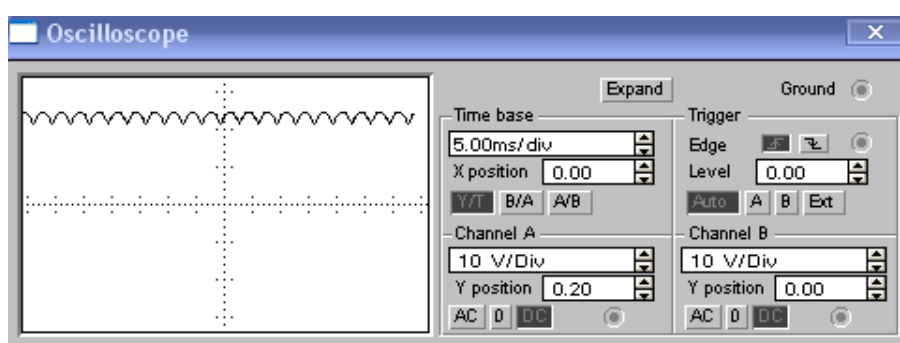


Рисунок 5.16 – Изображения выходных осциллограмм для трёхфазного мостового выпрямителя

4.13. Выполните исследование данного выпрямителя, выполнив для него п.п. 4.3-4.5. Заполните таблицу 5.3 с результатами этого исследования.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

В состав отчёта входят: титульный лист формализованного образца (приложение А); протокол исследования, который должен содержать номер и название лабораторной работы, её цели, исследуемые схемы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицы с экспериментальными результатами, графики полученных характеристик, построенные в масштабе (или их скриншоты). Характеристики одного типа строятся для сравнения в одних координатах. В отчёте приводятся также выполненные расчёты и делаются выводы по результатам исследования.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какое устройство называют выпрямителем? Объяснить принцип работы выпрямителя, используя структурную схему.

6.2. Для каких целей применяют выпрямители средней и большой мощности?

6.3. Какую роль играет трансформатор в схемах диодных выпрямителей?

6.4. В чём заключается принцип выпрямления в однофазном однополупериодном выпрямителе? Привести временные диаграммы работы.

6.5. В чём отличие двухполупериодного выпрямителя от однополупериодного? Как определяется значение среднего выпрямленного напряжения?

6.6. Объясните, как происходит процесс выпрямления в схеме мостового выпрямителя. Приведите схему и временные диаграммы.

6.7. Одинаковы ли частоты входного и выходного напряжения выпрямительного моста? Как они соотносятся с частотами входного и выходного напряжений двухполупериодного выпрямителя?

6.8. Как соотносятся токи и напряжения на входе и выходе трехфазного выпрямителя с нулевой точкой? Объясните принцип его работы. Приведите схему и временные диаграммы.

6.9. Как соотносятся токи и напряжения на входе и выходе трехфазного мостового выпрямителя? Объясните принцип его работы. Приведите схему и временные диаграммы.

## 6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить схемы и принцип работы параметрического стабилизатора постоянного напряжения. Исследовать основные характеристики параметрического стабилизатора.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Стабилизатор является составной частью выпрямительного устройства и служит для поддержания неизменным (в определенном допуске) напряжения на нагрузке, которое может меняться под действием различных дестабилизирующих факторов. Такими факторами могут быть, например, колебания напряжения сети, изменения сопротивления нагрузки.

При увеличении напряжения на входе параметрического стабилизатора напряжения ток через стабилитрон в соответствии с его ВАХ резко увеличивается (рисунок 6.1), что приводит к увеличению тока через балластный резистор  $R_6$  и соответствующему увеличению падения напряжения на этом резисторе  $U_{R6}$ . Напряжение на стабилитроне, а, следовательно, и на нагрузке (резистор  $R_H$ ) при этом практически не меняются.

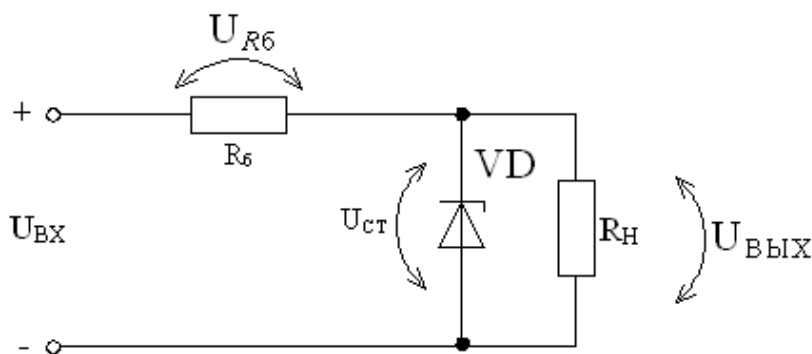


Рисунок 6.1 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

При уменьшении напряжения, наоборот, падение напряжения на  $R_6$  уменьшается таким образом, что напряжение на стабилитроне и нагрузке остается неизменным.

Значение изменения напряжения на стабилитроне  $VD$  ( $\pm \Delta U_H$ ) зависит от изменения входного напряжения  $\pm U_{BX}$ , сопротивления балластного резистора  $R_6$  и дифференциального сопротивления стабилитрона  $r_d = \frac{\delta U_{см}}{\delta I_{см}}$ .

2.2. Качество работы стабилизатора характеризуется следующими числовыми параметрами:

1) коэффициент стабилизации по напряжению:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх\text{ном}}}{\Delta U_{вых} / U_{вых\text{ном}}}, \quad (6.1)$$

где  $\Delta U_{вх}, \Delta U_{вых}$  – абсолютные приращения входного и выходного напряжения стабилизатора соответственно;

2) выходное сопротивление:

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_H, \quad (6.2)$$

где  $\Delta I_H$  – абсолютное приращение тока нагрузки.

По способу стабилизации стабилизаторы делятся на параметрические и компенсационные.

2.3. Основным элементом стабилизатора является полупроводниковый стабилитрон VD. Обратная ветвь вольтамперной характеристики (ВАХ) стабилитрона имеет участок стабилизации, на котором напряжение стабилитрона зависит от тока очень незначительно (рисунок 6.2). Учитывая, что стабилитрон имеет нелинейную ВАХ, для описания работы параметрического стабилизатора напряжения можно использовать графические методы анализа нелинейных электрических цепей.

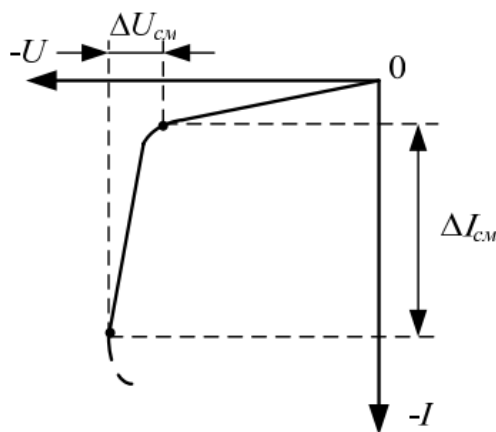


Рисунок 6.2 – ВАХ стабилитрона

Рассмотрим работу стабилизатора на холостом ходу, т.е. при  $R_H = \infty$  ( $I_H = 0$ ). В этом случае балластный резистор  $R_б$  и стабилитрон VD будут соединены последовательно и данную цепь можно анализировать методом опрокинутой характеристики. На рисунке 6.3 представлены ВАХ стабилитро-

на (кривая 1) и опрокинутая ВАХ резистора  $R_{\bar{\sigma}}$  (прямая 2). Точка их пересечения определяет значения напряжения на стабилитроне равное  $U_{\text{блх}}$  и тока  $I = I_{\text{см}}$ .

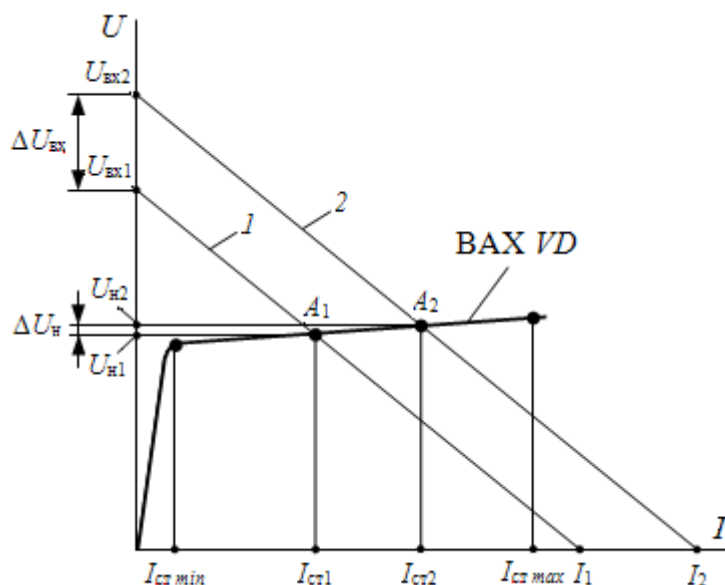


Рисунок 6.3 – ВАХ параметрического стабилизатора, поясняющая его работу

Тогда, описываемую уравнением электрического состояния характеристику  $U_{\text{вх}} = U_{\text{см}} + I_{\text{см}} R_{\bar{\sigma}}$ , просто решить графически. При этом учитываем, что  $U_{\text{вых}} = U_{\text{см}}$ . При этом  $I = U_{\text{вх}} / R_{\bar{\sigma}}$ . Точка  $A$  пересечения характеристик определяет ток  $I_{\text{см}}$  через стабилитрон  $VD$  и напряжение стабилизации  $U_{\text{см}}$  равное напряжению на нагрузке  $U_H$ . Так при входном напряжении  $U_{\text{вх}1}$ , ВАХ линейной части схемы занимает положение 1, через стабилитрон протекает ток  $I_{\text{см}1}$ , а напряжение на нагрузке равно  $U_{\text{вых}1} = U_{\text{см}1}$  (для точки  $A_1$ ).

При увеличении входного напряжения на  $\Delta U_{\text{вх}}$  от  $U_{\text{вх}1}$  до  $U_{\text{вх}2}$  ВАХ линейной части схемы переместится параллельно самой себе и займет положение 2. Из рисунка 6.3 видно, что напряжение на стабилитроне  $U_{\text{см}2}$ , а, следовательно, и на нагрузке  $U_{\text{вых}2}$  изменится (увеличится) незначительно на величину  $\Delta U_H$  (точка  $A_2$ ). При уменьшении входного напряжения принцип работы схемы аналогичен. Таким образом, при изменении входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  напряжение на нагрузке  $U_{\text{вых}}$  остается практически неизменным.

Так как рабочий участок ВАХ стабилитрона  $VD$  ограничен минималь-

ным  $I_{ct.min}$  и максимальным  $I_{ct.max}$  токами стабилизации, сопротивление резистора  $R_{\zeta}$  выбирается таким образом, чтобы линия нагрузки пересекала ВАХ стабилитрона в точке  $A$ , соответствующей номинальному току стабилитрона  $VD$ .

В реальных условиях  $R_H \neq \infty$ , поэтому суммарная ВАХ стабилитрона  $VD$  и нагрузочного резистора  $R_H$  переместится в сторону больших токов, и режим стабилизации будет наступать при большем входном напряжении  $U_{вх}$ .

Изменение нагрузки очень мало влияет на величину напряжения  $U_{вых}$ , поскольку, например, увеличение тока нагрузки  $I_H$  компенсируется уменьшением тока стабилитрона.

Сопротивление балластного резистора  $R_{\zeta}$  выбирается таким, чтобы обеспечить значение тока стабилитрона  $I_{ct}$ , соответствующее номинальной величине  $I_{ct.ном}$ , указанной для данного типа стабилитрона.

Возможности регулирования выходного напряжения у параметрического стабилизатора отсутствуют.

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора относительно невысок и составляет 20-60.

Выходное сопротивление параметрического стабилизатора определяется дифференциальным сопротивлением стабилитрона на участке стабилизации и может находиться в диапазоне от одного до десятков Ом.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Подготовьте протокол исследования, начертите схемы для исследования параметрического стабилизатора напряжения.

3.2. Рассчитайте сопротивление балластного резистора  $R_{\zeta}$ .

3.3. Определите коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Провести опыт холостого хода:

4.1.1. На компьютере запустить программу Electronics Workbench «Wewb32.exe».

4.1.2. С помощью инструментальных средств программы Electronics Workbench набрать схему параметрического стабилизатора, согласно рисунку 6.4, выбрав марку стабилитрона для своего варианта по таблице 6.1.



Таблица 6.1 – Тип и параметры стабилитрона согласно варианту

№ варианта	Тип стабилитрона	$U_{CT}, B$ (VZT)	$I_{CT.max}, A$ (IZT)	$R_d, Ом$ (RS)
1	KC133A	3,3	0,081	65
2	KC139A	3,9	0,07	60
3	KC137A	4,7	0,058	52
4	KC156A	5,6	0,055	46
5	KC162A	6,2	0,022	35
6	KC168A	6,8	0,02	28
7	KC170A	7,0	0,018	20
8	KC175A	7,5	0,018	16
9	KC182A	8,2	0,017	14

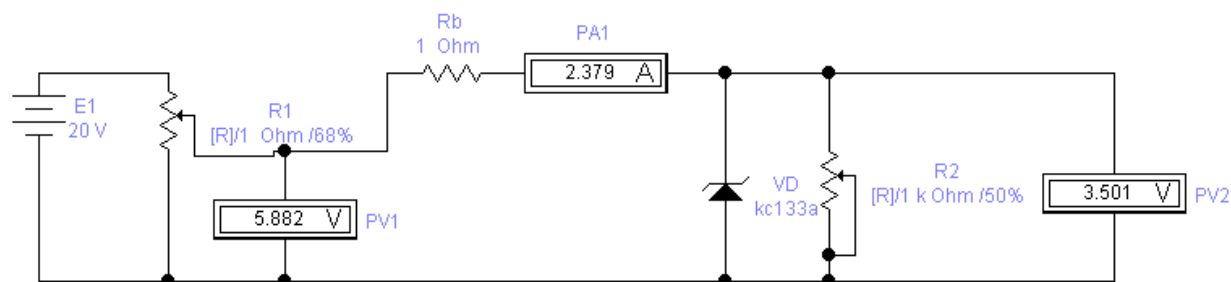


Рисунок 6.4 – Схема для исследования параметрического стабилизатора напряжения


4.1.3. Для создания модели стабилитрона в соответствии с вариантом задания по таблице 6.1, необходимо левой клавишей мыши кликнуть дважды по изображению стабилитрона и в открывшемся окне в разделе *Library* выбрать библиотеку *default*, а затем в разделе *Model* – тип стабилитрона *ideal*. Выбрать последовательно левой клавишей мыши кнопки *Copy* и *Paste*, записать латинскими буквами в появившемся окне тип стабилитрона согласно варианту задания и нажать кнопку *OK*. В результате этих действий в разделе *Model* появится выбранный тип стабилитрона. Для корректировки его параметров необходимо нажать кнопку *Edit* и установить указанные в таблице 6.1 значения параметров: *Zener test voltage at IZT [VZT]* (напряжение стабилизации  $U_{cm}$ ); *Zener test current [IZT]* (максимальный ток стабилизации  $I_{cm.max}$ ); *Ohmic resistance [RS]* (дифференциальное сопротивление  $R_d$ ), помня при этом, что целые и дробные части смешанного числа отделяются не запятой, а точкой. Значения других параметров оставить без изменения.

4.1.4. Установить значения элементов схемы.  $E_1=20$  В,  $R_1=1$  Ом,  $R_5=1$  Ом,  $R_2 = \infty$  Ом. Для этого необходимо:

1) для источника  $E_1$ : два раза щёлкнуть левой клавишей мыши на элементе, во вкладке *Label* открывшегося окна написать обозначение элемента (например,  $E1$ ), во вкладке *Value* установить значение параметра и необходимую единицу измерения.

2) для сопротивлений: обозначения и величины параметров устанавливаются аналогично, но для переменных резисторов, кроме того, указывается во вкладке *Value*, в окне *Key* клавиша изменения величины (например,  $R$ ), в окне *Setting* (*Установка*) – исходную величину начала отсчёта, например, 100 %, в окне *Increment* (*Прирост*) – шаг изменения, например, 10 %. Это означает, что изменение параметра начнётся от величины, указанной в строке *Resistance* ( $R$ ) в меньшую сторону с шагом в 10 %. Завершается установка параметров нажатием кнопки *OK*.

Примечание: тёмная сторона амперметров и вольтметров обозначает «–».

4.1.5. Изменяя сопротивление  $R_1$ , построить зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . При этом, изменение сопротивления осуществляется нажатием выбранной в п.п. 4.1.4 клавишей. Для включения питания схемы необходимо кликнуть левой клавишей мыши на значок  в правом верхнем углу экрана, для фиксации результата измерения – на кнопку *Pause*.

4.1.6. Записать полученные результаты в таблицу 6.2 и построить график зависимости  $U_{вых}(U_{вх})$ .

Таблица 6.2 – Результаты измерений зависимости  $U_{вых}(U_{вх})$

$U_{вх}, В$									
$U_{вых}, В$									

4.1.7. По графику  $U_{вых} = f(U_{вх})$  вычислить, используя выражение (6.1), значения коэффициента стабилизации  $K_{ст}$  для параметрического стабилизатора, используя участки с наиболее стабильным выходным напряжением. Результат вычислений записать в таблицу 6.3.

Таблица 6.3

Показатели качества	$K_{ст}$	$R_H$
Параметрический стабилизатор		

4.2. Провести опыт с нагрузкой:

4.2.1. Установить для схемы по рисунку 6.4 следующие значения элементов схемы:  $E_1=20$  В,  $R_1=1$  Ом,  $R_6=1$  Ом,  $R_2=1$  кОм.

4.2.2. Установить для сопротивления  $R_2$   $Setting=0\%$ .

4.2.3. Изменяя сопротивление  $R_2$  ( $R_H$ ) снять и построить зависимость  $U_{вых} = f(I_H)$  при  $U_{ex} = \text{const}$ . Занести полученные результаты в таблицу 6.4.

4.2.4. По графику  $U_{вых} = f(I_H)$  вычислить по (6.2) значения выходного (дифференциального) сопротивления  $R_2$  ( $R_H$ ) для параметрического стабилизатора, используя участки с наиболее стабильным выходным напряжением.

Таблица 6.4

$I_H, mA$									
$U_{вых}, B$									

4.3. Снятие осциллограмм входного и выходного сигналов:

4.3.1. Собрать схему согласно рисунку 6.5. Подключить осциллограф.

4.3.2. Установить значения элементов схемы.  $R_1=1$  Ом,  $R_6=1$  Ом,  $R_2=1$  кОм. Для прибора генератор функций (*Function generator*) установить значения: частота (*frequency*) – 1 Гц, цикличность (*duty cycle*) – 1, амплитуда (*amplitude*) – 8 В, постоянная составляющая (*offset*) – 19 В.

4.3.3. Установить для сопротивления  $R_1$   $Setting=0\%$ .

4.3.4. Снять зависимость выходного сигнала от входного (рисунок 6.6). Зарисовать полученные осциллограммы.

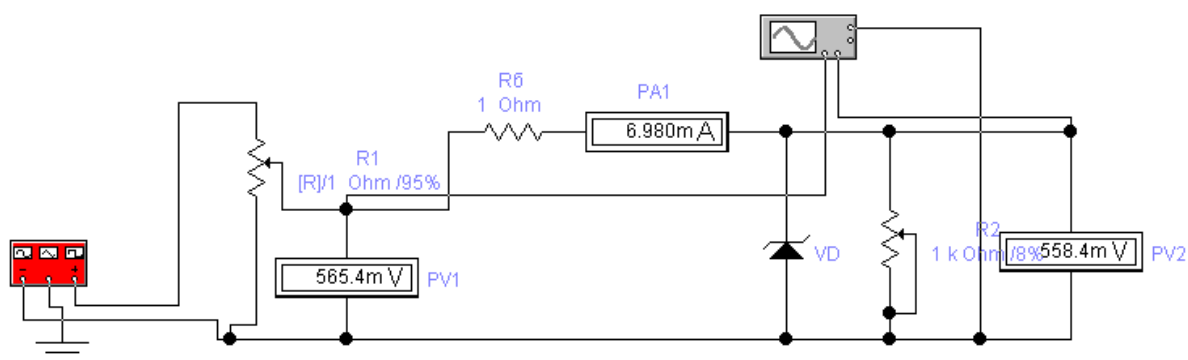


Рисунок 6.5 – Схема для исследования входных и выходных сигналов параметрического стабилизатора напряжения в Electronics Workbench

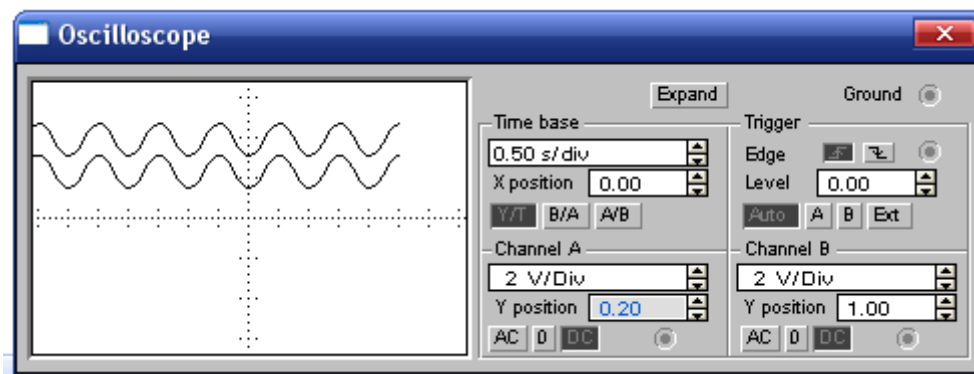


Рисунок 6.6 – Осциллограммы входных и выходных сигналов параметрического стабилизатора напряжения

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1. Номер и название лабораторной работы, её цели.

5.2. Протокол исследования с содержанием:

- графиков зависимостей  $U_{вых} = f(U_{вх})$  и  $U_{вых} = f(I_H)$ .

- заполненных таблиц 6.2-6.4.

5.3. Выводы по работе.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Поясните назначение стабилизаторов постоянного напряжения.

6.2. Какими параметрами характеризуют качество работы стабилизаторов постоянного напряжения?

6.3. Как классифицируются стабилизаторы напряжения?

6.4. Укажите особенности ВАХ полупроводникового стабилитрона.

6.5. Опишите принцип действия параметрического стабилизатора.

6.6. Опишите зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  при  $I_H=0$  для параметрического стабилизатора.

6.7. Поясните вид внешней характеристики  $U_{ВЫХ}=f(I_H)$  при  $U_{ВХ}=const$  для параметрического стабилизатора.

## 7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить схемы и принцип работы компенсационного стабилизатора постоянного напряжения. Исследовать основные характеристики стабилизатора.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Стабилизатор является составной частью выпрямительного устройства и служит для поддержания неизменным (в определенном допуске) напряжения на нагрузке, которое может меняться под действием различных дестабилизирующих факторов. Такими факторами могут быть, например, колебания напряжения сети, изменения сопротивления нагрузки.

2.2. Качество работы стабилизатора характеризуется следующими числовыми параметрами:

- 1) коэффициент стабилизации по напряжению (6.1);
- 2) выходное сопротивление (6.2).

2.3. Компенсационный стабилизатор напряжения работает по иному принципу, нежели параметрический стабилизатор напряжения. Принцип действия компенсационного стабилизатора напряжения основан на изменении сопротивления регулирующего элемента в зависимости от управляющего сигнала.

Компенсационные стабилизаторы напряжения являются системой автоматического регулирования по отклонению, в которой благодаря наличию отрицательной обратной связи (ОС) обеспечивается постоянство напряжения на нагрузке с высокой степенью точности. Компенсационные стабилизаторы лишены недостатков, свойственных параметрическому стабилизатору, что достигается усложнением его схемы.

Довольно часто на практике используется *простейший компенсационный стабилизатор напряжения непрерывного действия* (линейный), схема которого приведена на рисунке 7.1. В компенсационном стабилизаторе нагрузка  $R_H$  подключена к источнику входного напряжения  $U_{ВХ}$  через регулирующий транзистор  $VT$ , следовательно:

$$U_{вх} = U_{VT1} + U_H.$$

Поэтому изменение сопротивления регулирующего транзистора  $VT$  в соответствии с сигналом ОС позволяет поддерживать напряжение  $U_H$  на нагрузке практически неизменным при воздействии дестабилизирующих факторов.

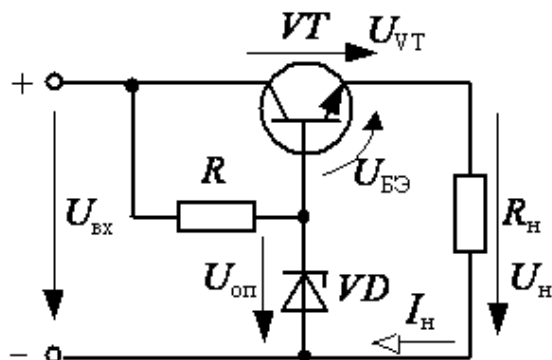


Рисунок 7.1 – Схема простейшего компенсационного стабилизатора напряжения

Здесь опорное напряжение  $U_{оп}$  создается параметрическим стабилизатором напряжения на стабилитроне  $VD$  и резисторе  $R$ , а роль сравнивающего и регулирующего элементов выполняет биполярный транзистор  $VT$ .

Напряжение на нагрузке  $U_H$  представляет собой разность

$$U_H = U_{оп} - U_{БЭ}.$$

В нормальном режиме, когда отсутствует действие дестабилизирующих факторов, режим работы регулирующего транзистора выбирается так, чтобы он был не полностью открыт напряжением смещения  $U_{БЭ}$ , которое обычно составляет 0,4-0,6 В. При этом напряжение на нагрузке практически равно опорному  $U_H \approx U_{оп}$ .

Предположим, по каким-либо причинам напряжение  $U_H$  уменьшилось. Напряжение  $U_{оп}$  на стабилитроне  $VD$  при этом практически не изменяется. Так как  $U_{БЭ} = U_{оп} - U_H$  (рисунок 7.1), то напряжение  $U_{БЭ}$  увеличивается. Ток базы транзистора также увеличивается, транзистор открывается, падение напряжения на нем уменьшается, а напряжение  $U_H$  увеличивается и его значение устанавливается близкое к номинальному.

С целью увеличения коэффициента стабилизации стабилизатора в цепь ОС вводится усилитель.

На рисунке 7.2 приведена структурная схема компенсационного стабилизатора непрерывного действия с усилителем в цепи обратной связи. Работа схемы компенсационного стабилизатора непрерывного действия заключается

в следующем. В узле сравнения УС происходит непрерывное сравнение напряжения обратной связи  $U_{oc}$ , снимаемого с датчика напряжения ДН, с опорным напряжением  $U_{он}$ , снимаемым с источника опорного напряжения ИОН. Результат сравнения  $\Delta U$  усиливается усилителем У и подается на вход регулирующего элемента РЭ, падение напряжения на котором  $U_{РЭ}$  компенсирует действие дестабилизирующих факторов.

Для структурной схемы (рисунок 7.2) справедливы следующие соотношения:

$$U_{вх} = U_{РЭ} + U_H \text{ (для внешнего контура стабилизатора);}$$

$$\Delta U = U_{oc} - U_{он} \text{ (для узла сравнения УС);}$$

$$U_H = I_H R_H \text{ (для нагрузки);}$$

$$U_{oc} = \beta U_H \text{ (для датчика напряжения),}$$

где  $\beta$  – коэффициент обратной связи.

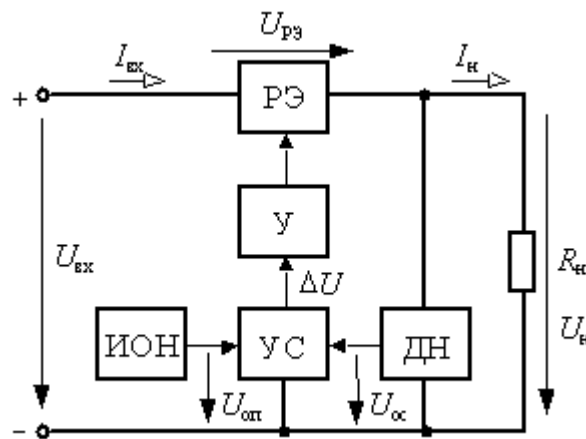


Рисунок 7.2 – Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия

При увеличении входного напряжения  $U_{ВХ}$  или уменьшении тока нагрузки  $I_H$  несколько повышается напряжение на нагрузке  $U_H$ , отклоняясь от своего номинального значения. Увеличивается напряжение  $U_{OC}$ , являющееся частью  $U_H$ , а напряжение  $U_{ОН}$  остается неизменным. Увеличивается напряжение  $\Delta U$  на выходе УС, которое усиливаясь усилителем У, подается на вход РЭ и увеличивает его сопротивление таким образом, что напряжение  $U_{РЭ}$  компенсирует действие дестабилизирующих факторов. В результате этого напряжение  $U_H$  уменьшается и приобретает значение, близкое к номинальному с определенной степенью точности. При уменьшении входного напряжения  $U_{ВХ}$  или увеличении тока нагрузки  $I_H$  в схеме протекают противоположные процессы.

На рисунке 7.3, *а* приведена схема компенсационного стабилизатора на дискретных элементах – биполярных транзисторах. Схема включает: регулирующий элемент РЕ на транзисторе  $VT1$  и резисторе  $R_1$ ; усилитель  $У$  на транзисторе  $VT2$ ; узел сравнения УС –  $p$ - $n$ -переход база-эмиттер транзистора  $VT2$ ; источник опорного напряжения ИОН, выполненный в виде параметрического стабилизатора на стабилитроне  $VD$  и резисторе  $R_2$ ; датчик напряжения ДН на резисторах  $R_3, R_4, R_5$ .

При увеличении входного напряжения стабилизатора  $U_{ВХ}$  или уменьшении тока нагрузки  $I_H$  напряжение  $U_H$  повышается, отклоняясь от своего номинального значения. Увеличивается часть напряжения  $U_H$ , равная  $\beta U_H$  и являющаяся сигналом ОС. Так как опорное напряжение  $U_{оп}$  остается постоянным, то напряжение  $U_{БЭ2}$  транзистора  $VT2$  также увеличивается. Транзистор  $VT2$  приоткрывается, его коллекторный ток  $I_{K2}$  увеличивается. Учитывая, что  $I_{B1} = I_1 - I_{K2}$  и приняв практически неизменным  $I_1$ , ток базы транзистора  $VT1$  уменьшается, и он частично закрывается. При этом падение напряжения  $U_{VT1}$  на транзисторе  $VT1$  возрастает, а напряжение на нагрузке  $U_H$  снижается и приобретает значение, близкое к номинальному с определенной степенью точности. Аналогично будет отработано изменение  $U_H$  при уменьшении  $U_{ВХ}$  или изменении сопротивления нагрузки  $R_H$  (тока нагрузки  $I_H$ ).

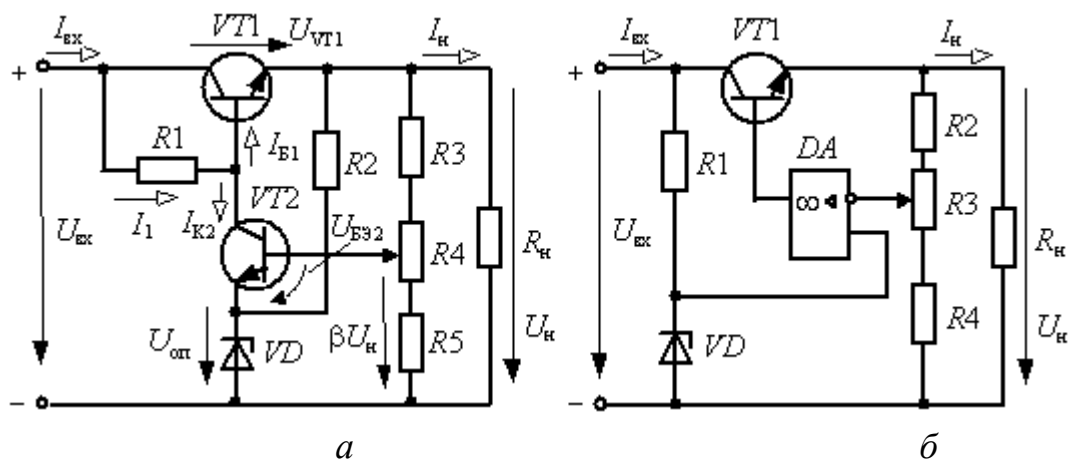


Рисунок 7.3 – Схемы компенсационных стабилизаторов напряжения на биполярных транзисторах (*а*) и операционном усилителе (*б*)

С помощью переменного резистора  $R_4$  можно регулировать в необходимых пределах напряжение на нагрузке  $U_H$ . Причем перемещение движка переменного резистора  $R_4$  по схеме вверх приводит к уменьшению напряжения на нагрузке  $U_H$  и наоборот.

Для повышения коэффициента стабилизации вместо усилителя на тран-



зисторе  $VT2$  в стабилизаторе часто используют интегральный операционный усилитель ( $OY$ ) (рисунок 7.3, б), коэффициент усиления которого много больше коэффициента усиления усилителя на транзисторе  $VT2$ . Известно, что напряжение между входами  $OY$  практически равно нулю. В стабилизаторе (рисунок 7.3, б) работа контура  $OC$  поддерживает равенство нулю разности  $\beta U_H - U_{OP}$ , поэтому  $U_H = U_{OP}/\beta$ . Чем выше коэффициент усиления  $OY$ , тем точнее выполняется это равенство, тем выше коэффициент стабилизации  $K_{CTU}$  и тем ниже  $R_{ВЫХ}$  стабилизатора. У компенсационных стабилизаторов на основе  $OY$   $K_{CTU}$  может достигать нескольких тысяч, а внутреннее сопротивление  $R_{ict} = 10^{-3}-10^{-4}$  Ом.

Сравнивая компенсационный стабилизатор с параметрическим, следует отметить следующие достоинства компенсационных стабилизаторов напряжения: высокий коэффициент стабилизации ( $K_{CTU} > 1000$ ); низкое внутреннее сопротивление  $R_{ict} = 10^{-3}-10^{-4}$  Ом; практическая безинерционность и более высокий КПД, составляющий 0,5-0,6.

Недостатками являются: бóльшая сложность, и, следовательно, меньшая надежность по сравнению с параметрическим стабилизатором; значительная масса; габариты и стоимость, что объясняется наличием большого количества элементов в стабилизаторе, а также применением радиаторов охлаждения, обеспечивающих теплоотвод от регулирующего транзистора.

2.4. Важными графическими характеристиками, отражающими работу стабилизаторов напряжения, являются:

- 1) зависимость выходного напряжения от входного  $U_{вых} = f(U_{вх})$ ;
- 2) внешняя характеристика  $U_{вых} = f(I_H)$  при  $U_{вх} = \text{const}$ .

Зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  имеет вид, представленный на рисунке 7.4.

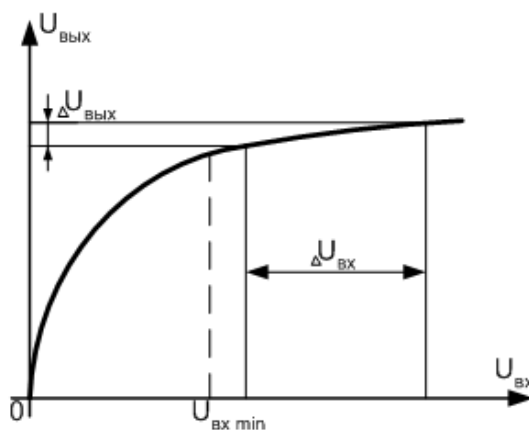


Рисунок 7.4 – Зависимость выходного напряжения от входного у стабилизатора напряжения

Для обеспечения требуемого значения напряжения  $U_{\text{вых}}$  на нагрузке, подключенной к выходу стабилизатора, необходимо, чтобы входное напряжение было не менее некоторого минимального значения  $U_{\text{вх. min}}$ , которое в свою очередь, должно превышать  $U_{\text{вых}}$ . При условии, что  $U_{\text{вх}} > U_{\text{вых. min}}$ , изменение входного напряжения  $\Delta U_{\text{вх}}$  приведёт к весьма незначительному изменению выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$ . Наклон данной характеристики на рабочем участке определяется величиной коэффициента стабилизации  $K_{\text{ст}}$ .

Внешняя характеристика стабилизатора  $U_{\text{вых}} = f(I_H)$  при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$  (рисунок 7.5), которая показывает, что при увеличении тока нагрузки  $I_H$  происходит некоторое снижение напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Это обусловлено отличием от нуля выходного сопротивления стабилизатора. Чем больше выходное сопротивление стабилизатора  $R_{\text{вых}}$ , тем более крутым будет наклон внешней характеристики. Снижение напряжения на выходе при росте тока нагрузки  $I_H$  в компенсационных стабилизаторах значительно менее выражено, чем в параметрических, что достигается наличием отрицательной обратной связи.

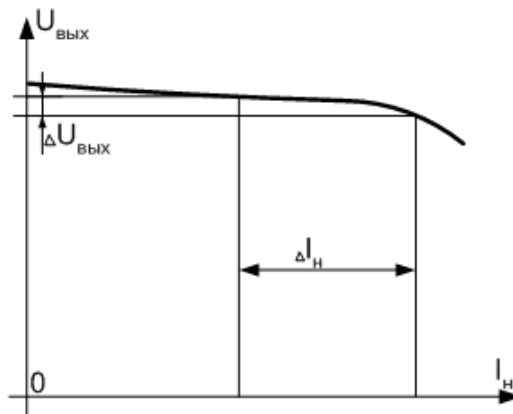


Рисунок 7.5 – Выходная характеристика стабилизатора напряжения

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучить принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.

3.2. Сделать предварительный расчет резисторов стабилизатора напряжения, для своего варианта. Данные взять из таблиц 6.1, 7.1, 7.2.

Расчёт проводится в следующей последовательности:

1. Определяется величина сопротивления резистора  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{R1}} \approx \frac{U_{KЭ1}}{(I_{K2} + I_{B1})} = \frac{(U_{BX} - U_{БЭVT1} - U_{ВЫХ})}{(I_{K2} + I_{B1})},$$

где  $I_{B1} = \frac{I_{K1}}{\beta_{VT1}}$  – ток базы транзистора VT1;  $I_{K1} \approx I_H$  – ток коллектора тран-

зистора  $VT1$ ;  $U_{R1} \approx U_{KЭ1}$  – падение напряжения на резисторе  $R_1$ ;  $I_{R1}$  – ток, протекающий через резистор  $R_1$ ; ток коллектора  $VT2$   $I_{K2} \approx I_{Э2}$ ;  $I_{Э2}$  – ток эмиттера транзистора  $VT2$ , который выбирается в пределах (1 - 2) мА.

$$U_{R1} = (U_{ex} - U_{БЭVT1} - U_{вых},$$

где  $U_{БЭVT1} = 0,7$  В.

Тогда

$$R_1 = (U_{ex} - U_{БЭVT1} - U_{вых}) / [0,01 + I_H / \beta_{VT1}],$$

где  $U_{БЭVT1} = 0,7$  В;  $I_H = U_{вых} / R_H$ .

2. Определяется величина сопротивления резистора  $R_2$ :

$$R_2 = 2(U_{вых} - U_{cm}) / I_{cm.max}.$$

3. Определяются величины сопротивлений резисторов  $R_3$  и  $R_4$ :

$$R_3 = (U_{вых} - U_{cm} - U_{БЭVT2}) / 0,01;$$

$$R_4 = (U_{cm} + U_{БЭVT2}) / 0,01,$$

где  $U_{БЭVT2} = 0,7$  В.

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. На компьютере запустить программу Electronics Workbench «Wewb32.exe».

4.2. С помощью инструментальных средств программы Electronics Workbench набрать схему компенсационного стабилизатора согласно рисунку 7.6.

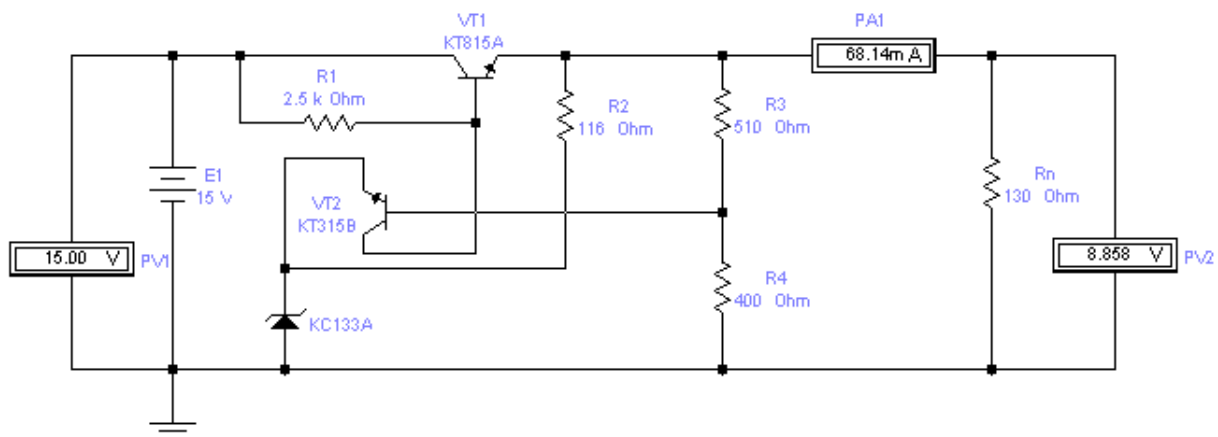


Рисунок 7.6 – Схема установки для исследования компенсационного стабилизатора напряжения

4.3. Создать модель транзистора в соответствии с вариантом задания таблицы 7.1. Для этого щелкнуть два раза левой клавишей мыши по изображению транзистора и в появившемся окне *NPN Transistor Properties* (вкладка *Models*) в окне *Library* выбрать библиотеку *default*, а затем в окне *Model* – тип транзистора *ideal*. После этого, левой клавишей мыши нажать последовательно кнопки *Copy* и *Paste*, записать латинскими буквами в появившемся окне тип транзистора в соответствии с вариантом задания и нажать кнопку *OK*. В результате в разделе *Model* добавится указанный тип транзистора. Для корректировки его параметров нажать кнопку *Edit* и установить значения параметров: *Forward current gain coefficient [BF]* (коэффициент усиления  $\beta$ ), *Base ohmic resistance [RB]* (сопротивление базы  $R_B$ ), *Emitter ohmic resistance [RE]* (сопротивление эмиттера  $R_E$ ), *Collector ohmic resistance [RC]* (сопротивление коллектора  $R_K$ ) согласно таблице 7.1. Значения других параметров оставить без изменения.

Таблица 7.1 – Параметры транзисторов согласно индивидуальному варианту

№ варианта	Обозначение транзистора	Тип транзистора	$\beta$ (BF)	$R_B$ , Ом (RB)	$R_E$ , Ом (RE)	$R_K$ , Ом (RK)
1	VT1	КТ815А	40	2,1	0,9	0,4
	VT2	КТ315В	60	5	2	1
2	VT1	КТ815В	40	2	0,9	0,4
	VT2	КТ3102J	100	3	1	0,6
3	VT1	КТ815В	40	2	0,9	0,4
	VT2	КТ315Г	60	5	2	1
4	VT1	КТ815Г	30	2,1	0,9	0,4
	VT2	КТ3102А	100	3	1	0,6
5	VT1	КТ817А	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ3102Д	200	3	1	0,6
6	VT1	КТ817Б	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ315Е	50	5	2	1
7	VT1	КТ817В	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ3102А	100	3	1	0,6
8	VT1	КТ817Г	25	1,5	0,7	0,3
	VT2	КТ503Б	80	2,5	1,2	0,5
9	VT1	КТ831А	25	1,8	0,6	0,3
	VT2	КТ3102В	200	3	1	0,6

4.4. Создать модель стабилитрона согласно варианту задания (таблица 7.2), установив заданное напряжение стабилизации  $U_{cm}$ . Для этого выполнить порядок действий, указанный в п.п. 4.1.3 работы № 5.

4.5. Установить напряжение на входе стабилизатора  $U_{BX}$ , задав его ве-

личину на источнике постоянного тока  $EI$ , и сопротивление нагрузки  $R_H$  в соответствии с вариантом задания (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Параметры источника, стабилитрона и нагрузки

№ вар.	$U_{BX}$ , В	$U_{cm}$ , В	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_{BX}$ , В	$U_{cm}$ , В	$R_H$ , Ом
1	15	8	130	16			
2	15	9	150	17			
3	16	10	160	18			
4	16	11	180	19			
5	18	12	200	20			
6	18	13	220	21			
7	20	14	240	22			
8	22	15	270	23			
9	22	16	300	24			
10				25			
11				26			
12				27			
13				28			
14				29			
15				30			

4.6. Установить значения резисторов  $R_1$ - $R_4$  в соответствии с предварительным расчётом.

4.7. Экспериментально уточнить значение сопротивления резистора  $R_3$ , при котором значение выходного напряжения стабилизатора  $U_{cm}$  будет соответствовать таблице 7.2.

4.8. Для исследования коэффициента стабилизации компенсационного стабилизатора напряжения величину входного напряжения  $U_{BX}$  последовательно задавать равным  $0,9 U_{BX}$ ;  $0,94 U_{BX}$ ;  $0,97 U_{BX}$ ;  $U_{BX}$ ;  $1,05 U_{BX}$ ;  $1,1 U_{BX}$ ;  $1,15 U_{BX}$ ;  $1,2 U_{BX}$ . Результат записать в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Результаты измерений

$U_{BX}$ , В	$0,9U_{BX}$	$0,94U_{BX}$	$0,97U_{BX}$	$U_{BX}$	$1,05U_{BX}$	$1,1U_{BX}$	$1,15U_{BX}$	$1,2U_{BX}$
$U_{ВЫХ}$ , В								

4.9. Для исследования нагрузочной характеристики стабилизатора величину сопротивления нагрузки  $R_H$  последовательно задавать равным ( $0,4R_H$ ;  $0,6R_H$ ;  $0,8R_H$ ;  $R_H$ ;  $1,2R_H$ ;  $1,4R_H$ ;  $1,6R_H$ ;  $2R_H$ ). Результат записать в таблицу 7.4.

Таблица 7.4

$R_H, \text{Ом}$	$0,4 R_H$	$0,6 R_H$	$0,8 R_H$	$R_H$	$1,2 R_H$	$1,4 R_H$	$1,6 R_H$	$2 R_H$
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$								
$I_{\text{ВЫХ}}, \text{А}$								

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

5.1. Номер, название и цели лабораторной работы.

5.2. Протокол исследования, в котором:

5.2.1. По данным таблиц 7.3 и 7.4 построить графики зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  и  $U_{\text{ВЫХ}} = f(I_H)$ .

5.2.2. По графику  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  вычислить значения коэффициента стабилизации  $K_{\text{СТ}}$  для компенсационного стабилизатора, используя участки с наиболее стабильным выходным напряжением. Результат вычислений записать в таблицу 7.5.

5.2.3. По графику  $U_{\text{ВЫХ}} = f(I_H)$  вычислить значения выходного сопротивления  $R_{\text{ВЫХ}}$  для компенсационного стабилизатора, используя участки с наиболее стабильным выходным напряжением. Результат вычислений записать в таблицу 7.5.

Таблица 7.5

Показатели качества	$K_{\text{СТ}}$	$R_{\text{ВЫХ}}$
Компенсационный стабилизатор		

5.3. Выводы по работе

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Поясните назначение стабилизаторов постоянного напряжения.

6.2. Какими параметрами характеризуют качество работы стабилизаторов постоянного напряжения?

6.3. Как классифицируются стабилизаторы напряжения?

6.4. Укажите особенности ВАХ полупроводникового стабилизатора.

6.5. Опишите принцип действия компенсационного стабилизатора.

6.6. Опишите зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  при  $I_H = 0$  для компенсационного стабилизатора.

6.7. Поясните вид внешней характеристики  $U_{\text{ВЫХ}} = f(I_H)$  при  $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$  для компенсационного стабилизатора.



## 8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование усилительных свойств биполярного транзистора, принципов работы и характеристик типового транзисторного каскада.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

##### 2.1. Основные правила работы *n-p-n* транзистора:

1. Напряжение коллектор-эмиттер всегда больше нуля:  $U_{КЭ} > 0$ .
2. Поскольку *p-n* переход база-эмиттер – это диод, то в активном режиме:  $U_{Э} = U_{Б} - 0,7 \text{ В}$ .

##### 3. В активном режиме (не в насыщении):

$$I_K = \beta \cdot I_B, \quad (8.1)$$

где  $\beta = 20-200$ .

4. В активном режиме управляющее напряжение  $U_{БЭ}$  связано с током коллектора экспоненциальной зависимостью (уравнением Эберса-Молла):

$$I_K = I_0 \exp(U_{БЭ} / 25 \text{ мВ}),$$

где  $I_0$  – это обратный ток коллектора.

Следствия из правила:

- при возрастании напряжения  $U_{БЭ}$  на 20 мВ ток коллектора  $I_K$  увеличивается в 2 раза;
- при возрастании напряжении  $U_{БЭ}$  на 60 мВ ток коллектора  $I_K$  увеличивается в 10 раз.

5. Обратный ток коллектора существенно возрастает при повышении температуры:

$$I_{0\text{кон}} = I_{0\text{нач}} \exp(\Delta t^0 / 12),$$

где  $I_{0\text{кон}}$ ;  $I_{0\text{нач}}$  – конечное и начальное значения обратного тока коллектора;

$\Delta t^0$  – изменение температуры в градусах Цельсия.

Следствия из правила:

- при возрастании температуры  $\Delta t^0$  на  $8^\circ$  ток коллектора  $I_K$  увеличива-



ется в два раза;

- при возрастании температуры  $\Delta t^0$  на  $27^\circ$  ток коллектора  $I_K$  увеличивается в 10 раз.

6. Собственное сопротивление эмиттера обратно пропорционально току коллектора:

$$R_{\mathcal{E}}(\text{Ом}) = 25(\text{мВ}) / I_K(\text{mA}).$$

7. При наличии резистора  $R_{\mathcal{E}}$  в цепи эмиттера (рисунок 8.1) ток  $I_K$  в цепи коллектора определяется напряжением базы  $U_B$  и не зависит от сопротивления  $R_{\mathcal{E}}$  (в активном режиме):  $I_K \approx I_{\mathcal{E}} = (U_B - 0,7 \text{ В}) / (R_{\mathcal{E}} + r_{\mathcal{E}})$ .

## 2.2. Транзисторный ключ

Ключи в отличие от аналоговых устройств работают сигналами двух уровней: высоким и низким. Транзистор в ключевом режиме находится в одном из двух состояний: включен (насыщение), выключен (отсечка). Переход из одного состояния в другое совершается почти мгновенно при скачке напряжения  $U_{\text{вх}}$  на базе транзистора (рисунок 8.1).

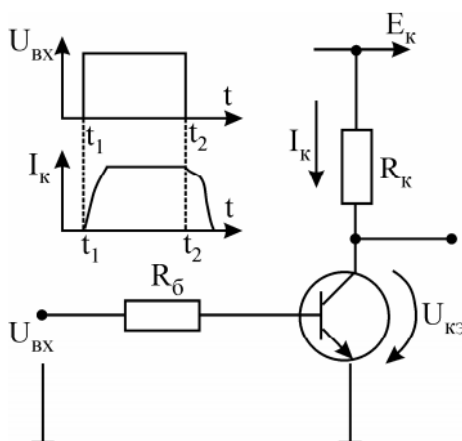


Рисунок 8.1 – Транзисторный ключ

Высокому уровню напряжения на базе соответствует низкий уровень  $U_{KЭ \text{ нас}}$  на коллекторе. Для разных типов транзисторов напряжение насыщения  $U_{KЭ \text{ нас}}$  варьируется (0,05-1,0) В. Чем оно меньше, тем лучше качество ключа. Ток коллектора в режиме насыщения определяется резистором в цепи коллектора

$$I_K = \frac{E - U_{KЭ \text{ нас}}}{R_K}.$$

При подаче на базу низкого уровня напряжения  $\cong 0$  В транзистор переходит в режим отсечки.

Недостатком транзистора является то, что переход в закрытое состояние совершается не сразу, а через некоторое время после подачи на базу запирающего сигнала. За это время (доли микросекунд) рассасываются неосновные носители, накопленные в базе в режиме насыщения. Коллекторный ток в режиме отсечки определяется тепловым обратным током, составляющим несколько микроампер, т.е. практически равен нулю.

Особенностью режима насыщения является уменьшение  $\beta$  по сравнению с активным режимом. Ограничивающее сопротивление  $R_B$  выбирается из условия:

$$R_B \leq (U_{вх} - 0,7 \text{ В}) / (I_{K \text{ нас}} / \beta_{\min}).$$

Транзисторные ключи широко применяются для управления мощными исполнительными устройствами (электромагнитами и т.п.) с помощью маломощных входных сигналов.

### 2.3. Эмиттерный повторитель

Напряжение на выходе повторяет входной сигнал за вычетом  $U_{БЭ}=0,7$  В – отсюда название «повторитель». Транзистор включен по схеме с общим коллектором (рисунок 8.2).

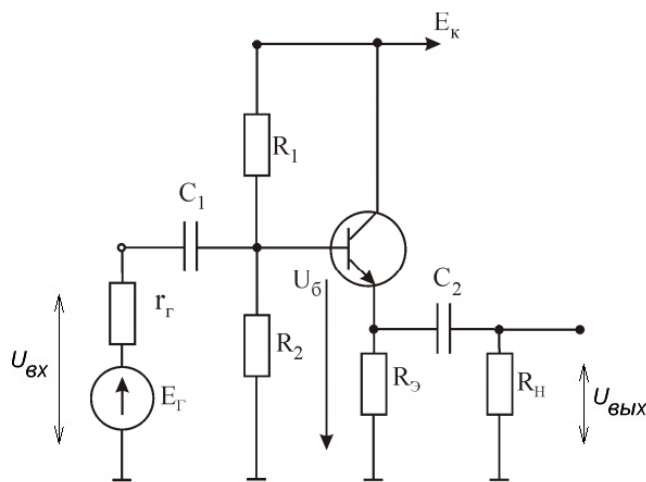


Рисунок 8.2 – Схема эмиттерного повторителя

Основная особенность схемы эмиттерного повторителя – высокое входное и низкое выходное сопротивления:

$$r_{вх} = (\beta + 1)(R_{Э} // R_{н});$$

$$r_{вых} = r_э / \beta + 1, \quad (8.2)$$

где знак // означает параллельное соединение двух резисторов.

Поэтому эмиттерный повторитель используют для согласования сопротивлений: включают его между высокоомным источником сигналов и низкоомной нагрузкой.

Коэффициенты по напряжению, току и мощности равны соответственно:

$$K_U = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} \approx 1;$$

$$K_I = \Delta I_{\text{Э}} / \Delta I_{\text{Б}} \approx \beta + 1;$$

$$K_P = K_U \cdot K_I \approx \beta.$$

Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  образуют делитель напряжения, задающий напряжение смещения базы:

$$U_B = E_K / 2 + 0,7 \text{ В}.$$

При этом напряжение эмиттера в режиме покоя будет равно  $E_K / 2$ , что обеспечивает максимальную амплитуду выходного сигнала. Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  выбираются не слишком маленькими, чтобы не снижать входного сопротивления эмиттерного повторителя, и не слишком большими, чтобы напряжение смещения было достаточно стабильным при изменениях нагрузки:

$$R_1 = 0,1 E_K \beta R_{\text{Э}} / (0,5 E_K + 0,7);$$

$$R_2 = 0,1 E_K \beta R_{\text{Э}} / (0,5 E_K - 0,7).$$

Поскольку выходное сопротивление эмиттерного повторителя мало, его свойства близки к источнику ЭДС.

#### 2.4. Усилительные каскады

Схемы усилительных каскадов характеризуются большим разнообразием. Вместе с тем принцип построения главных цепей усилительных каскадов один и тот же, он показан на примере структурной схемы на рисунке 8.3, а.

Основными элементами каскада являются управляемый элемент УЭ, функцию которого выполняет биполярный (полевой) транзистор и резистор  $R$ . Совместно с напряжением питания  $E$  эти элементы образуют выходную цепь каскада. Усиливаемый сигнал  $U_{\text{вх}}$ , принятый на рисунке 8.3, а) для простоты синусоидальным, подается на вход УЭ. Выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$  снимается с выхода УЭ или с резистора  $R$ . Он создается в результате изменения сопротивления УЭ и, следовательно, тока  $i$  в выходной цепи под воздействием входного напряжения. Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения  $E$  в энергию переменного

напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления управляемого элемента по закону, задаваемому входным сигналом.

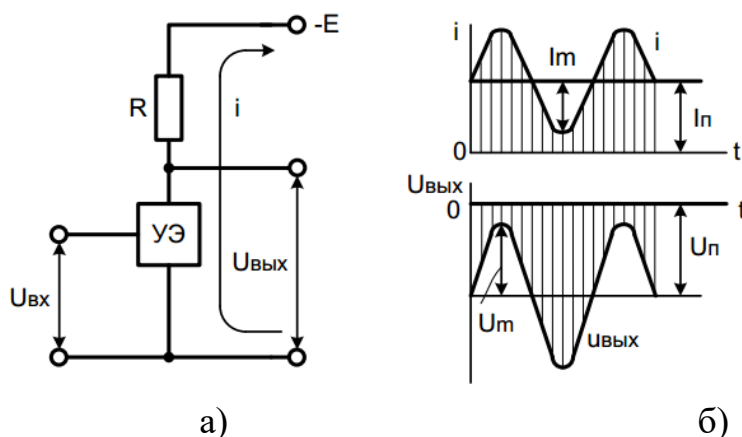


Рисунок 8.3 – Принцип построения (а) и временные диаграммы (б) усилительного каскада

Ввиду использования для питания источника постоянного напряжения  $E$  ток  $i$  в выходной цепи каскада является однонаправленным (рисунок 8.3, а). При этом переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как переменные составляющие суммарных тока и напряжения, накладывающиеся на их постоянные составляющие  $I_{\Pi}$  и  $U_{\Pi}$  и (рисунок 8.3, б). Связь между постоянными и переменными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, т.е.  $I_{\Pi} \geq I_m$  и  $U_{\Pi} \geq U_m$ . Если эти условия не будут выполняться, ток  $i$  в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведет к искажению формы выходного сигнала. Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока  $I_{\Pi}$  и напряжения  $U_{\Pi}$ . Задачу решают путем подачи во входную цепь каскада помимо усиливаемого сигнала соответствующего постоянного напряжения  $U_{ВХП}$  (или задания соответствующего постоянного входного тока  $I_{ВХП}$ ). Постоянные составляющие тока и напряжения определяют, так называемый, режим покоя усилительного каскада. Параметры режима покоя по входной цепи ( $I_{ВХП}$ ,  $U_{ВХП}$ ) и по выходной цепи ( $I_{\Pi}$ ,  $U_{\Pi}$ ).

Показатели усилительных каскадов зависят от способа включения транзистора, выполняющего роль управляемого элемента. Анализ усилительных

каскадов на биполярных транзисторах проводится для трех способов включения: с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) и общей базой (ОБ).

### 2.5. Усилитель с общим эмиттером

Этот тип каскада широко используется в транзисторных электронных устройствах в качестве усилителя напряжения (рисунок 8.4).

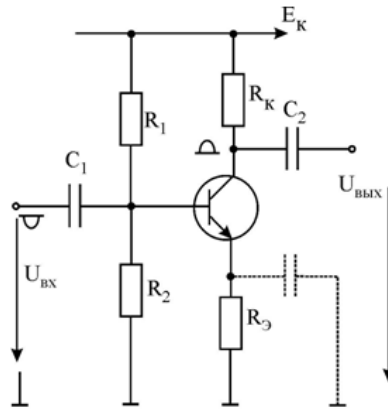


Рисунок 8.4 – Схема усилительного каскада с ОЭ

Нагрузкой коллекторной цепи является резистор  $R_K$ .

Коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_U = U_{вых} / U_{вх} = -R_K / R_Э. \quad (8.3)$$

Знак « $\rightarrow$ » указывает на то, что напряжение на коллекторе противофазно напряжению на базе.

Резисторы в цепи смещения должны обеспечить напряжение на коллекторе в режиме покоя  $E_K/2$ . Они вычисляются по формулам:

$$R_1 = 0,1 E_K \beta R_Э / U_B;$$

$$R_2 = 0,1 E_K \beta R_Э / (E_K - U_B).$$

Напряжение  $U_B = U_Э + 0,7$  В. Напряжение  $U_Э$  определяется током покоя и сопротивлением  $R_Э$  и выбирается таким, чтобы в режиме покоя напряжение на эмиттере составляло не менее 1 В, что обеспечивает хорошую температурную стабилизацию.

Входное и выходное сопротивления каскада определяются формулами:

$$R_{вх} = R_1 // R_2 // [(\beta + 1)(R_Э // R_n)];$$

$$R_{вых} \approx R_K.$$

Входное сопротивление каскада выражается так же, как и для эмиттерного повторителя, а выходное определяется сопротивлением  $R_K$ , составляю-

щим обычно несколько кОм. Высокое выходное сопротивление является недостатком усилительного каскада с общим эмиттером.

Отрицательные обратные связи (ООС) в усилителе с общим эмиттером снижают коэффициент усиления, однако широко используются для температурной стабилизации каскада, снижения выходного сопротивления и повышения входного сопротивления, а также для уменьшения линейных искажений вносимых каскадом. Различают ООС по току и по напряжению.

*Отрицательная обратная связь по току*

ООС по току реализуется резистором  $R_Э$  в цепи эмиттера (рисунок 8.5).

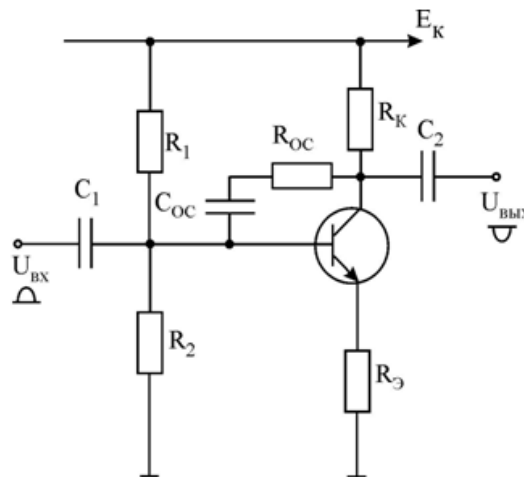


Рисунок 8.5 – Схема усилительного каскада с ОЭ с обратной связью по току и напряжению

Рассмотрим влияние этого резистора на температурный режим транзистора. В режиме покоя ( $E_T=0$ ) напряжение базы  $U_B=\text{const}$ . Пусть в результате повышения температуры эмиттерный ток транзистора  $I_Э$  начал возрастать. Этот ток создает падение напряжения на резисторе  $R_Э$ , поэтому управляющее напряжение ( $U_{БЭ}=U_B-I_ЭR_Э$ ) уменьшится, и ток  $I_Э$  вернется к исходной величине (см. правило 4 пп.2.1).

Таким образом, влияние температуры на токи эмиттера и коллектора существенно снизится.

Для сохранения высокого коэффициента усиления по напряжению на переменном токе резистор  $R_Э$  шунтируют конденсатором  $C_Э$ , сопротивление которого в диапазоне рабочих частот намного меньше сопротивления  $R_Э$  и  $r_Э$  ( $r_Э$  – собственное сопротивление эмиттера (см. правило 6 пп.2.1). Тогда коэффициент усиления по напряжению на переменном токе будет примерно равен

$$K_U \approx -R_K / r_{\Sigma}, \quad (8.4)$$

т.е. останется таким, каким был в отсутствие  $R_{\Sigma}$ .

#### *Отрицательная обратная связь по напряжению*

На температурный режим каскада ООС по напряжению влияния не оказывает и действует через цепочку  $R_{OC}$ ,  $C_{OC}$  (рисунок 8.5). Конденсатор  $C_{OC}$  выбирается так, чтобы его сопротивление в диапазоне рабочих частот было намного меньше, чем  $R_{OC}$ , поэтому свойства обратной связи определяются почти исключительно сопротивлением  $R_{OC}$ . Роль конденсатора  $C_{OC}$  – в развязке цепей коллектора и базы по постоянному току, т.е. ООС действует лишь на переменном токе.

Коэффициент усиления каскада при наличии ООС определяется формулой:

$$K_{U.OC} = K_U / (1 + \gamma K_U), \quad (8.5)$$

где  $\gamma$  – коэффициент передачи обратной связи.

ООС работает следующим образом. При подаче на вход каскада положительного полупериода переменного напряжения на коллекторе транзистора формируется отрицательный полупериод напряжения. Через цепочку  $R_{OC}$ ,  $C_{OC}$  этот отрицательный полупериод подается на базу. Поскольку сопротивление конденсатора намного меньше сопротивления резистора  $R_{OC}$ , то вносимый цепочкой обратной связи фазовый сдвиг незначителен. Следовательно, напряжение, подаваемое на базу через обратную связь, будет противофазно входному.

Очевидно, что действие обратной связи приведет к снижению коэффициента усиления каскада. Однако этот коэффициент будет гораздо меньше зависеть от  $\beta$  транзистора, чем в схеме без обратной связи. Уменьшатся нелинейные искажения сигналов, вносимые каскадом, расширится полоса пропускания. Другим положительным свойством, которое каскад приобретет за счет ООС, будет многократное снижение его выходного сопротивления.

Недостатком такого варианта ООС является снижение входного сопротивления каскада.

#### *Основные характеристики усилительных каскадов*

Важной характеристикой усилителя переменного тока является его амплитудная характеристика. Она характеризует зависимость выходного напряжения от входного на средних частотах (рисунок 8.6). Амплитудная характеристика определяется при синусоидальном входном сигнале заданной

частоты.

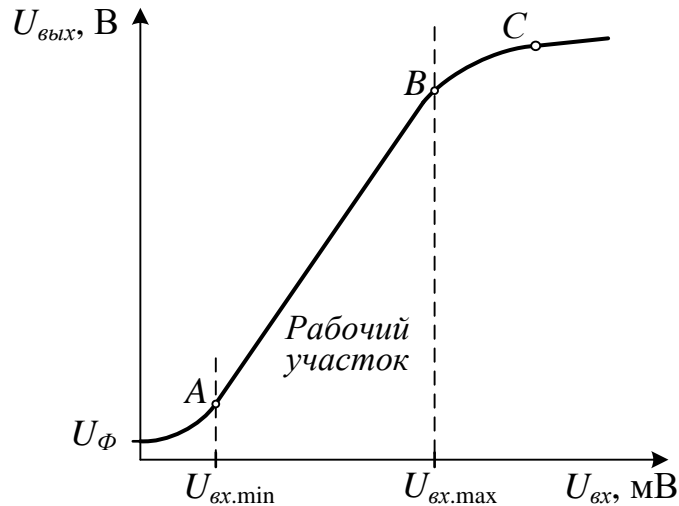


Рисунок 8.6 – Амплитудная характеристика усилителя

При отсутствии входного сигнала ( $U_{BX} = 0$ ) на выходе усилителя регистрируется некоторое фоновое напряжение  $U_{\Phi}$  из-за наводок от внешних источников помех, пульсаций источника питания и внутренних шумов усилителя. При  $U_{BX} \geq U_{BXmin}$  (правее точки  $A$ ) полезный сигнал начинает превышать уровень фона, и выходное напряжение нарастает пропорционально входному напряжению. В точке  $B$  рост выходного напряжения существенно замедляется, так как начинается ограничение выходного сигнала. Сначала начинают «срезаться» вершины одной из полувольт синусоидального сигнала (положительной или отрицательной), а затем и обеих (примерно в точке  $C$ ). С каких полувольт начинается процесс ограничения зависит от напряжения  $U_{0K}$  покоя транзистора. При  $U_{0K} < 0,5E_{II}$  первыми начинают «срезаться» вершины отрицательных полувольт выходного синусоидального сигнала. При  $U_{0K} > 0,5E_{II}$  первыми начинают «срезаться» вершины положительных полувольт. Правее точки  $C$  выходной синусоидальный сигнал превращается в последовательность почти прямоугольных импульсов.

Таким образом, при уровне входного сигнала меньше  $U_{BX.min}$  мы не сможем отличить полезный сигнал от помех, в случае  $U_{BX} \geq U_{BX.max}$  выходной сигнал будет иметь нелинейные искажения, рабочим участком является участок  $A-B$ .

Основными параметрами усилителя принято считать:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ ;
- коэффициент усиления по току  $K_I$ ;
- входное сопротивление усилителя  $R_{BX}$ ;



- выходное сопротивление усилителя  $R_{вых}$ .

Названные параметры, как правило, рассчитываются на средних частотах, т.е. в полосе пропускания усилителя, когда влиянием всех реактивных элементов схемы можно пренебречь. Зависимость коэффициента усиления от частоты называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ) усилителя (рисунок 8.7), которая определяется как зависимость коэффициента усиления  $K$  от частоты  $f$  входного сигнала при постоянном действующем значении напряжения на входе  $U_{вх} = const$ . Она характеризует частотные свойства усилителя, т.е. его способность усиливать сигналы в определённом диапазоне частот, называемом *частотной полосой пропускания*. В пределах этой области коэффициент усиления усилителя наиболее стабилен и обозначается –  $K_0$ .

Для удобства построения амплитудно-частотной характеристики значения частот откладываются в логарифмическом масштабе.

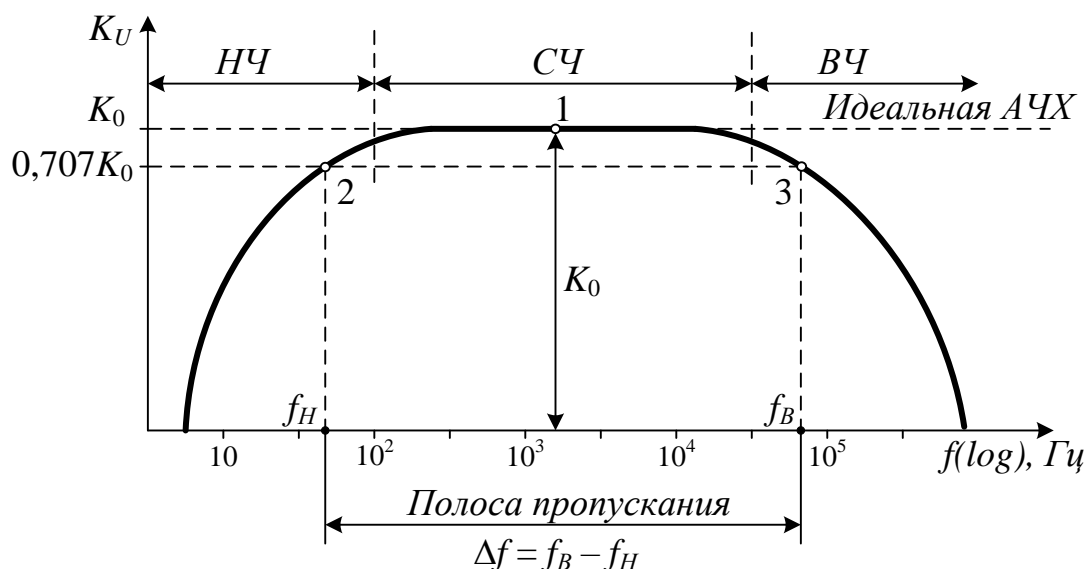


Рисунок 8.7 – Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Нижнюю и верхнюю граничные частоты определяют обычно из условия:

$$K_U(f_H) = K_U(f_B) = \frac{\sqrt{2}}{2} K_0 = 0,707 K_0, \quad (8.6)$$

где  $K_0$  является средним значением коэффициента усиления в области средних частот.

Частотная полоса пропускания определяется по выражению:

$$\Delta f = f_B - f_H. \quad (8.7)$$

**Определение частотной полосы пропускания** проводится в следующем порядке:

- на амплитудно-частотной характеристике усилителя (рисунок 8.7) выбирается точка 1, соответствующая средней величине наиболее стабильного значения коэффициента усиления  $K_0$ .

- разделив эту величину ( $K_0$ ) на  $\sqrt{2}$ , откладывается полученное значения на оси  $K$  (на рисунке 8.7 это величина обозначена  $0,707K_0$ );

- проведя перпендикуляр к оси  $K$  от точки  $0,707K_0$ , определяются точки пересечения 2 и 3 с графиком АЧХ усилителя;

- проведя перпендикуляр из точек 2 и 3 к оси  $f$  определяется верхняя  $f_B$  и нижняя  $f_H$  границы частотной полосы пропускания усиленного сигнала;

- по выражению (8.7) определяется величина частотной полосы пропускания  $\Delta f$ .

Частотная полоса пропускания определяет класс аудиосистем и указывается в паспортных данных аудиоустройств, содержащих в своем составе усилительные каскады.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучить раздел «Транзисторы» [2, с. 88-150] и сведения, изложенные в п.2 настоящей работы.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. *Измерение статического коэффициента передачи тока базы транзистора ( $\beta$ )*

4.1.1. Соберите схему, изображённую на рисунке 8.8, выбрав необходимые компоненты из имеющихся библиотек.

4.1.2. Установите значения сопротивлений:  $R_1=1,5$  кОм,  $R_2=100$  кОм,  $R_3=47$  кОм,  $E_1=5$  В,  $E_2=10$  В. Для установки заданной величины необходимо кликнуть дважды левой клавишей мыши по элементу схемы и во вкладке *Value* (величина) открывшегося окна установить необходимое значение и его единицу измерения. При этом, целые и дробные части смешанного числа отделяются не запятой, а точкой. Для выбора модели транзистора необходимо после двойного клика по знаку транзистора выбрать вкладку *Models* (модели), в окне *Library* (библиотека) выбрать библиотеку *2n*, а в окошке *Model* – модель транзистора *2N3904*. Завершить сделанный выбор, нажав кнопку *OK*.

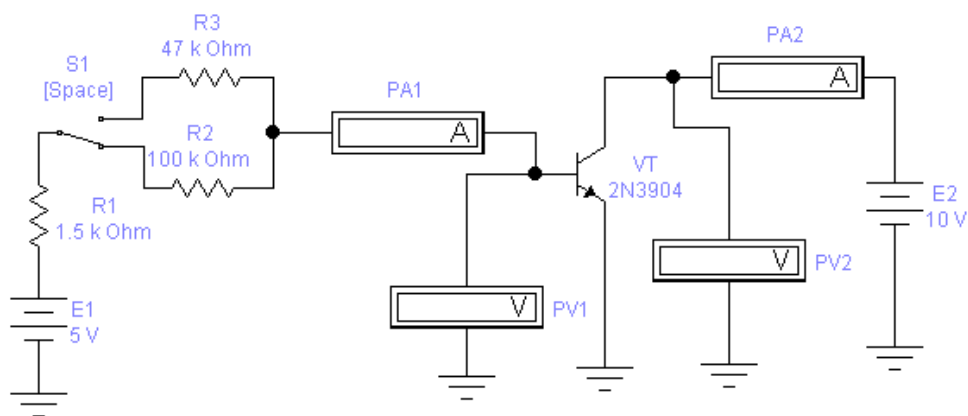


Рисунок 8.8 – Схема для определения коэффициента усиления транзистора

4.1.3. Установите ключ  $S_1$  клавишей *Space* (пробел) в положение «вниз», замыкая его на  $R_2$ . Установите  $E_1 = E_B = 2,68$  В. Включите схему и запишите результаты измерения тока базы  $I_B$ , напряжения коллектор-эмиттер  $U_{КЭ}$  и база-эмиттер  $U_{БЭ}$ , тока коллектора  $I_K$  в таблицу 8.1. По полученным результатам подсчитайте, используя выражение (8.1), статический коэффициент передачи тока базы  $\beta$  транзистора. Повторите измерения и расчёт коэффициента  $\beta$  для значений  $E_B = 5$  В и 5,7 В. Результаты запишите в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты измерений и расчётов коэффициента  $\beta$

Положение ключа $S_1$	$R$ в цепи базы	$E_B$ , В	$I_B$ , мА	$U_{КЭ}$ , В	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$\beta$	$R_{exVT}$ , кОм
$S_1$ – вниз	101,5 кОм	2,68						
		5,0						
		5,7						
$S_1$ – вверх	48,5 кОм	2,68						
		5,0						
		5,7						

4.1.4. Переключите тумблер  $S_1$  клавишей *Space* в положение «вверх», замыкая его на  $R_3$ . Повторите измерения для значений  $E_B = 2,68$ , 5 и 5,7 В. Проверьте, как изменяются напряжения  $U_{БЭ}$ , ток базы  $I_B$  и ток коллектора  $I_K$  при разных значениях сопротивления в цепи базы. Запишите результаты в таблицу 8.1.

4.1.5. Используя выражение (8.1), рассчитайте  $\beta$  для каждого значения

сопротивления в цепи базы ( $R_1 + R_2 = 101,5$  и  $R_1 + R_3 = 49,5$  кОм). Установите, как зависит ток коллектора от тока базы?

4.1.6. Определите входное сопротивление транзистора  $R_{exVT}$  для обоих сопротивлений в цепи базы (делением напряжения  $U_{BЭ}$  на базовый ток  $I_B$ ). Запишите результаты в таблицу 8.1. Установите, зависит ли входное сопротивление транзистора от тока базы?

#### 4.2. Исследование транзисторного ключа

4.2.1. Соберите схему для исследования работы транзистора в ключевом режиме (рисунок 8.9). Установите значение сопротивлений:  $R_1 = 10$  кОм;  $R_2 = 27$  кОм;  $R_3 = 2$  кОм;  $E_1 = 15$  В.

4.2.2. Для выбора транзистора из группы транзисторов библиотеки *Transistors* (кнопка с изображением транзистора) переместите пиктограмму на транзистор типа *n-p-n* на рабочее поле. Выберите модель транзистора. Для этого необходимо подвести указатель мыши к изображению транзистора и два раза нажать по нему мышью. В появившемся диалоговом окне в окне *Library* (библиотека) выбрать библиотеку *2n*, а в окошке *Model* – модель транзистора *2N2218*. После этого левой клавишей мыши нажать клавишу *OK*.

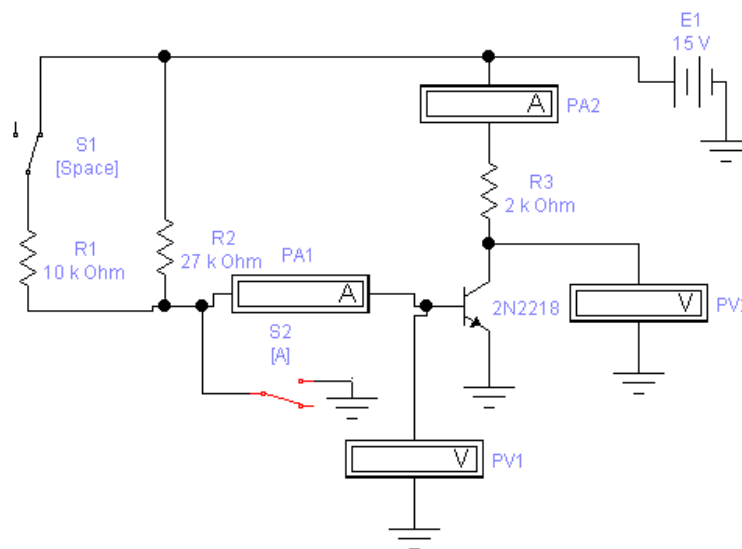


Рисунок 8.9 – Схема для исследования работы транзистора в ключевом режиме

4.2.3. Включите схему. Ключ  $S_2$  включите вверх, подав на базу транзистора потенциал «земли» (т.е. 0 В). Ключ  $S_1$  отключите влево, чтобы смещение на базу подавалось только через резистор 27 кОм. Снимите показания приборов и запишите их в таблицу 8.2.

4.2.4. Переключите ключ  $S_2$  влево, отсоединив базу от «земли». Измерьте значение напряжений  $U_{БЭ}$ ,  $U_{КЭ}$  и токов  $I_K$  и  $I_B$ . Вычислите коэффициент  $\beta$ .

4.2.5. Ключом  $S_1$  подключите параллельно резистору  $R_2 = 27$  кОм резистор  $R_1 = 10$  кОм. Как изменились значения напряжений  $U_{БЭ}$ ,  $U_{КЭ}$  и токов  $I_K$ ,  $I_B$ ? Чему стал равен коэффициент  $\beta$ ? Результаты запишите в таблицу 8.2. Как можно доказать, что транзистор вошёл в насыщение?

Таблица 8.2

Положение ключей $S$		$I_B$ , мА	$U_{БЭ}$ , В	$U_{КЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$\beta$
$S_2$ —«вверх»	$S_1$ —«влево»					
$S_2$ —«вверх»	$S_1$ —«влево»					
$S_2$ —«вниз»	$S_1$ —«вправо»					

### 4.3. Исследование эмиттерного повторителя

4.3.1. Соберите схему для измерения  $\beta$  (рисунок 8.10). Установите значение сопротивления  $R_1=1$  кОм,  $R_2=130$  кОм,  $R_3=150$  кОм,  $R_4=7,5$  кОм  $R_5=1$  кОм  $E_2=15$  В,  $C_1=1,5$  мкФ. В качестве модели транзистора выберите транзистор типа 2N2218, аналогично п.4.2.2.

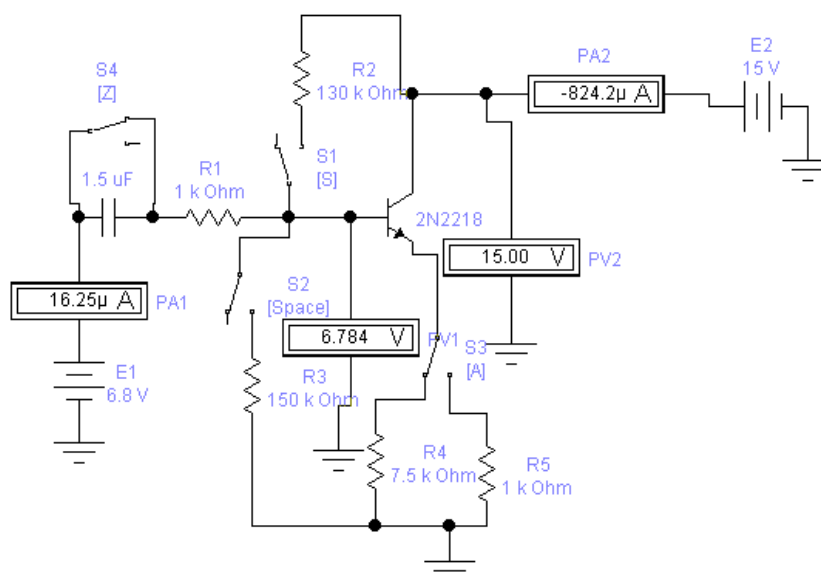


Рисунок 8.10 – Схема для исследования эмиттерного повторителя

4.3.2. Включите схему. Ключи  $S_1$ ,  $S_2$  включите влево, сняв с базы напряжение смещения. Ключ  $S_3$  в цепи эмиттера поставьте в положение резистора  $R_4=7,5$  кОм (влево). Ключом  $S_4$  закоротите конденсатор  $C_1$ .

4.3.3. Подайте на вход каскада постоянное напряжение 6,8 В. Включите схему.

4.3.4. Измерьте ток базы  $I_B$ , входное напряжение  $U_{БЭ}$  относительно «земли». Рассчитайте входное сопротивление каскада  $R_{вх}$  в отсутствие цепей смещения. Используя выражение (8.2) определите  $\beta$  транзистора по входному сопротивлению. Результаты запишите в таблицу 8.3.

4.3.5. Ключ в цепи эмиттера  $S_3$  переключите в положение резистора  $R_5=1$  кОм (вправо) и повторите п.п. 4.3.3 и 4.3.4. Как изменилось входное сопротивление каскада? Рассчитайте его. Вычислите  $\beta$  транзистора по входному сопротивлению для данного пункта. Результат запишите в таблицу 8.3.

Таблица 8.3

Положение ключа $S_3$	$I_B$ , мкА	$U_{БЭ}$ , В	$R_{вх}$ , Ом	$\beta$
$S_3$ –«влево»				
$S_3$ –«вправо»				

4.3.6. Вместо постоянного напряжения на вход каскада подайте с функционального генератора синусоидальное напряжение амплитудой  $U_m=5$  В и частотой  $f=1000$  Гц, минуя ёмкость на входе (ключ  $S_4$  в положении «вверх»). Канал  $A$  осциллографа подключите к эмиттеру транзистора, т.е. на выход каскада, а канал  $B$  осциллографа к выходу функционального генератора (т.е. на вход каскада). Зарисуйте полученные осциллограммы. Повторяет ли выходное напряжение по форме входное напряжение?

4.3.7. Ключ  $S_4$  переведите в положение «вниз» и подайте синусоидальное напряжение с функционального генератора через ёмкость, включенную на входе. Повторите п. 4.3.6. и зарисуйте полученные осциллограммы.

4.3.8. Ключами  $S_1$  и  $S_2$  подайте на базу напряжение смещения (ключи  $S_1$  и  $S_2$  в положении «право»). Отключив функциональный генератор, измерьте напряжение базы в режиме покоя. Составляет ли оно  $(E_K/2)+0,7$  В? Переключая ключ  $S_3$  вправо-влево, проверьте, влияет ли эмиттерное сопротивление на величину напряжения смещения, измеряя вольтметром напряжение  $U_{БЭ}$  и величину входного сопротивления каскада  $R_{вх}$ , рассчитав его. Если влияет, то почему? Проверьте, влияет ли эмиттерное сопротивление на величину тока в цепи коллектора, измерив его. Результат запишите в таблицу 8.4.

Таблица 8.4

Положение ключей			$U_{БЭ}$ , В	$I_B$ , мА	$R_{BX}$ , Ом	$U_{КЭ}$ , В	$I_K$ , мА
$U_{Г}=0$ В	$S_1, S_2$ «вправо»	$S_3$ —«влево»					
		$S_3$ —«вправо»					
$U_{Г}=0,5$ В	$S_1, S_2$ «вправо»	$S_3$ —«влево»					
		$S_3$ —«вправо»					

4.3.9. Снова подайте на вход сигнал с функционального генератора. Запишите осциллограмму выходного напряжения. Почему она изменилась? Переключая ключ  $S_3$  вправо-влево, проверьте, влияет ли эмиттерное сопротивление на величину выходного напряжения  $U_{КЭ}$  (величину  $U_{КЭ}$  предварительно измерить) и величину входного сопротивления каскада  $R_{BX}$  (величину  $R_{BX}$  предварительно рассчитать). Проверьте, влияет ли эмиттерное сопротивление на величину тока в цепи коллектора (величину тока предварительно измерить). Результат запишите в таблицу 8.4.

4.3.10. Увеличивайте амплитуду сигнала с выхода функционального генератора до появления ограничений выходного напряжения. Симметричны ли ограничения? Объясните их появление.

#### 4.4. Исследование усилителя с общим эмиттером

4.4.1. Соберите схему согласно рисунку 8.11. Ключом  $S_3$  отключите генератор от усилительного каскада (ключ  $S_3$  «вниз»).

4.4.2. Ключом  $S_2$  отключите цепь отрицательной обратной связи (ООС) по напряжению (ключ  $S_2$  «влево»). Ключом  $S_1$  отключите конденсатор в эмиттерной цепи (ключ  $S_1$  «вниз»). Включите цепь. Определите по выражению (8.3) значение коэффициента усиления  $K_U$  по напряжению каскада. Результат запишите в таблицу 8.5.

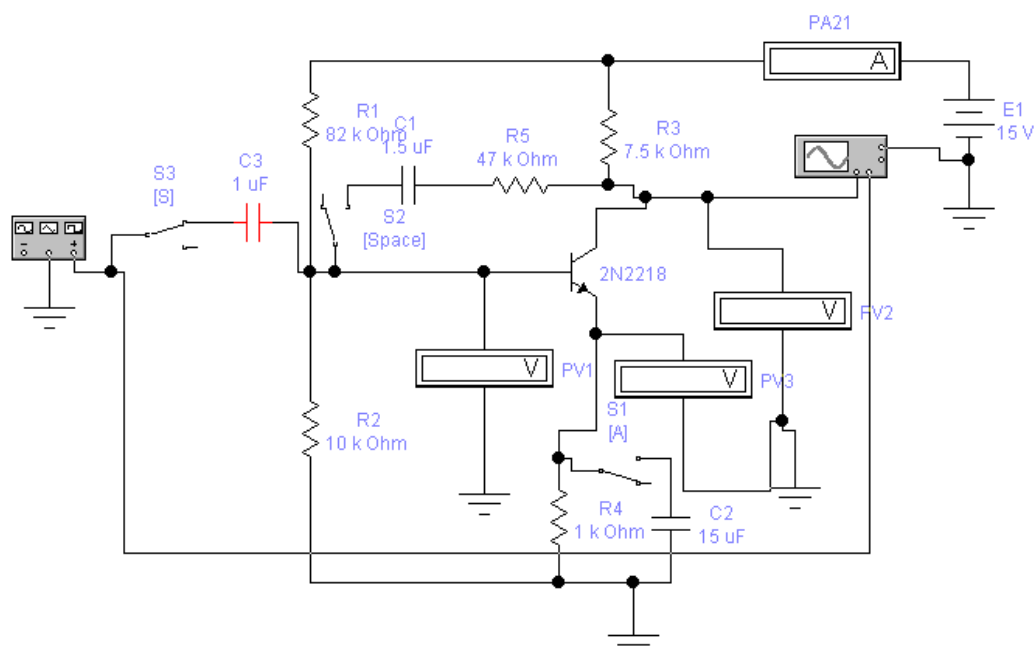


Рисунок 8.11 – Схема для исследования усилительного каскада с ОЭ

Таблица 8.5

Положение ключей			$U_{\text{Э}}, \text{В}$	$U_{\text{К}}, \text{В}$	$U_{\text{Б}}, \text{В}$	$I_{\text{К}}, \text{мА}$	$K_U$
$U_{\text{Г}} = 0 \text{ В}$	$S_3, S_1$ вниз», $S_2$ «влево»						
$U_{\text{Г}} = 0,5 \text{ В}$	$S_3$ «вверх»	$S_1$ «вниз», $S_2$ «влево»					
		$S_1$ «вверх», $S_2$ «влево»					
		$S_1$ «вверх», $S_2$ «вправо»					

4.4.3. Измерьте вольтметрами напряжения на эмиттере, коллекторе и базе транзистора в режиме покоя. Проверьте обеспечено ли значение напряжения  $E_{\text{к}}/2$  на коллекторе транзистора?

4.4.4. Подайте на вход каскада с функционального генератора напряжение амплитудой 0,5 В и частотой  $f = 1 \text{ кГц}$ , замкнув ключ  $S_3$  (ключ  $S_3$  в положении «вверх»).

4.4.5. Измерьте осциллографом амплитуду напряжения на выходе каскада. Соответствует ли коэффициент усиления определенному значению? Проверьте, инвертируется ли выходной сигнал? Канал А осциллографа подключите к коллектору, т.е. на выход каскада, а канал В осциллографа к выходу функционального генератора (т.е. на вход каскада). Зарисуйте осциллограммы напряжений (или снимите скриншот осциллографа).



4.4.6. Ключом  $S_1$  подключите конденсатор параллельно цепи эмиттера (ключ  $S_1$  в положении «вверх»). Уменьшите амплитуду входного напряжения, чтобы сигнал не искажался. Чему стал равен коэффициент усиления по напряжению? Определите, используя выражение (8.4), собственное сопротивление эмиттера (правило 6 п. 2.1) и коэффициент усиления каскада. Результат запишите в таблицу 8.5.

4.4.7. Ключом  $S_2$  замкните цепь обратной связи по напряжению (ключ  $S_2$  в положении «вправо»). Определите коэффициент усиления по напряжению? Определите коэффициент передачи обратной связи  $\gamma$ , получив его из формулы (8.5). Результат запишите в таблицу 8.5.

#### 4.5. Исследование амплитудно-частотной характеристики транзисторного усилителя

4.5.1. Для схемы (рисунок 8.11) установить следующие положения ключей:  $S_3$ ,  $S_1$  «вверх»,  $S_2$  «вправо». Настроить функциональный генератор (*Function Generator*) на режим синусоидальных колебаний. Установить длительность рабочего цикла (*Duty cycle*) 50 %, амплитудное значение выходного сигнала (*Amplitude*)  $U_{\text{ВЫХ}}=70,7$  мВ, постоянную составляющую выходного сигнала генератора (*Offset*)  $U=0$  В. Вольтметр  $PV2$  настроить в режим измерения  $AC$ .

4.5.2. Включить схему. Изменяя частоту сигнала  $f$  генератора в соответствии с данными таблицы 8.6, фиксировать вольтметром  $PV2$  величину выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  усилителя без отрицательной обратной связи (ООС) (ключ  $S_2$  «влево») и с обратной связью (ключ  $S_2$  «вправо»). Результаты измерений записать в таблицу 8.6.

Таблица 8.6 – Исходные данные для построения АЧХ усилителя

$f$ , кГц	0,05	0,1	0,15	0,2	0,5	1	10	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В без ООС														
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В с ООС														
$K_U$ , без ООС														
$K_U$ , с ООС														

4.5.3. Вычислите, используя выражение (8.3), коэффициенты усиления

усилителя для разных частот, принимая за  $\Delta U_{\text{ex}}$  усилителя амплитудное значение генератора. Запишите результаты расчётов в таблицу 8.6 и постройте амплитудно-частотные характеристики усилителя без ООС и с ООС.

4.5.4. Определите, используя выражения (8.6, 8.7), частотные полосы пропускания для усилителя без ООС и с ООС. Сравнив полосы пропускания усилителя без ООС и усилителя с ООС, сделайте вывод о целесообразности использования ООС в усилителях.

#### 4.6. Исследование амплитудной характеристики транзисторного усилителя

4.6.1. Для схемы (рисунок 8.11) настроить функциональный генератор *Function Generator* на режим синусоидальных колебаний. Установить начальную частоту (*Frequency*)  $f=5$  кГц, длительность рабочего цикла (*Duty cycle*) 50 %, амплитудное значение выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ.м}}=0$  мВ, постоянную составляющую выходного сигнала генератора *Offset*  $U=0$  В.

4.6.2. Проверить параметры вольтметров. Вызвав диалоговое окно *Voltmeter Properties*, открыть вкладку *Value* и в окошке *Mode* задать тип вольтметра – АС (вольтметр переменного тока). В окошке *Resistance (R)* установить внутреннее сопротивление вольтметра 1 МОм.

4.6.3. Включить схему с помощью выключателя в правом верхнем углу экрана. Определить амплитудную характеристику усилителя на частоте  $f=5$  кГц. Для этого, изменяя амплитудное значение синусоидального сигнала  $U_{\text{ВХ.м}}$  на входе усилителя в соответствии с данными таблицы 8.7, измерьте при помощи вольтметров *PV1* и *PV2* действующие значения входных и выходных напряжений усилительного каскада. Результаты запишите в таблицу 8.7 и постройте по ним амплитудную характеристику, на которой отметьте границы рабочего участка.

Таблица 8.7

$U_{\text{ВХ.м}}$ , мВ	0	10	20	80	100	150	200	250	500	1000	1500
$U_{\text{ВХ}}$ , мВ											
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В											
$K_U$											

4.6.4. Вычислить, используя выражение (8.3), коэффициент усиления усилителя для разных входных напряжений, запишите полученные результаты в таблицу 8.7. На каких участках амплитудной характеристики коэффици-

ент усиления носит искажённый характер, а на каких истинный?

4.6.5. Исследовать форму выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  осциллографом в конце рабочего участка  $AX$  и экспериментально определить, при каком входном напряжении  $U_{\text{вх}}$  происходит искажение формы синусоиды. Для этого:

- двойным щелчком левой клавиши мыши по пиктограмме осциллографа открыть осциллограф;
- установить длительность развертки (*Time base*) 0,5 мс/дел;
- установить чувствительность отклонения канала  $A$  500 мВ/дел, а канала  $B$  – 5 В/дел;
- установить режим  $DC$  работы каналов  $A$  и  $B$ .

Увеличивая амплитуду входного сигнала зафиксировать на экране осциллографа появление искажений выходного сигнала усилителя. Записать значения входного сигнала, при котором наступают искажения и зарисовать форму выходного напряжения усилителя (или снять скриншот).

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать титульный лист (приложение А), цель лабораторной работы, протокол исследования, в котором представить: электрические схемы проведения эксперимента, таблицы результатов, графики АЧХ и АХ, скриншоты полученных осциллограмм (п.п. 4.3.6, 4.3.7, 4.3.9, 4.4.5, 4.6.5), использованные расчётные зависимости и выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Как зависит коллекторный ток транзистора от напряжения между базой и эмиттером? Как зависит коллекторный ток транзистора от температуры?

6.2. Как зависит от коллекторного тока собственное сопротивление эмиттера транзистора?

6.3. Для чего необходимо напряжение смещения в каскадах эмиттерного повторителя и усилителя с общим эмиттером? Из каких соображений выбираются сопротивления резисторов в цепи смещения?

6.4. Чему равен коэффициент усиления по напряжению каскада с общим эмиттером в случае  $R_{\text{э}} = 0$ ?

6.5. Зависит ли напряжение смещения на базе транзистора от сопротивления  $R_{\text{э}}$  каскадах эмиттерного повторителя и усилителя с общим эмиттером?

6.6. Какие свойства приобретает усилитель с общим эмиттером в результате действия отрицательных обратных связей по току и напряжению?

## 9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- измерение входных токов операционного усилителя (ОУ);
- оценка величин среднего входного тока и разности входных токов ОУ;
- измерение напряжения смещения ОУ;
- измерение дифференциального входного сопротивления ОУ;
- вычисление выходного сопротивления ОУ;
- измерение скорости нарастания выходного напряжения ОУ.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Операционный усилитель – это усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, имеющий дифференциальный вход и один общий выход. ОУ – это аналоговая интегральная микросхема, снабженная пятью выводами. Два вывода ОУ используются в качестве входных, один – является выходным и еще два вывода используются для подключения источника питания. Условно-графические изображения ОУ приведены на рисунке 9.1.

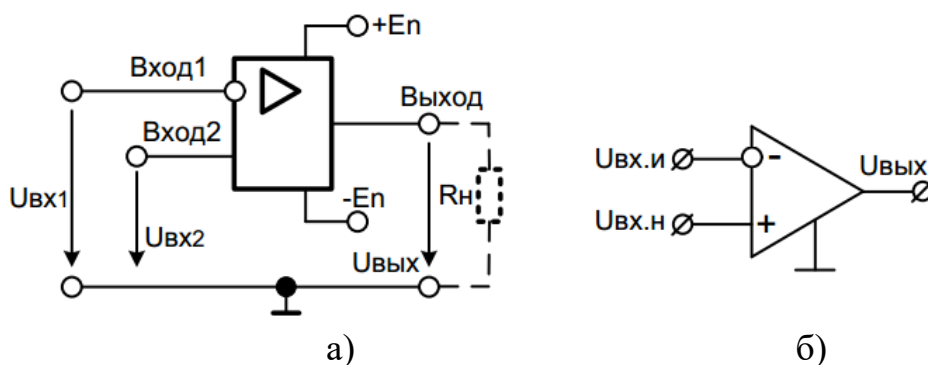


Рисунок 9.1 – Условно-графические изображения ОУ в электронных схемах: а – в виде интегральной схемы; б – упрощенное обозначение

С учётом фазовых соотношений входного и выходного сигналов один из входных выводов (вход 1) называется неинвертирующим, а другой (вход 2) – инвертирующим. При подаче сигнала на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с приращением входного сигнала.

ла. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала имеет обратный знак (противоположный по фазе) по сравнению с приращением входного сигнала. Инвертирующий вход часто используют для введения в операционный усилитель внешних отрицательных обратных связей.

Выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  связано с входными напряжениями  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  соотношением:

$$U_{вых} = K_U (U_{вх1} - U_{вх2}), \quad (9.1)$$

где  $K_U$  – собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Из приведенного выражения следует, что ОУ воспринимает только разность входных напряжений, называемую дифференциальным входным сигналом и нечувствителен к любой составляющей входного напряжения, воздействующей одновременно на два его входа (синфазный входной сигнал). Коэффициент усиления  $K_U$  в ОУ должен стремиться к бесконечности, однако на практике он ограничивается значением  $10^5$ - $10^6$ .

В качестве источника питания ОУ используют двухполярный источник напряжения  $(+E_{п}, -E_{п})$ . Средний вывод этого источника является общей шиной для входных и выходных сигналов и в большинстве случаев не подключается к ОУ. В реальных ОУ напряжение питания лежит в диапазоне 3-18 В. Использование источника питания со средней точкой предполагает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжений ОУ.

Типичная зависимость выходного напряжения от входного для интегрального ОУ показана на рисунке 9.2. Из рисунка видно, что даже при малой величине входного напряжения на выходе ОУ появляется сигнал практически соответствующий напряжению питания. Это объясняется значительным коэффициентом усиления ОУ. На рисунке 9.2 также поясняется смысл напряжения смещения нуля ОУ, приводящего к возникновению выходного сигнала ОУ даже при отсутствии на его входах информационного сигнала.

Интегральный операционный усилитель характеризуется рядом параметров, описывающих этот компонент с точки зрения качества выполнения им своих функций.

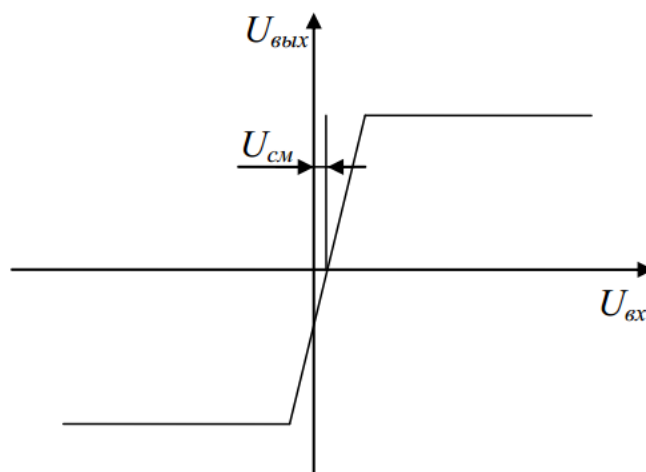


Рисунок 9.2 – Передаточная характеристика ОУ

Идеальный операционный усилитель имеет следующие характеристики:

- входное сопротивление (для дифференциального и синфазного сигнала) равно бесконечности, а входные токи – нулю;
- выходное сопротивление (при разомкнутой обратной связи) равно нулю;
- коэффициент усиления по напряжению равен бесконечности;
- коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю;
- выходное напряжение равно нулю, когда напряжение на обоих входах одинаково (напряжение смещения равно нулю);
- выходное напряжение может изменяться мгновенно (бесконечная скорость нарастания);
- перечисленные характеристики не зависят от температуры и изменений напряжения питания;

Среди параметров, обычно приводимых в справочных данных, основными являются следующие:

1. *Средний входной ток  $I_{BX}$* . В отсутствии сигнала на входах ОУ через его входные выводы протекают токи, обусловленные базовыми токами входных биполярных транзисторов или токами утечки затворов ОУ с полевыми транзисторами на входе. Входные токи, проходя через внутреннее сопротивление источника входного сигнала, создают падение напряжения на входе ОУ, которые могут вызвать появление напряжения на выходе в отсутствии сигнала на входе. Компенсация этого падения напряжения затруднена тем, что токи входов реальных ОУ могут отличаться друг от друга на 10-20 %.

Входные токи ОУ можно оценить по среднему входному току, вычисляемому как среднее арифметическое токов инвертирующего и неинвертирующего входов:

$$I_{вх} = (I_1 + I_2) / 2, \quad (9.2)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – соответственно токи инвертирующего и неинвертирующего входов.

2. *Разность входных токов  $\Delta I_{вх}$ :*

$$\Delta I_{вх} = I_1 - I_2. \quad (9.3)$$

В справочниках указывается модуль этой величины.

Схема для измерения входных токов представлена на рисунке 9.3.

3. *Коэффициент усиления напряжения на постоянном токе  $K_U$*  – показатель, определяющий насколько хорошо ОУ выполняет основную функцию – усиление входных сигналов. У идеального ОУ  $K_U$  стремится к бесконечности.

Коэффициент усиления напряжения схемы усилителя на ОУ (рисунок 9.4) вычисляется по формуле:

$$K_U = -R_2 / R_1. \quad (9.4)$$

4. *Напряжение смещения  $U_{см}$*  – значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы напряжение на его выходе было равно нулю. Величину  $U_{см}$  можно вычислить, зная выходное напряжение  $\Delta U_{вых}$  при отсутствии напряжения на входе и  $K_U$ :

$$U_{см} = \Delta U_{вых} K_U. \quad (9.5)$$

5. *Входное сопротивление  $R_{вх}$* . Различают две составляющие  $R_{вх}$ : дифференциальное  $R_{вх.диф}$  и  $R_{вх.сф}$  по синфазному сигналу (сопротивление утечки между каждым входом и «землёй»). Дифференциальное  $R_{вх.диф}$  для биполярных усилителей находится обычно в пределах от 10 кОм до 10 МОм. Величину  $R_{вх.сф}$  по синфазному сигналу определяется как отношение приращения входного синфазного напряжения  $\Delta U_{вх.сф}$  к вызванному приращению среднего входного тока  $I_{вх.ср}$ :

$$R_{вх.сф} = \Delta U_{вх.сф} / \Delta I_{вх.ср}. \quad (9.6)$$

Дифференциальное  $R_{вх.диф}$  наблюдается между входами ОУ и может быть определено по формуле:



$$R_{\text{вх.диф.}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}}, \quad (9.7)$$

где  $\Delta U_{\text{вх}}$  – изменение напряжения между входами ОУ;  $\Delta I_{\text{вх}}$  – изменение входного тока.

Схема для измерения дифференциального  $R_{\text{вх.диф.}}$  ОУ приведена на рисунке 9.5.

6. Выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  в интегральных ОУ составляет 20-2000 Ом.  $R_{\text{вых}}$  уменьшает амплитуду выходного сигнала, особенно при работе усилителя, на сравнимое с ним сопротивление нагрузки. Скорость нарастания выходного напряжения  $V_{U_{\text{вых}}}$  равна отношению изменения выходного напряжения ОУ ко времени его нарастания при подаче на вход скачка напряжения. Время нарастания определяется интервалом времени, в течение которого выходное напряжение на ОУ изменяется от 10 до 90 % от своих установившихся значений

$$V_{U_{\text{вых}}} = U_{\text{вых}} / t_{\text{уст}}. \quad (9.8)$$

Схема для измерения скорости нарастания выходного напряжения показана на рисунке 9.6. Измерения проводятся при подаче импульса в виде ступени на вход ОУ, охваченного отрицательной обратной связью (ООС) с общим коэффициентом усиления от 1 до 10.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучить принцип работы операционного усилителя ОУ LM741, его характеристики и параметры.

3.2. Для заданного преподавателем типа ОУ выписать из справочной литературы параметры исследуемого прибора.

3.3. Начертить схемы для исследования входных и выходных характеристик ОУ.

3.4. Показать начерченные схемы преподавателю для проверки.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Измерение входных токов. С помощью инструментальных средств программы Workbench собрать схему, изображённую на рисунке 9.3.

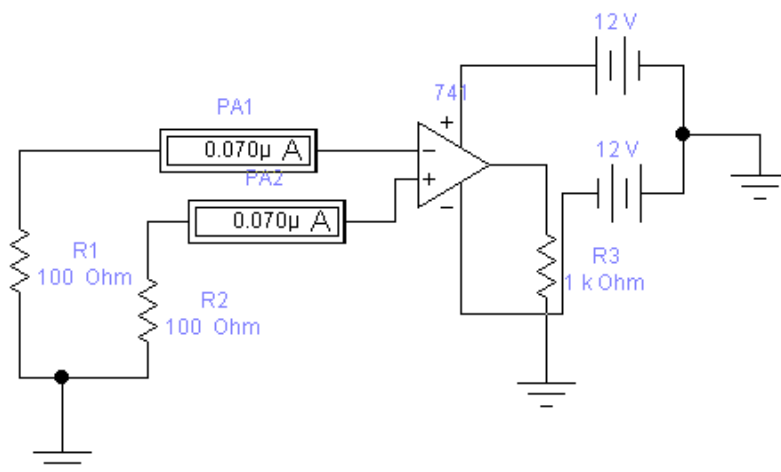


Рисунок 9.3 – Схема для измерения входных токов ОУ

4.1.1. Для выбора операционного усилителя из группы аналоговых компонентов библиотеки *Analog ICs* (кнопка с изображением микросхемы и аббревиатура *ANA*) переместить пиктограмму *3-Terminal Opamp* (операционный усилитель с пятью выводами) на рабочее поле. Выбрать модель операционного усилителя. Для этого подвести указатель мыши к операционному усилителю и, после изменения его вида в изображение руки, двойным щелчком левой клавиши мыши вызвать диалоговое меню *3-Terminal Opamp Properties*. В появившемся диалоговом окне в окошке *Library* (библиотека) выбрать библиотеку *default*, а в окошке *Model* – модель операционного усилителя 741. После этого левой кнопкой мыши нажать клавишу *OK*.

4.1.2. Включить схему. Измерить входные токи ОУ. По результатам измерений вычислить по (9.2) средний входной ток  $I_{BX}$  и по (9.3) разность  $\Delta I_{BX}$  входных токов ОУ. Результаты занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

№ эксперимента	Результаты измерений		Результаты вычислений	
4.1.	Ток $I_1$ неинвертирующего входа		Средний входной ток $I_{BX}$	
	Ток $I_2$ инвертирующего входа		Разность входных токов $\Delta I_{BX}$	
4.2.	Выходное напряжение $\Delta U_{ВЫХ}$		Коэффициент усиления $K_U$	
			Напряжение смещения $U_{CM}$	
4.3.	$I_{BX}$ , мкА, до коммутации		Изменение $\Delta U_{BX}$ , мВ	
	$I_{BX}$ , мкА, после коммутации		Изменение $\Delta I_{BX}$ , мкА	
	Выходное напряжение $U_{ВЫХ}$		Входное дифференциальное $R_{BX}$ , Ом	
	$U_{BX}$ , В			
4.4	$U_{ВЫХ}$ , В		Скорость нарастания $U_{ВЫХ}$	
	Время установления $U_{ВЫХ}$			
4.5	$R_{ВЫХ}$ , Ом			

#### 4.2. Измерение напряжения смещения

С помощью инструментальных средств программы Workbench собрать схему, изображённую на рисунке 9.4. Включить схему. Записать показания вольтметра в таблицу 9.1. По результатам измерения вычислить коэффициент усиления схемы, используя выражение (9.4) и напряжение смещения  $U_{CM}$  (9.5). Результаты также занести в таблицу 9.1.

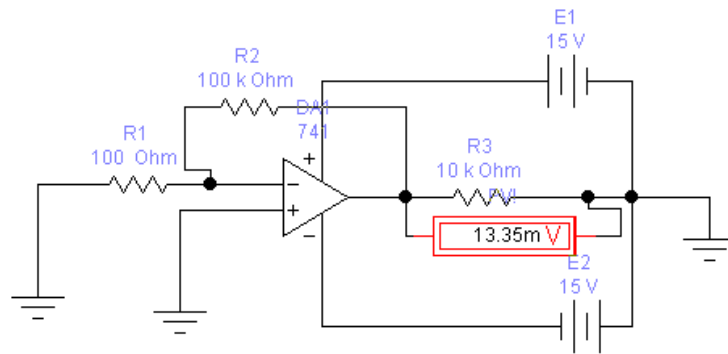


Рисунок 9.4 – Схема для измерения напряжения смещения ОУ

#### 4.3. Измерение входного и выходного сопротивлений

С помощью инструментальных средств программы Workbench собрать схему, изображённую на рисунке 9.5. Включить схему. Измерить входной ток  $I_{вх}$  и выходное напряжение  $U_{вых}$ , записать показания в таблицу 9.1. Переключить ключ клавишей [Space]. Измерить входной ток после переключения ключа. Рассчитать изменение входного напряжения ( $\Delta U_{вх} = U_{вх1} - U_{вх2}$ ) и тока ( $\Delta I_{вх} = I_{вх1} - I_{вх2}$ ). По полученным результатам вычислить, используя выражение (9.7), дифференциальное входное сопротивление ОУ. Результаты записать в таблицу 9.1.

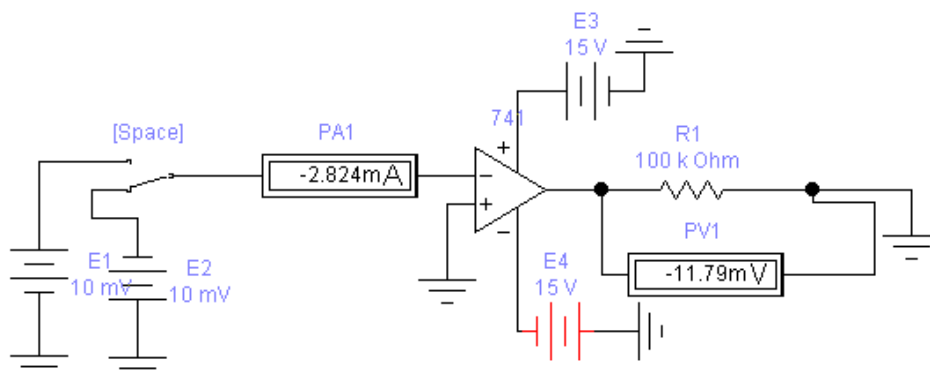


Рисунок 9.5 – Схема для измерения входного и выходного сопротивлений

Для измерения выходного сопротивления также воспользуемся схемой рисунка 9.5. Необходимо уменьшать сопротивление нагрузочного резистора  $R_3$  до тех пор, пока выходное напряжение  $U_{вых}$  не будет примерно равно половине значения, полученного в эксперименте измерения входного сопротивления. Записать значение сопротивления  $R_3$ , которое в этом случае приблизительно равно выходному сопротивлению ( $R_3 \approx R_{вых}$ ).

Доказательство: рассмотрим схему, изображенную на рисунке 9.6.

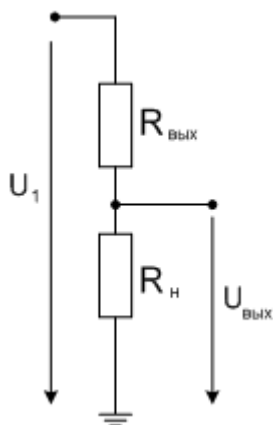


Рисунок 9.6 – Схема делителя напряжения

Здесь  $R_Н \gg R_{вых}$ , поэтому измеряемое  $U_{ВЫХ} \approx U_1$ .  $U_{вых} = \frac{1}{2}U_1$  в том случае, когда  $R_3 = R_Н \approx R_{вых}$ . Следовательно,  $R_{вых} = 75$  Ом. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу 9.1.

#### 4.4. Измерение времени нарастания выходного напряжения ОУ

С помощью инструментальных средств программы Workbench собрать схему, изображённую на рисунке 9.7.

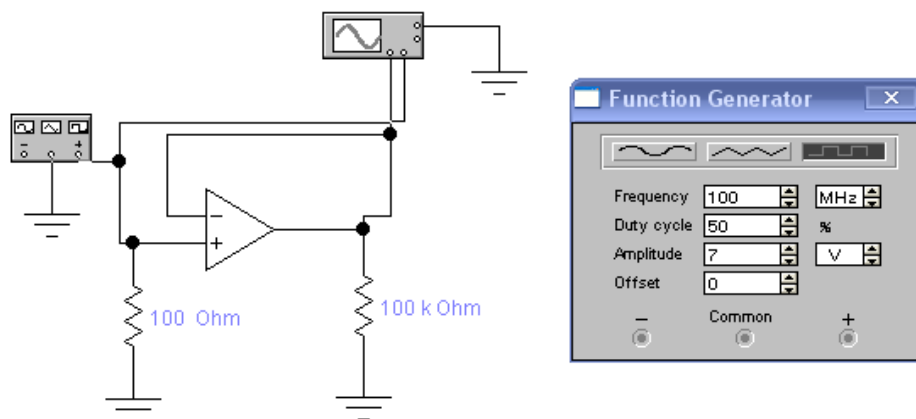


Рисунок 9.7 – Схема для измерения времени нарастания выходного напряжения ОУ

Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению осциллографа открыть его изображение на передней панели с информационными полями и экраном (рисунок 9.8.).

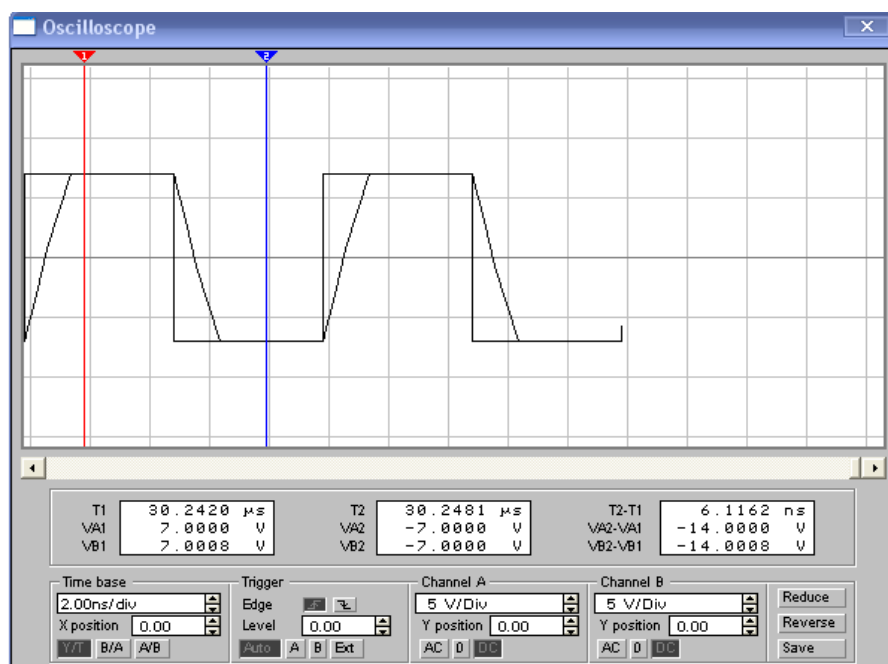


Рисунок 9.8 – Изображение передней панели осциллографа

Включить схему. Зарисовать осциллограмму. По осциллограмме определить величину выходного напряжения, время его установления и вычислить, используя выражение (9.8), скорость нарастания выходного напряжения в В/мкс. Записать результат в таблицу 9.1.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать цель работы, исследуемые схемы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицу с экспериментальными результатами, график полученных характеристик, выполненные в масштабе. В отчёте также приводятся результаты расчётов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Какова область применения ОУ?
- 6.2. Что такое идеальный ОУ, какова классификация ОУ?
- 6.3. При каких условиях реальный ОУ можно считать идеальным?
- 6.4. Каковы входные параметры ОУ?
- 6.5. Каковы передаточные параметры ОУ?

- 6.6. Каковы выходные параметры *ОУ*?
- 6.7. Каковы переходные параметры *ОУ*?
- 6.8. В чём заключаются основные достоинства *ОУ*, благодаря которым они широко применяются?
- 6.9. Отличается ли измеренное значение среднего  $I_{\text{вх}}$  от его номинального значения для *ОУ* LM741, взятого из паспортных данных?
- 6.10. Существенно ли отличие разности входных токов от номинального значения для *ОУ* LM741?
- 6.11. Сравните между собой величины входного и выходного сопротивлений *ОУ*. Какова схема замещения *ОУ* как элемента электрической цепи?
- 6.12. В чём причина возникновения входных токов *ОУ* и разности входных токов? К чему они приводят при работе схем на *ОУ*?

## 10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИНВЕРТИРУЮЩИХ И ИНВЕРТИРУЮЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

#### 1. ЦЕЛИ РАБОТЫ:

- измерение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя;
- определение разности фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ;
- исследование влияния коэффициента усиления неинвертирующего усилителя на постоянную составляющую выходного напряжения;
- измерение коэффициента усиления инвертирующего усилителя на ОУ;
- определение разности фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ;
- исследование влияния коэффициента усиления схемы на постоянную составляющую выходного напряжения.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Усилитель, охваченный последовательной ОС по выходному напряжению с коэффициентом передачи равным единице, называется повторителем напряжения (рисунок 10.1).

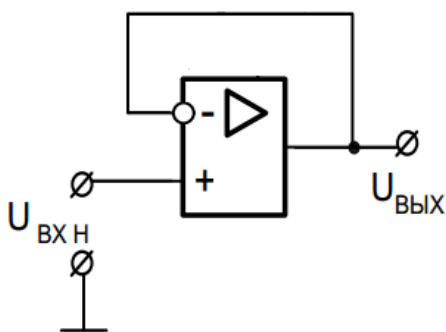


Рисунок 10.1 – Схема повторителя напряжения

Свойства такого усилителя подобны свойствам эмиттерного повторителя и для него выполняются условия:

$$U_{вх} = U_{вых};$$

$$R_{вх.оос} = R_{вх0}(1 + K_{Uоо});$$

$$R_{вых.оос} = R_{вых0}(1 + K_{Uоо}),$$

что хорошо согласуется со свойствами ОУ.

Действительно, напряжение, приложенное между входами ОУ, передается на выход с коэффициентом усиления  $K_{U_{00}}$ , т.е. при любом выходном напряжении

$$\Delta U_{вх} = \Delta U_{вх.и} - \Delta U_{вх.н} = \Delta U_{вых} / K_U ,$$

где  $\Delta U_{вх.и}$ ,  $\Delta U_{вх.н}$  – соответственно входные напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах ОУ.

В случае  $K_{U_{00}} \rightarrow \infty$  получим  $\Delta U_{вх} \rightarrow 0$  и  $U_{вых.н} = U_{вых}$ .

Появление любого входного напряжения сразу приводит к появлению разности  $U_{вх.и} - U_{вх.н} = U_{вых} - U_{вх.н}$ . Эта разность, передаваясь на выход ОУ, изменяет его выходное напряжение так, чтобы скомпенсировать возникшее отклонение и восстановить условия, указанные выше. Учитывая, что собственное входное сопротивление ОУ стремится к бесконечности, а выходное сопротивление стремится к нулю, можно сказать, что рассмотренная схема подобно эмиттерному повторителю находит практическое применение в качестве буферных или согласующих элементов.

**Неинвертирующий усилитель.** Схема повторителя, представленная на рисунке 10.2, не инвертировала входной сигнал, но и не усиливала его. Это объясняется тем, что коэффициент передачи отрицательной обратной связи равен единице. Для получения коэффициента передачи усилителя, превышающего единицу в схеме необходимо обеспечить коэффициент обратной связи  $\beta_{oc} < 1$ .

Для этого в цепь ООС вводят делитель напряжения так, как показано на рисунке 10.2. Эта схема представляет собой неинвертирующий усилитель.

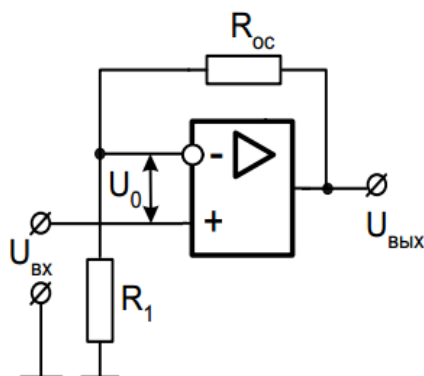


Рисунок 10.2 – Схема неинвертирующего усилителя

Коэффициент передачи делителя в цепи ООС определяется из выражения:



$$\beta_{oc} = R_1 / (R_{oc} - R_1).$$

Тогда коэффициент усиления  $OY$ , охваченного отрицательной обратной связью

$$K_{U_{ooo}} = K_{U_{oo}} / (1 + K_{U_{oo}} \beta_{oc}) = K_{U_{oo}} / [1 + R_1 K_{U_{oo}} / (R_{oc} - R_1)].$$

С учётом  $K_{U_{oo}} \rightarrow \infty$  окончательно получим

$$K_{U_{ooo}} = (R_{oc} - R_1) / R_1 = 1 + R_{oc} / R_1 = 1 / \beta_{oc}.$$

Из полученного выражения можно сделать следующие выводы:

- коэффициент передачи (усиления) неинвертирующего усилителя обратно пропорционален коэффициенту передачи цепи ООС;
- при любых сопротивлениях резисторов в цепи ООС коэффициент передачи неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы. Последний вывод непосредственно вытекает из свойств  $OY$ .

Коэффициент усиления схемы неинвертирующего усилителя на  $OY$  вычисляется по формуле:

$$K_{U_{oo}} = 1 + R_1 / R_2. \quad (10.1)$$

Постоянная составляющая выходного напряжения усилителя  $U_{0вых}$  определяется произведением напряжения смещения  $U_{см}$  на коэффициент усиления схемы  $K_{U_{oo}}$

$$U_{0вых} = U_{см} K_{U_{oo}}. \quad (10.2)$$

**Инвертирующий усилитель.** В схемах повторителя и неинвертирующего усилителя сигнал  $U_{оос}$  и  $U_{вх.н}$  подавались на различные входы  $OY$ . Для получения инвертирующего усилителя входной сигнал и сигнал обратной связи должны подаваться на один и тот же инвертирующий вход, т.е. цепь отрицательной обратной связи превращается из последовательной в параллельную. Типовая схема инвертирующего усилителя приведена на рисунке 10.3.

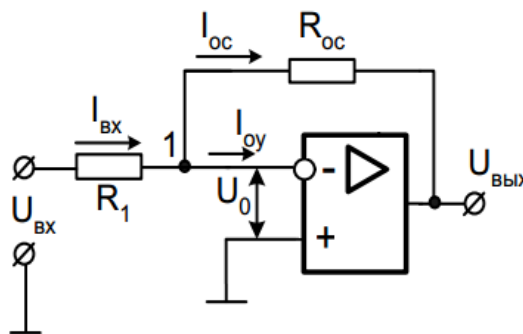


Рисунок 10.3 – Схема инвертирующего усилителя

Неинвертирующий вход связывается с общей точкой входа и выхода схемы (заземляется). Входной сигнал подается через резистор  $R_1$ , на инвертирующий вход ОУ. Показатели схемы можно определить, воспользовавшись уравнением токов для узла 1. Если принять  $R_{\text{вх.ОУ}} = \infty$  и входной ток ОУ  $I_{\text{вх}} = 0$ , то  $I_{\text{вх}} = I_{\text{ос}}$ , откуда

$$(U_{\text{вх}} - U_0) / R_1 = -(U_{\text{вых}} - U_0) / R_{\text{ос}}.$$

При  $K_{\text{Уоо}} \rightarrow \infty$  напряжение на входе ОУ  $U_0 = U_{\text{вых}} / K_{\text{Уоо}} \rightarrow 0$ , в связи, с чем получим

$$U_{\text{вх}} / R_1 = -U_{\text{вых}} / R_{\text{ос}}.$$

При  $K_{\text{Уоо}} \rightarrow \infty$  напряжение на входе ОУ  $U_0 = U_{\text{вх}} / K_{\text{Уоо}} \rightarrow 0$ , в связи с чем получим

$$U_{\text{вх}} / R_1 = -U_{\text{вых}} / R_{\text{ос}}.$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с отрицательной параллельной обратной связью  $K_{\text{Уи}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  определяется параметрами только пассивной части схемы

$$K_{\text{Уи}} = -R_{\text{ос}} / R_1. \quad (10.3)$$

Знак «минус» в формуле означает, что выходное напряжение инвертирующего усилителя находится в противофазе с входным напряжением.

Постоянная составляющая выходного напряжения  $U_{0\text{вых}}$  усилителя зависит от коэффициента усиления  $K_{\text{Уи}}$  схемы и напряжения смещения  $U_{\text{см}}$  и вычисляется по формуле:

$$U_{0\text{вых}} = U_{\text{см}} K_{\text{Уи}}. \quad (10.4)$$

Выбор  $R_{\text{ос}} = R_1$ , когда  $K_{\text{Уи}} = -1$ , придает схеме на рисунке 10.3 свойство инвертирующего повторителя напряжения (инвертора сигнала). Изменение коэффициента передачи усилителя до величины, меньшей единицы, достигается за счет действия входного делителя. Действительно, в предельном случае, когда  $R_{\text{ос}} = 0$ , коэффициент передачи цепи отрицательной обратной связи  $\beta_{\text{ос}} = 1$  и собственный коэффициент передачи сигнала со входа ОУ равен единице. В этом случае выполняется условие  $U_{\text{вх.и}} = U_{\text{вых}}$ . Однако коэффициент передачи делителя, обеспечивающего необходимый входной сигнал ОУ, снижается до нуля. Вследствие этого суммарный коэффициент передачи всего ОУ также снижается до нуля. Для инвертирующего усилителя фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на  $180^\circ$ .

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучить принцип работы инвертирующего и неинвертирующего ОУ, их основные характеристики и параметры.

3.2. Начертить схемы включения инвертирующего и неинвертирующего ОУ.

3.3. Показать начерченные схемы преподавателю для проверки.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Построение амплитудной характеристики инвертирующего ОУ

4.1.1. Собрать схему работы инвертирующего усилителя в режиме усиления сигнала (рисунок 10.4), предварительно создав модель самого ОУ в соответствии с вариантом задания (таблица 10.1).

Таблица 10.1

№ Варианта	Тип ОУ	$U_{CM}$ , мВ (VOS)	$R_{BX}$ , Мом (RI)	$K_U$ (A)	$V_{Uвых}$ , В/мкс (SR)	$f_1$ , МГц (FU)	$R_{ВЫХ}$ , Ом (RO)
1	K140УД6А	5	3	70000	2,5	1	150
2	K140УД7	9	0,3	50000	0,3	0,8	150
3	K140УД12	6	50	50000	2	1	1000
4	K140УД9	5	0,3	35000	0,5	1	200
5	K140УД10	5	1	50000	50	15	200
6	K140УД11	10	0,2	25000	20	5	200
7	K140УД8А	20	1000	50000	5	1	200
8	K140УД14А	2	30	50000	0,05	0,3	300
9	K140УД17А	0,025	100	300000	0,1	0,4	200

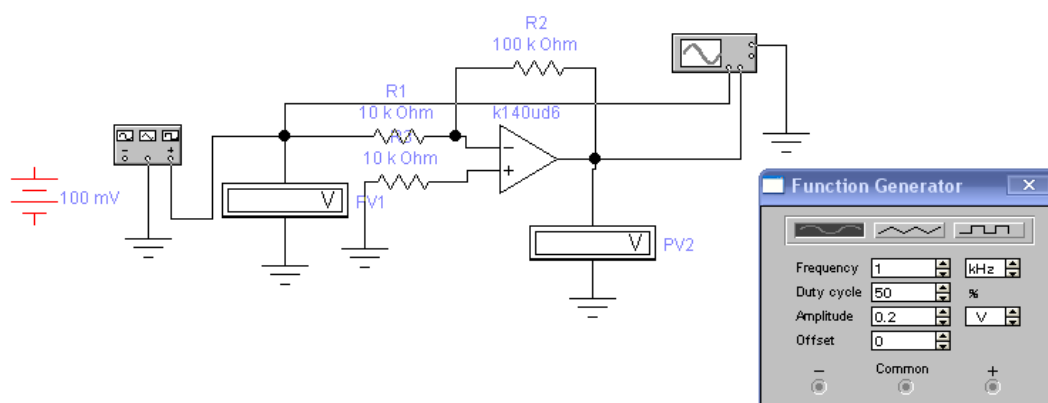


Рисунок 10.4 – Схема для исследования свойств инвертирующего усилителя на основе ОУ

4.1.2. Для выбора ОУ нажать два раза клавишей указания мыши на изображении ОУ и выбрать в появившемся окне **3-Terminal Opamp Properties** в

разделе **Library** библиотеку **default**, а затем в разделе **Model** – тип ОУ **ideal**. Выбрать последовательно клавишей указания мыши кнопки **Copy** и **Paste**, записать латинскими буквами в появившемся окне тип ОУ в соответствии с вариантом задания и нажать кнопку **OK**. В результате в разделе **Model** добавится новый тип ОУ. Для корректировки его параметров нажать кнопку **Edit** и установить значения параметров **Input offset voltage [VOS]** (напряжение смещения  $U_{см}$ ), **Input resistance [RI]** (входное сопротивление  $R_{вх}$ ), **Open-loop gain [A]** (коэффициент усиления  $K_y$ ), **Slew rate [SR]** (скорость нарастания выходного напряжения  $V_{U_{вых}}$ ), **Unity-gain bandwidth [FU]** (частота единичного усиления  $f_1$ ) и **Output resistance [RO]** (выходное сопротивление  $R_{вых}$ ) в соответствии с таблицей 10.1. Установить напряжения питания для каждого операционного усилителя **Positive voltage swing (VSW+=+15)** и **Negative (NSW=-15)**. Значения других параметров оставить без изменения.

4.1.3. Установить сопротивления резисторов:  $R_1=10$  кОм,  $R_2=100$  кОм,  $R_3=10$  кОм. Подать на вход инвертирующего усилителя напряжения синусоидальное напряжение с частотой  $f=1000$  Гц.

Указание: Во вкладке *Value* свойств вольтметров установить режим измерения переменного тока (*Mode: AC*).

4.1.4. Изменяя величину входного сигнала, измерить величину выходного сигнала. Результаты занести в таблицу 10.2. Построить амплитудную характеристику инвертирующего усилителя  $U_{вых.м} = f(U_{вх.м})$ , предварительно вычислив значения  $U_{вх.м}$  и  $U_{вых.м}$ .

Таблица 10.2

$U_{вх.м}, В$	0,01	0,1	0,2	0,5	0,8	1	1,2	1,8	2
$U_{вых}, В$									
$U_{вых.м}, В$									

4.1.5. Зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе ОУ для одного из измерений.

4.2 Построение передаточной характеристики инвертирующего операционного усилителя

4.2.1. Заменить в схеме рисунка 10.4 источник переменного напряжения на источник постоянного напряжения.

Указание: Во вкладке *Value* свойств вольтметров установить режим измерения постоянного тока (*Mode: VC*).

4.2.2. Изменяя величину входного сигнала, измерить величину выходного сигнала. Результаты занести в таблицу 10.3.

4.2.3. Поменять полярность источника постоянного напряжения на противоположную. Вновь, изменяя величину входного сигнала, измерить величину выходного сигнала. Результаты занести в таблицу 10.3.

4.2.4. Построить передаточную характеристику инвертирующего усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ .

Таблица 10.3

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	0,01	0,1	0,2	0,5	0,8	1	1,2	1,8	2
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	-0,01	-0,1	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1,2	-1,8	-2
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

4.3. Построение амплитудно-частотной характеристики инвертирующего операционного усилителя

4.3.1. Для схемы рисунка 10.4 установить на входе инвертирующего усилителя напряжение  $U_{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В}$ . Изменяя частоту входного сигнала измерить соответственно амплитуду выходного сигнала. Результаты записать в таблицу 10.4.

Таблица 10.4

$f, \text{Гц}$	0	10	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
$U_{m\text{ВЫХ}}, \text{В}$								

4.3.2. Заменить в схеме рисунка 10.4 источник переменного напряжения на источник постоянного напряжения. Установить сопротивления резисторов:  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1 \text{ кОм}$ . Изменяя номиналы резистора  $R_2$  и значения входного напряжения в соответствии с данными таблицы 10.5, выполнить измерения напряжения на выходе ОУ. Результаты измерений записать в таблицу 10.5.

Таблица 10.5

$U_{\text{ВХ}}, \text{мВ}$	$R_2, \text{кОм}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$K_U^{\text{теор}}$	$K_U^{\text{эксп}}$	$\delta, \%$
50	5				
	10				
	20				
100	5				
	10				
	20				
500	5				
	10				
	20				

Указание: Во вкладке *Value* свойств вольтметров установить режим из-

мерения постоянного тока (*Mode: DC*).

4.3.3. Рассчитать по (10.3) теоретическое значение коэффициента усиления по напряжению  $K_U^{\text{теор}}$  усилителя по заданным значениям параметров компонентов схемы и по (9.1) экспериментальное значение коэффициента усиления по напряжению  $K_U^{\text{эксп}}$  усилителя.

4.3.4. Рассчитать относительную погрешность усиления по формуле

$$\delta = \frac{(K_U^{\text{теор}} - K_U^{\text{эксп}})}{K_U^{\text{теор}}} \cdot 100\% .$$

4.4. Построение амплитудной характеристики неинвертирующего ОУ

4.4.1. Собрать схему работы неинвертирующего усилителя в режиме усиления сигнала (рисунок 10.5), для марки ОУ в соответствии с вариантом задания (таблица 10.1).

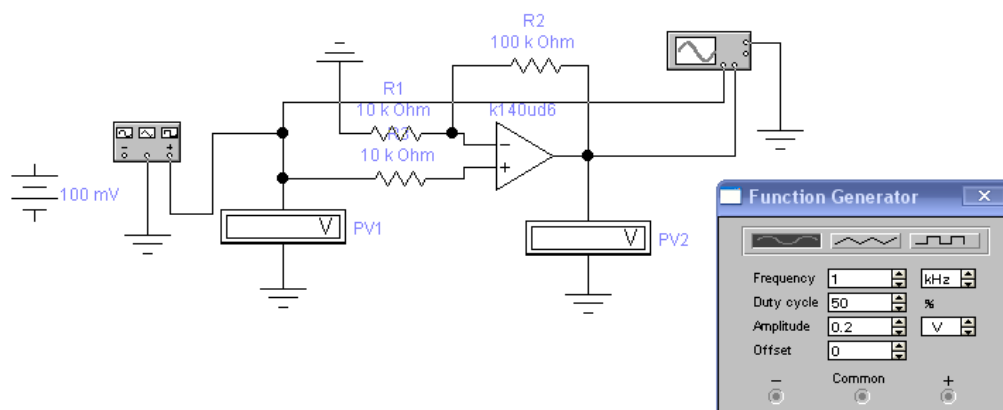


Рисунок 10.5 – Схема для исследования свойств неинвертирующего усилителя на основе ОУ

4.4.2. Установить сопротивления резисторов:  $R_1=10$  кОм,  $R_2=100$  кОм,  $R_3=10$  кОм. Подать на вход неинвертирующего усилителя напряжения синусоидального напряжения с частотой  $f = 1000$  Гц.

Указание: Во вкладке *Value* свойств вольтметров установить режим измерения переменного тока (*Mode: AC*).

4.4.3. Изменяя величину входного сигнала, измерить величину выходного сигнала. Результаты занести в таблицу 10.6. Построить амплитудную характеристику неинвертирующего усилителя  $U_{\text{ВЫХ.м}} = f(U_{\text{ВХ.м}})$ , предварительно вычислив значения  $U_{\text{ВХ.м}}$  и  $U_{\text{ВЫХ.м}}$ .

Таблица 10.6

$U_{\text{ВХ.м}}, \text{В}$	0,01	0,1	0,2	0,5	0,8	1	1,2	1,8	2
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

$U_{\text{ВЫХ.м}}, \text{В}$									
------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4.4.4. Зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе ОУ для одного из измерений.

4.5. Построение передаточной характеристики неинвертирующего операционного усилителя

4.5.1. Заменить в схеме рисунка 10.5 источник переменного напряжения на источник постоянного напряжения.

Указание: Во вкладке *Value* свойств вольтметров установить режим измерения постоянного тока (*Mode: VC*).

4.5.2. Изменяя величину входного сигнала, измерить величину выходного сигнала. Результаты занести в таблицу 10.7.

4.5.3. Поменять полярность источника постоянного напряжения на противоположную. Вновь, изменяя величину входного сигнала, измерить величину выходного сигнала. Результаты занести в таблицу 10.7.

4.5.4. Построить передаточную характеристику неинвертирующего усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ .

Таблица 10.7

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	0,01	0,1	0,2	0,5	0,8	1	1,2	1,8	2
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	-0,01	-0,1	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1,2	-1,8	-2
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

4.6. Построение амплитудно-частотной характеристики неинвертирующего усилителя на базе ОУ.

4.6.1. Для схемы рисунок 10.5 установить на входе неинвертирующего усилителя напряжение  $U_{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В}$ . Изменяя частоту входного сигнала измерить соответственно амплитуду выходного сигнала. Результаты записать в таблицу 10.8.

Таблица 10.8

$f, \text{Гц}$	0	10	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
$U_{\text{мВЫХ}}, \text{В}$								

4.6.2. Заменить в схеме (рисунок 10.5) источник переменного напряжения на источник постоянного напряжения. Установить сопротивления рези-

сторгов:  $R_1=1$  кОм,  $R_3=1$  кОм. Изменяя номинальные величины резистора  $R_2$  и значения входного напряжения, в соответствии с данными таблицы 10.9, выполнить измерения напряжения на выходе ОУ. Результаты измерений занести в таблицу 10.9.

Таблица 10.9

$U_{ВХ}$ , мВ	$R_2$ , кОм	$U_{ВЫХ}$ , В	$K_U^{теор}$	$K_U^{эксп}$	$\delta$ , %
50	5				
	10				
	20				
100	5				
	10				
	20				
500	5				
	10				
	20				

4.6.3. Рассчитать по (10.1) теоретическое значение коэффициента усиления усилителя по напряжению  $K_U^{теор}$ , используя заданные значения параметров элементов схемы, и по (9.1) экспериментальное значение коэффициента усиления усилителя по напряжению  $K_U^{эксп}$ .

4.6.4. Рассчитать относительную погрешность усиления

$$\delta = \frac{(K_U^{теор} - K_U^{эксп})}{K_U^{теор}} \cdot 100\% .$$

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать цель работы, исследуемые схемы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицу с экспериментальными результатами, график полученных характеристик, построенный в масштабе. В отчёте также приводятся результаты расчётов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Приведите схему неинвертирующего ОУ, объясните принцип ее работы. Какую роль в схеме играет делитель напряжения?

6.2. От чего зависит коэффициент усиления неинвертирующего усилителя?

6.3. Приведите схему повторителя напряжения. Объясните принцип ее работы.



6.4. Оцените различия между измеренной и вычисленной постоянной составляющей выходного напряжения.

6.5. Приведите схему инвертирующего ОУ, объясните принцип ее работы.

6.6. Какие параметры схемы на рисунке 7.5 влияют на ее коэффициент усиления?

6.7. Как достигается изменение коэффициента передачи усилителя?

## 11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ КАСКАДОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное изучение принципов работы типовых каскадов на операционных усилителях.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

##### *Сумматор*

Инвертирующий усилитель с несколькими входами может выступать в роли сумматора сигналов (рисунок 11.1)

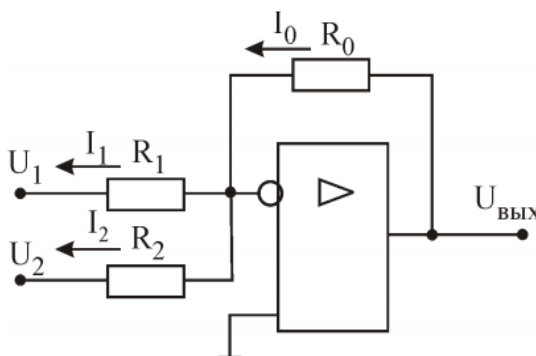


Рисунок 11.1 – Сумматор на ОУ

Для него справедливы соотношения:

$$I_1 = U_1 / R_1; \quad (11.1)$$

$$I_2 = U_2 / R_2; \quad (11.2)$$

$$I_0 = I_1 + I_2 = -(U_1 / R_1 + U_2 / R_2); \quad (11.3)$$

$$U_{\text{вых}} = I_0 R_0 = -(U_1 R_0 / R_1 + U_2 R_0 / R_2). \quad (11.4)$$

Если  $R_1 = R_2 = R_0$ , то  $U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2)$ .

Таким образом, выходное напряжение равно сумме входных напряжений с обратным знаком.

### Интегратор

Если в цепи ООС схемы инвертирующего усилителя резистор заменить конденсатором, то полученная схема будет интегрировать входные сигналы (рисунок 11.2):

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_C(t) = (1/C) \int i(t) dt ;$$

$$i(t) = -U_{\text{ВХ}}(t) / R_1 .$$

Подставляя выражение для тока под знак интеграла, получим окончательно

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -1/(R_1 C) \int U_{\text{ВХ}}(t) dt .$$

где  $R_1 C = T_1$  – время интегрирования, т.е. время за которое выходное напряжение достигнет уровня входного при подаче на вход ступеньки напряжения.

Таким образом, выходное напряжение пропорционально интегралу от входного напряжения с обратным знаком.

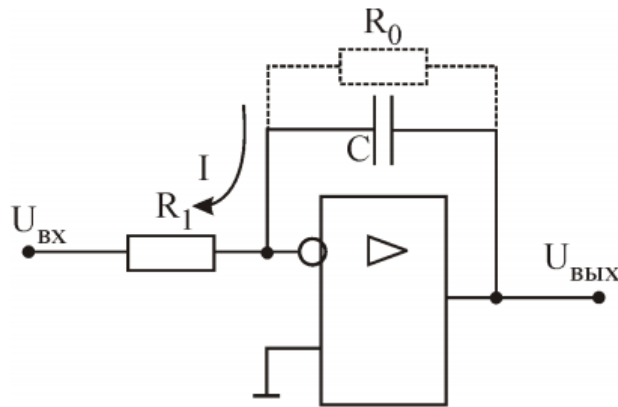


Рисунок 11.2 – Интегратор на ОУ

### Дифференциатор

На рисунке 11.3, а показана упрощенная схема дифференциатора. Его работа определяется двумя формулами:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = i(t) R_0 ;$$

$$i(t) = -C_1 (dU_{\text{ВХ}}(t) / dt) .$$

Подставляя выражение для тока в напряжение, получаем окончательно

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -R_0 C_1 (dU_{\text{ВХ}}(t) / dt) . \quad (11.5)$$

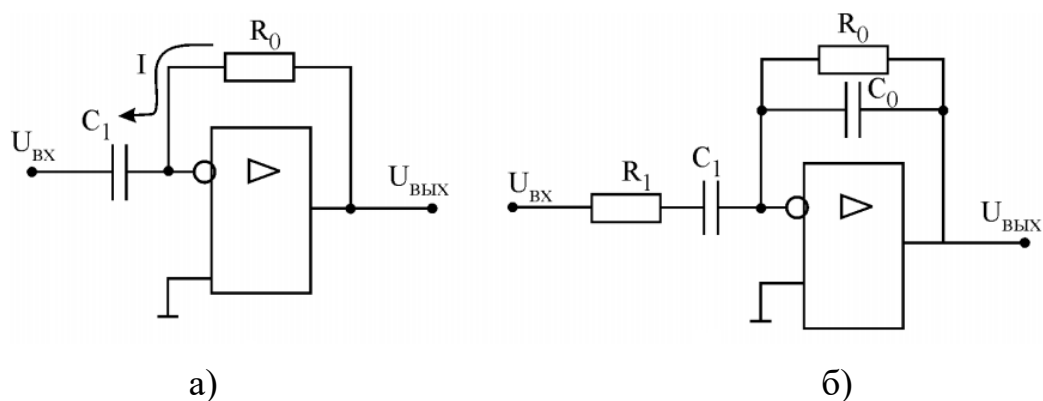


Рисунок 11.3 – Упрощенная (а) и реальная (б) схемы дифференциатора

Упрощенная схема дифференциатора неустойчива, т.е. склонна к генерации колебаний, поэтому на практике ее дополняют резистором  $R_1$  во входной цепи, а иногда и конденсатором  $C_0$  в цепи обратной связи (рисунок 11.3, б). Эти элементы «заваливают» амплитудно-частотную характеристику дифференциатора в области высоких частот, обеспечивая тем самым устойчивую работу схемы.

#### Триггер Шмитта

Триггер Шмитта используется как пороговое устройство для сравнения входного сигнала с заданным напряжением  $U_{оп}$ , которое подается на неинвертирующий вход (рисунок 11.4). На практике чаще всего  $U_{оп}=0$ . Работа схемы описывается формулами:

$$U_{ВХ} > U_{оп} \Rightarrow U_{ВЫХ} = -12 \text{ В};$$

$$U_{ВХ} < U_{оп} \Rightarrow U_{ВЫХ} = 12 \text{ В}.$$

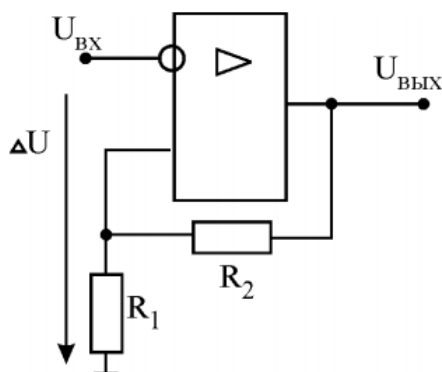


Рисунок 11.4 – Триггер Шмитта

Выход триггера Шмитта всегда насыщен: на нём или  $-12 \text{ В}$  или  $+12 \text{ В}$ . Триггер Шмитта часто используется для преобразования аналоговых сигнала-

лов в цифровые двухуровневые сигналы, т.е. является элементом цифровых электронных устройств. Поэтому в схеме триггера отсутствует ООС, зато имеется положительная обратная связь (ПОС), реализованная с помощью резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ . ПОС выполняет две функции: во-первых, ускоряет переключение триггера Шмитта и, во-вторых, создает так называемый гистерезис переключения, защищающий триггер от случайных переключений при незначительных изменениях входного сигнала.

Пороговое напряжение на неинвертирующем входе определяется формулой

$$\Delta U = U_{\text{вх}} R_1 / (R_1 + R_2).$$

Переключение триггера происходит при превышении значения входного напряжения  $\Delta U$ . Величина  $2\Delta U$  называется гистерезисом переключения. При изменениях входного сигнала в пределах гистерезиса переключения выходной сигнал не переключается.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучить принципы работы рассматриваемых типовых каскадов на ОУ, их основные свойства.

3.2. Начертить схемы включения сумматора, интегратора, дифференциатора на ОУ.

3.3. Показать начерченные схемы преподавателю для проверки.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Исследование инвертирующего сумматора постоянных напряжений

4.1.1. Собрать схему для исследования работы инвертирующего сумматора (рисунок 11.5). Включите вольтметры PV1, PV2 для измерения входных напряжений  $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{вх2}}$  и амперметры PA1 и PA2 для измерения токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_0$ . Для измерения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  подключить вольтметр PV3. Подключите к входным цепям источники постоянного тока  $E_1$  и  $E_2$  и заземлите их.

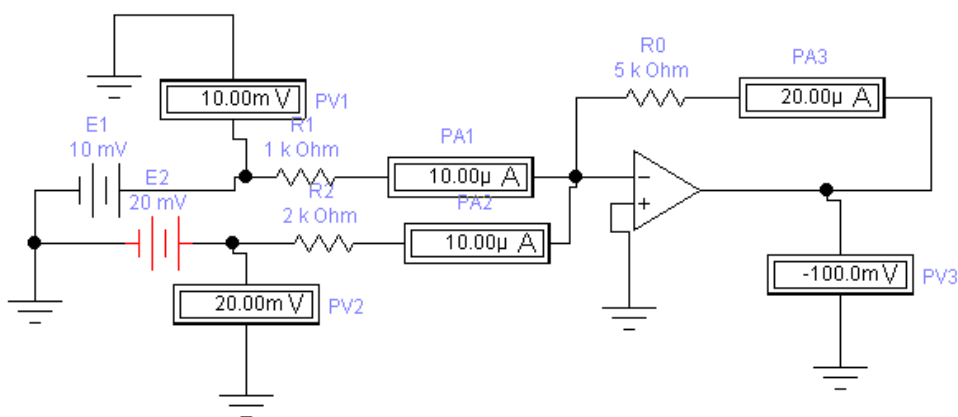


Рисунок 11.5 – Схема исследования сумматора постоянных напряжений

4.1.2. Задать сопротивление резистора  $R_1$  по таблице 11.1 для своей подгруппы. Сопротивления остальных резисторов устанавливаются для каждого опыта в соответствии с данными таблицы 11.2. В качестве операционного усилителя выбрать *ideal* библиотеки *default*. Включите схему.

Таблица 11.1

№ подгруппы	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_1$ , кОм	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2

Таблица 11.2

$U_{ВХ1}$ мВ	$U_{ВХ2}$ мВ	$R_2$ , кОм	$R_0$ , кОм	$I_1^{теор}$ мА	$I_2^{теор}$ мА	$I_0^{теор}$ мА	$U_{ВЫХ}^{теор}$ В	$I_1^{эксп}$ мА	$I_2^{эксп}$ мА	$I_0^{эксп}$ мА	$U_{ВЫХ}^{эксп}$ В	$\delta$ , %
0	10	2	10									
10	-50	2	10									
10	50	2	20									
10	20	2	20									

4.1.3. Изменяя номиналы резистора  $R_0$  и значения входных напряжений  $U_{ВХ1}$  и  $U_{ВХ2}$ , в соответствии с данными таблицы 11.2, рассчитайте по (11.1-11.3) значения токов  $I_1^{теор}$ ,  $I_2^{теор}$ ,  $I_0^{теор}$ . По показаниям амперметров PA1-PA4 измерьте экспериментальные значения этих параметров. Результаты запишите в таблицу 11.2.

4.1.4. Рассчитайте по (11.4) теоретическое значение величины напряжения  $U_{ВЫХ}^{теор}$  на выходе усилителя и сравните их с полученными измерениями  $U_{ВЫХ}^{эксп}$  вольтметром. Результаты вычислений запишите в таблицу 11.2.

#### 4.1.5. Рассчитайте относительную погрешность усиления

$$\delta = \frac{(U_{\text{ВЫХ}}^{\text{теор}} - U_{\text{ВЫХ}}^{\text{эксп}})}{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{теор}}} \cdot 100\% .$$

#### 4.2. Исследование инвертирующего сумматора суммирования переменных напряжений

4.2.1. Собрать схему для исследования работы инвертирующего сумматора суммирования переменных напряжений (рисунок 11.6).

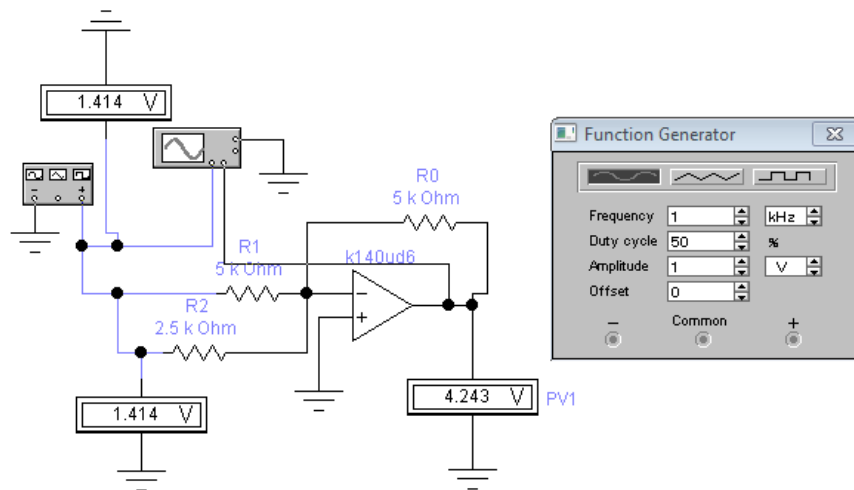


Рисунок 11.6 — Схема исследования сумматора переменных напряжений

4.2.2. Установите значение сопротивления  $R_1$  по таблице 11.1 для своей подгруппы,  $R_2=2,5$  кОм,  $R_0=5$  кОм,  $U_{\text{ВХ}}=1$  В,  $f=1$  кГц.

4.2.3. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений (рисунок 11.7).

4.2.4. Измерьте осциллографом амплитуды входного и выходного напряжений  $U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{эксп}}$ . Вычислите амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{теор}}$  по известным значениям амплитуд напряжений  $U_{1\text{м}}$  и  $U_{2\text{м}}$ . Результаты запишите в таблицу 11.3.

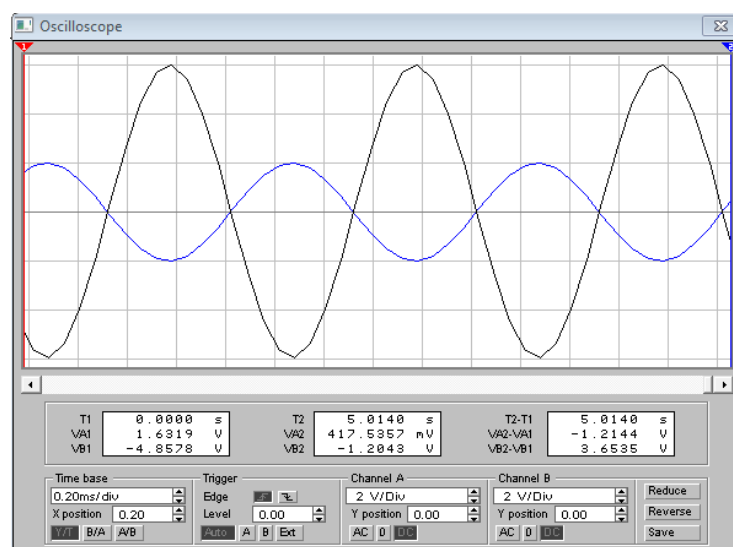


Рисунок 11.7 – Осциллограммы входного и выходного напряжений при суммировании переменных напряжений

Таблица 11.3

$U_{1m}, \text{В}$	$U_{2m}, \text{В}$	$U_{\text{теор}}_{\text{ВЫХ.м}}$	$U_{\text{ЭКСП}}_{\text{ВЫХ.м}}$

### 4.3. Исследование интегратора

4.3.1. Собрать схему для исследования работы интегратора (рисунок 11.8) и установите следующие номинальные значения элементов:  $R_1=10 \text{ кОм}$ ,  $R_0=100 \text{ кОм}$ ,  $C=0,01 \text{ мкФ}$ , ОУ по таблице 10.1. К входу схемы подключите функциональный генератор и установите следующие параметры прямоугольных импульсов:  $f=2 \text{ кГц}$ , коэффициент заполнения 50%, амплитуду 5 В. Подключите осциллограф к входу и выходу схемы и заземлите его.

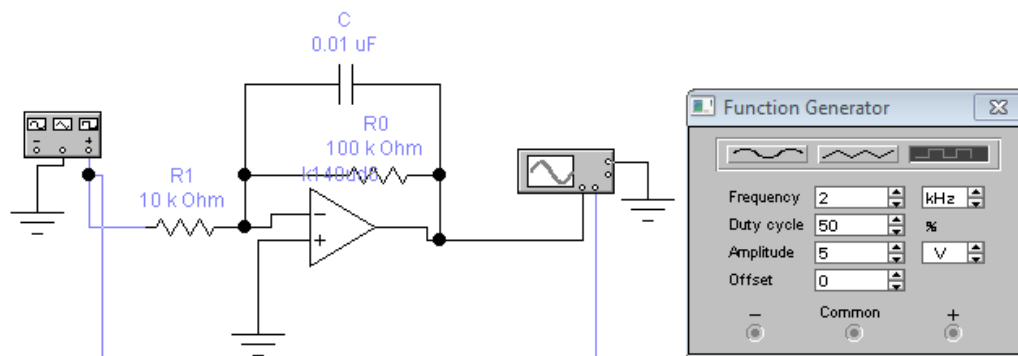


Рисунок 11.8 – Схема исследования интегратора на базе ОУ



4.3.2. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения, вычислите их амплитудное значение  $U_{BX.m}$  и  $U_{ВЫХ.m}$  (рисунок 11.9).

4.3.3. По осциллограмме, используя (9.8) определите скорость изменения выходного напряжения. Определите время интегрирования по осциллограмме  $T_1^{\text{эксп}} = -\frac{U_{BX.m}}{U_{ВЫХ.m}} \frac{T}{4}$  и по параметрам схемы  $T_1^{\text{теор}} = -R_1 C$ . ( $T$  – период входного сигнала). Результаты запишите в таблицу 11.4.

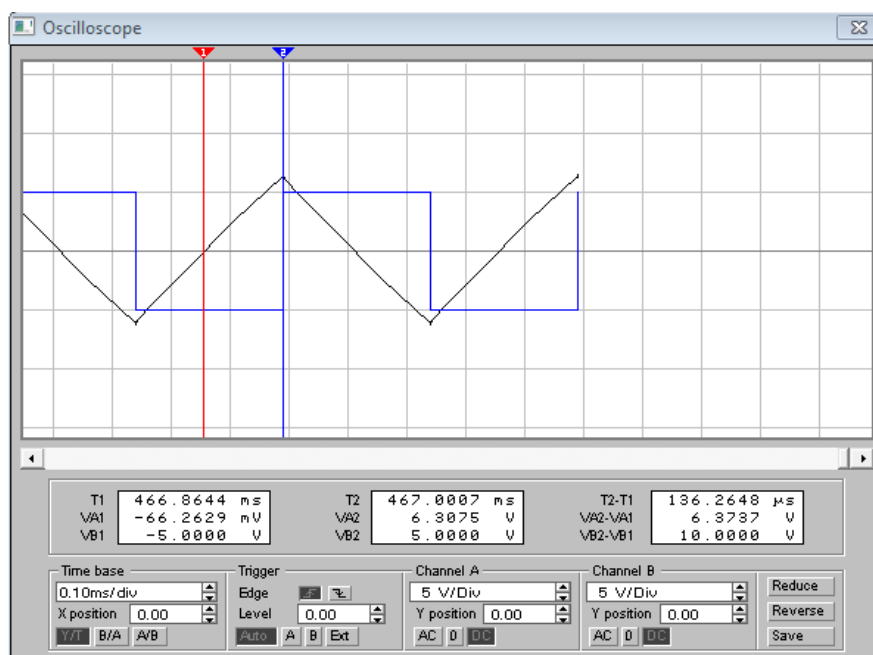


Рисунок 11.9 — Осциллограммы входного и выходного напряжений интегратора

4.3.4. Установите амплитуду сигнала на выходе генератора 2 В. Повторите исследования и сравните получившиеся осциллограммы выходного напряжения, с полученными в п.4.3.2. Результаты запишите в таблицу 11.4.

Таблица 11.4

№ эксперимента	$U_{BX.m}$ , В	$U_{ВЫХ.m}$ , В	$T_1^{\text{эксп}}$ , с	$T_1^{\text{теор}}$ , с	$V_{U_{\text{вых}}}$ , В/с
4.3.2.					
4.3.4.					
4.3.5.					
4.3.6.					

4.3.5. В схеме рисунка 11.8 установите сопротивление  $R_1=5$  кОм, амплитуду генератора 5 В. Включите схему. Зарисуйте осциллограммы входного и

выходного напряжений. Запишите амплитуду входного напряжения и определите по осциллограмме скорость изменения выходного напряжения в начале процесса. Сравните осциллограмму выходного напряжения, полученную в данном эксперименте с осциллограммой, полученной в п.4.3.2. напряжения. Определите время интегрирования по осциллограмме  $T_1^{\text{эксп}}$  и по параметрам схемы  $T_1^{\text{теор}}$ . Результаты запишите в таблицу 11.4.

4.3.6. В схеме рисунка 11.8 установите емкость конденсатора равной 0,02 мкФ. Включите схему. Изобразите осциллограммы входного и выходного напряжений. Определите по ним амплитуду входного напряжения и определите по осциллограмме скорость изменения выходного напряжения в начале процесса. Сравните осциллограмму выходного напряжения, полученную в данном эксперименте, с осциллограммой, полученной в п.4.3.2. напряжения. Определите время интегрирования по осциллограмме  $T_1^{\text{эксп}}$  и по параметрам схемы  $T_1^{\text{теор}}$ . Результаты запишите в таблицу 11.4.

#### 4.4. Исследование дифференцирующего ОУ

4.4.1. Собрать схему для исследования работы дифференцирующего ОУ (рисунок 11.10) и установите следующие номинальные значения элементов:  $R_1=500$  Ом,  $R_0=5$  кОм,  $C=0,05$  мкФ, ОУ ОУ по таблице 10.1. К входу схемы подключите функциональный генератор и установите следующие параметры линейно изменяющегося сигнала:  $f=1$  кГц, коэффициент заполнения 50%, амплитуду 5 В. Подключите осциллограф к входу и выходу схемы и заземлите его.

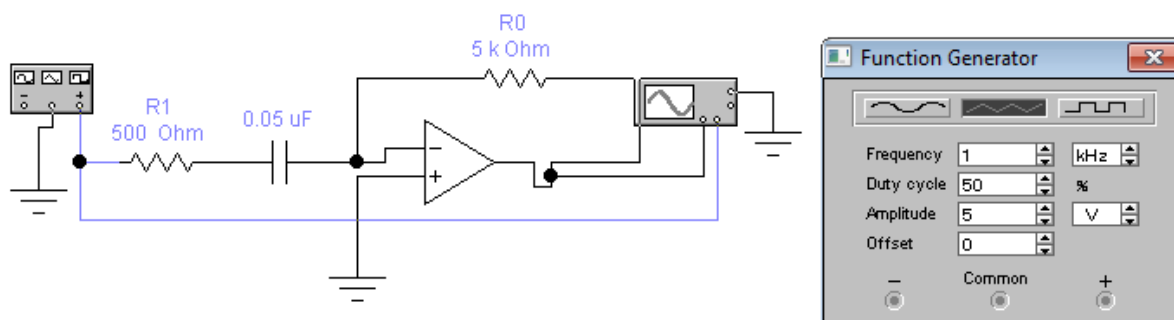


Рисунок 11.10 – Схема исследования дифференциатора на базе ОУ

4.4.2. Включите схему и зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений, вычислите их амплитудное значение  $U_{\text{ВХ.м}}$  и  $U_{\text{ВЫХ.м}}$ . (рисунок 11.11).

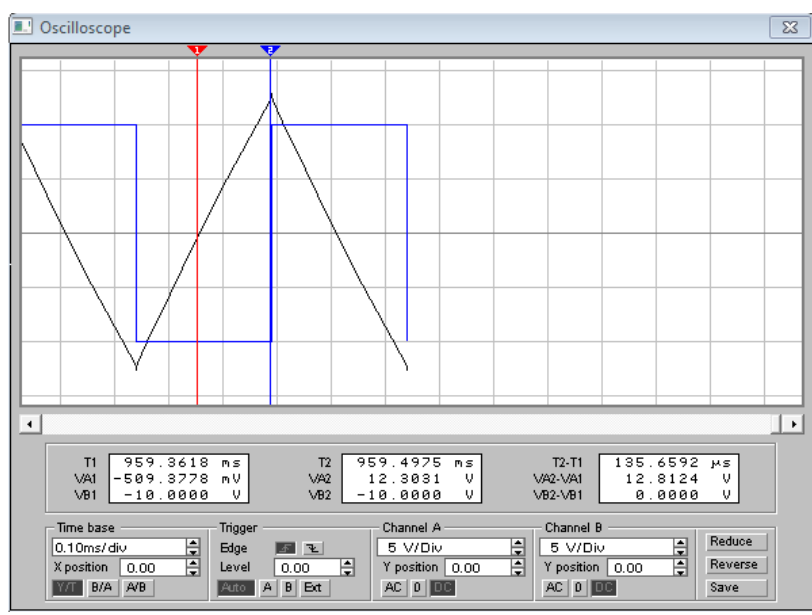


Рисунок 11.11 – Осциллограммы входного и выходного напряжений дифференциатора

4.4.3. По полученным осциллограммам определите скорость изменения входного напряжения и амплитуду выходного напряжения.

4.4.4. По заданным параметрам схемы и найденному значению скорости изменения входного напряжения рассчитайте по (11.5) амплитуду выходного напряжения и сравните её с экспериментальным значением. Результаты запишите в таблицу 11.5.

4.4.5. В схеме рисунка 11.10 установите частоту генератора равной 2 кГц. Включите схему. Изобразите осциллограммы входного и выходного напряжений. По полученным осциллограммам определите скорость изменения входного напряжения и амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{эксп}}$ . Результаты запишите в таблицу 11.5. Сравните осциллограмму выходного напряжения, полученную в данном эксперименте, с осциллограммой, полученной в п.4.4.2.

Таблица 11.5

№ эксперимента	$U_{\text{ВХ.м}}, \text{В}$	$V_{U_{\text{ВХ}}}, \text{В/с}$	$U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{теор}}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{эксп}}, \text{В}$
4.4.4.				
4.4.5.				
4.4.7.				
4.4.9.				

4.4.6. По заданным параметрам схемы и найденному значению скорости изменения входного напряжения рассчитайте амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{теор}}$ . Результаты запишите в таблицу 11.5.

4.4.7. В схеме рисунка 11.10 восстановите начальную частоту генератора, а величину сопротивления в цепи обратной связи установите равной 10 кОм. Включите схему. Изобразите осциллограммы входного и выходного напряжений. По полученным осциллограммам определите скорость изменения входного напряжения и амплитуду выходного напряжения. Результат запишите в таблицу 11.5. Сравните осциллограмму выходного напряжения, полученную в данном эксперименте, с осциллограммой, полученной в п.4.4.2.

4.4.8. По заданным параметрам схемы и найденному значению скорости изменения входного напряжения рассчитайте амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ.м}}^{\text{теор}}$ . Результат запишите в таблицу 11.5.

4.4.9. В схеме рисунка 11.10 восстановите первоначальные значения параметров схемы, а величину емкости конденсатора установите равной 0,1 мкФ. Включите схему. После установления процесса изобразите осциллограммы входного и выходного напряжений. По полученным осциллограммам определите скорость изменения входного напряжения и амплитуду выходного напряжения. Результат запишите в таблицу 11.5. Сравните осциллограмму выходного напряжения, полученную в данном эксперименте, с осциллограммой, полученной в п.4.4.7.

4.4.10. По заданным параметрам схемы и найденному значению скорости изменения входного напряжения рассчитайте амплитуду выходного напряжения. Результат запишите в таблицу 11.5.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать цель работы, исследуемые схемы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицу с экспериментальными результатами, график полученных характеристик, построенный в масштабе. В отчёте также приводятся результаты расчётов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какую функцию выполняет сумматор на ОУ?

6.2. Что называют масштабными коэффициентами сумматора?

- 6.3. Каков принцип действия интегратора? Что является недостатком схемы на рисунке 11.2?
- 6.4. В чём различия между идеальным и реальным интеграторами?
- 6.5. В чём различия между идеальным и реальным дифференциаторами?
- 6.6. Зачем нужен гистерезис в триггере Шмитта?
- 6.7. Как определить частоту выходного сигнала для релаксационного генератора?
- 6.8. Какую роль играет сопротивление  $R_0$ , подключенное параллельно конденсатору в схеме на рисунке 11.2?
- 6.9. На какие параметры переходного процесса в схеме на рисунке 11.3 влияет величина сопротивления  $R_0$ ?
- 6.10. От параметров каких компонентов схемы на рисунке 11.2 зависит точность интегрирования входного напряжения?
- 6.11. Выведите соотношение между входным и выходным напряжением для схемы на рисунке 11.2.
- 6.12. Выведите соотношение между входным и выходным напряжением для схемы рисунка 11.3.
- 6.13. От параметров каких компонентов схемы на рисунке 11.3 зависит величина выходного напряжения при подаче на вход линейно изменяющегося напряжения?
- 6.14. Почему выходное напряжение дифференцирующего каскада пропорционально отрицательному значению производной входного напряжения?

## ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование автоколебательных и ждущих мультивибраторов на операционных усилителях.

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Мультивибратор (от латинских слов *multim* – много и *vibro* – колеблю) – релаксационный генератор импульсов почти прямоугольной формы, выполненный в виде усилительного устройства с цепью положительной обратной связи (ПОС). Различают два вида мультивибраторов: автоколебательные (не обладают состоянием устойчивого равновесия) и ждущие (обладают одним состоянием устойчивого равновесия и поэтому их часто называют одновибраторами).

#### *Мультивибратор*

Если выход триггера Шмитта соединить с инвертирующим входом через интегрирующую цепочку, полученная схема будет генерировать двухполярные импульсы. Принципиальная схема автоколебательного мультивибратора на операционном усилителе представлена на рисунке 12.1, а, временные диаграммы, поясняющие его работу – на рисунке 12.1, б.

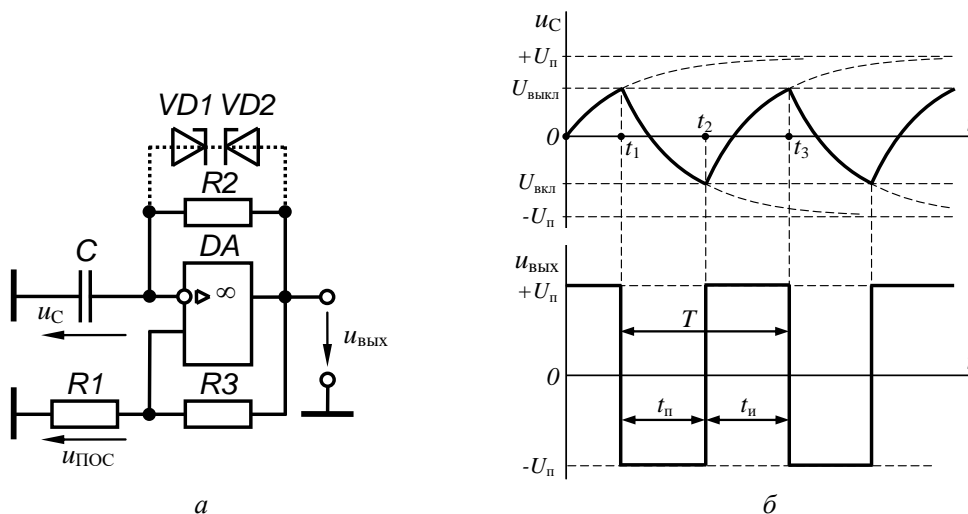


Рисунок 12.1 — Схема (а) и временные диаграммы работы (б)  
мультивибратора на операционном усилителе

Принцип действия мультивибратора состоит в периодическом перезаряде конденсатора  $C$  до напряжения включения  $U_{\text{вкл}}$  и выключения  $U_{\text{выкл}}$  под действием выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$  ОУ, равного  $\pm U_{\text{п}}$ . Так как основной частью мультивибратора является триггер Шмитта, то выходное напряжение мультивибратора может быть равно  $+U_{\text{п}}$  либо  $-U_{\text{п}}$ .

Работа мультивибратора поясняется временными диаграммами, приведенными на рисунке 12.1, б.

В исходном состоянии источники питания ОУ отключены:  $+U_{\text{п}} = 0$ ,  $-U_{\text{п}} = 0$ . Конденсатор  $C$  разряжен и  $u_C = 0$ . В момент времени  $t = 0$  производится включение источников питания. При их включении в схеме под действием ПОС развивается случайный лавинообразный процесс, в результате которого на выходе ОУ может установиться либо  $+U_{\text{п}}$  либо  $-U_{\text{п}}$ .

Допустим, что в момент времени  $t = 0$  на выходе ОУ установилось напряжение  $+U_{\text{п}}$ . Тогда на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение  $u_{\text{ос}}$ , равное напряжению выключения  $U_{\text{выкл}}$ :

$$U_{\text{выкл}} = + \frac{U_{\text{п}} R_2}{R_2 + R_3}.$$

Под действием  $u_{\text{вых}} = +U_{\text{п}}$  начинает заряжаться конденсатор  $C$  через резистор  $R_2$ . При этом напряжение на конденсаторе  $u_C$  растет по экспоненте, стремясь к  $+U_{\text{п}}$ . Как только в момент времени  $t_1$  напряжение  $u_C$  достигнет напряжения  $U_{\text{выкл}}$ , присутствующего на неинвертирующем входе ОУ, ТШ переключится и выходное напряжение мультивибратора изменится скачком до  $-U_{\text{п}}$ . В результате на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение  $u_{\text{ПОС}}$ , равное напряжению включения  $U_{\text{вкл}}$ :

$$U_{\text{вкл}} = - \frac{U_{\text{п}} R_2}{R_2 + R_3}.$$

Начиная с момента  $t_1$  под действием  $u_{\text{вых}} = -U_{\text{п}}$  конденсатор  $C$  перезарядается через резистор  $R_2$ . При этом напряжение на конденсаторе  $u_C$  изменяется по экспоненте, стремясь к  $-U_{\text{п}}$ . Но когда в момент  $t_2$  напряжение  $u_C$  на нем станет равным  $U_{\text{вкл}}$ , триггер Шмитта переключится и выходное напряжение мультивибратора изменит знак до  $u_{\text{вых}} = +U_{\text{п}}$ . Вновь начинается этап перезаряда конденсатора  $C$  и в момент  $t_2$  происходит очередное срабатывание триггера Шмитта. Далее процессы повторяются. В результате на выходе мультивибратора формируется периодическая последовательность прямоугольных импульсов.

Выражение для длительности выходных импульсов  $t_{\text{и}}$  мультивибратора как следует из [1] имеет вид:

$$t_{\text{и}} = \tau \ln \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{вкл}}}{U_{\text{п}} - U_{\text{выкл}}}, \quad (12.1)$$

где  $\tau = R_2 C$ .

Подставив в выражение (12.1) напряжения  $U_{\text{вкл}}$  и  $U_{\text{выкл}}$ , из [2] получаем:

$$t_{\text{и}} = \tau \ln \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{вкл}}}{U_{\text{п}} - U_{\text{выкл}}} = R_2 C \ln \frac{1 + R_1 / (R_1 + R_3)}{1 - R_1 / (R_1 + R_3)} = R_2 C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_3} \right).$$

Из временных диаграмм видно, что в рассмотренном мультивибраторе длительность импульсов  $t_{\text{и}}$  равна длительности пауз  $t_{\text{п}}$ , т.е.  $t_{\text{и}} = t_{\text{п}}$ . Такой мультивибратор называется симметричным. При этом частота выходных импульсов определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_2 C \ln(1 + 2R_1 / R_3)}, \quad (12.2)$$

где  $T = t_{\text{и}} + t_{\text{п}}$ .

В симметричном мультивибраторе скважность выходных импульсов  $Q = 2$ .

Регулирование частоты мультивибратора может осуществляться изменением либо параметров времязадающей  $RC$ -цепи  $R_2$  или  $C$ , либо изменением сопротивления одного из резисторов ПОС  $R_1$  или  $R_3$ .

### *Одновибратор*

Одновибратор – это формирователь одиночного прямоугольного импульса с фиксированной длительностью, возникающего на выходе при поступлении на его вход короткого запускающего импульса. Одновибратор иногда называют ждущим или заторможенным мультивибратором.

На рисунке 12.2, *а* приведена схема одновибратора на ОУ. Одновибратор состоит из: триггера Шмитта на ОУ  $DA$  с цепью ПОС на резисторах  $R_2$  и  $R_4$ ; времязадающей  $RC$ -цепи  $R_3 C_2$ , включенной в цепь ООС; диода  $VD_1$ , фиксирующего начальное напряжение на конденсаторе  $C_2$  и цепи запуска, состоящей из дифференцирующей  $RC$ -цепи  $R_1 C_1$  и разделительного диода  $VD_2$ .

На рисунке 12.2, *б* приведены временные диаграммы, поясняющие работу одновибратора. Работу одновибратора можно разделить на три этапа.

1-й этап (исходное состояние, «ждущий» этап) от  $t = 0$  до  $t_1$ . На этом этапе отсутствует входной импульс, т.е.  $u_{\text{вх}} = 0$ , конденсатор  $C_1$  разряжен, а выходное напряжение  $u_{\text{вых}} = -U_{\text{п}}$ . В схеме протекает ток ждущего режима  $i_{\text{жд}}$  по



цепи: «общий» – диод  $VD_1$  – резистор  $R_3$  – « $-U_{\Pi}$ » (выход). Протекающий через идеальный диод ток  $i_{\text{жд}}$  не создает на нем падения напряжения. В результате напряжение  $u_C$  на конденсаторе  $C$  поддерживается (фиксируется) на нулевом уровне, т.е.  $u_C = 0$ . Так как  $u_{\text{ПОС}} < u_C$ , то на выходе поддерживается напряжение  $u_{\text{ВЫХ}} = -U_{\Pi}$ . Напряжение  $u_{\text{ПОС}}$  определяется выражением:

$$u_{\text{ПОС}} = U_{\text{ВКЛ}} = \frac{(-U_{\Pi})R_1R_2/(R_1 + R_2)}{R_4 + R_1R_2/(R_1 + R_2)} = -\frac{U_{\Pi}R_1R_2}{R_1R_4 + R_2R_4 + R_1R_2}.$$

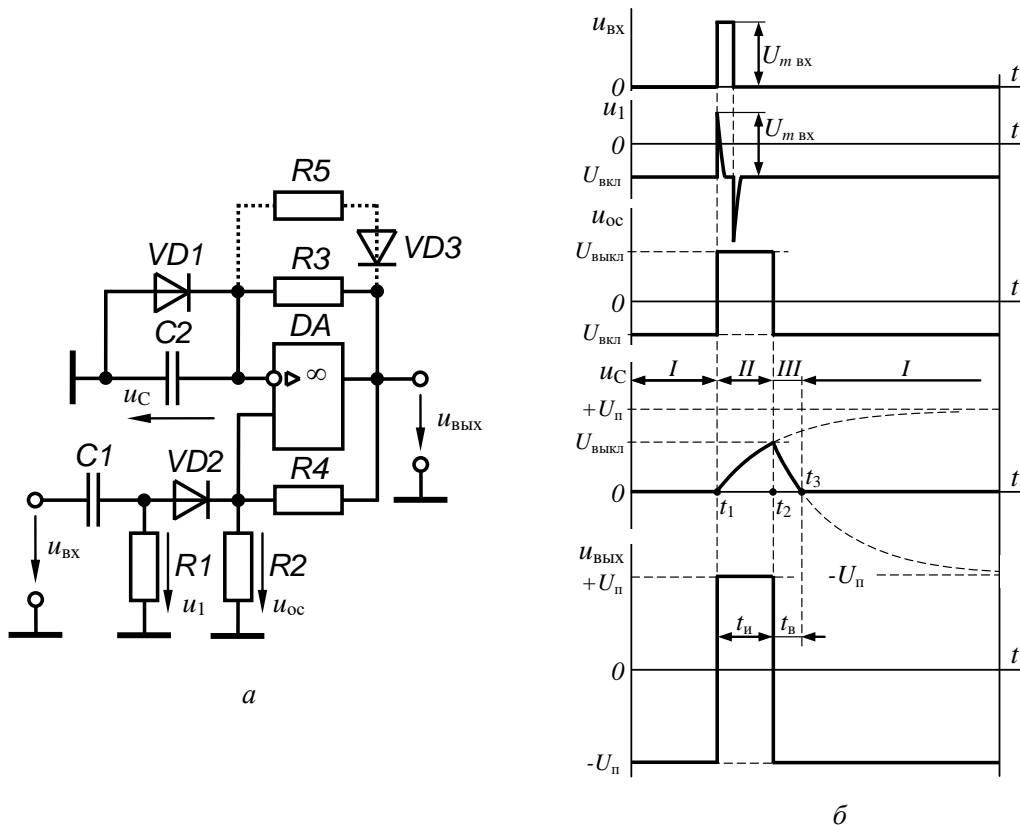


Рисунок 12.2 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) одновибратора на операционном усилителе

Это состояние одновибратора устойчиво и может длиться сколько угодно долго, пока не придет запускающий импульс.

2-й этап (этап формирования импульса) от  $t_1$  до  $t_2$ . В момент времени  $t_1$  на вход одновибратора подается запускающий импульс, который дифференцируется (укорачивается)  $RC$ -цепью  $R_3C_2$ . Положительный импульс полученного сигнала, выделенный диодом  $VD_2$ , поступает на неинвертирующий вход ОУ. Непременным условием получения положительного импульса запуска одновибратора после прохождения входным импульсом цепи запуска является  $U_{m \text{ ВХ}} > U_{\text{ВКЛ}}$ . Напряжение на неинвертирующем входе ОУ становится поло-

жительным. А, так как на инвертирующем входе сохраняется напряжение  $u_C = 0$ , то ТШ переключится и напряжение на выходе одновибратора достигнет  $u_{\text{вых}} = +U_{\text{п}}$ . В результате формируется фронт выходного импульса. На этом этапе необходимость в поддержании положительного напряжения на неинвертирующем входе отпадает, так как это состояние поддерживается положительным напряжением  $u_{\text{ПОС}}$ , равным напряжению выключения  $U_{\text{выкл}}$ :

$$U_{\text{выкл}} = + \frac{U_{\text{п}} R_2}{R_2 + R_4}.$$

Поэтому входной импульс может быть довольно коротким.

Начиная с момента времени  $t_1$  под действием  $u_{\text{вых}} = +U_{\text{п}}$  начинает заряжаться конденсатор  $C_2$  через резистор  $R_3$ . При этом напряжение на конденсаторе  $u_C$  растет по экспоненте, стремясь к  $+U_{\text{п}}$ . Как только в момент времени  $t_2$  напряжение  $u_C$  достигнет напряжения  $U_{\text{выкл}}$ , присутствующего на неинвертирующем входе ОУ, ТШ переключится и выходное напряжение мультивибратора изменится скачком до  $-U_{\text{п}}$ . В результате формируется спад (срез) выходного импульса, а на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение  $u_{\text{ПОС}}$ , равное напряжению включения  $U_{\text{вкл}}$ .

Длительность импульса, сформированного одновибратором, определяется по формуле:

$$t_{\text{и}} = \tau \ln \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{п}} - U_{\text{выкл}}} = R_3 C_2 \ln \frac{1}{1 - R_4 / (R_2 + R_4)} = R_3 C_2 \ln \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right).$$

3-й этап (этап восстановления исходного состояния) от  $t_2$  до  $t_3$ . Начиная с этого момента  $t_2$  под действием  $u_{\text{вых}} = -U_{\text{п}}$  конденсатор  $C_2$  перезаряжается через резистор  $R_3$ . При этом напряжение на конденсаторе  $u_C$  изменяется по экспоненте, стремясь к  $-U_{\text{п}}$ . Но когда в момент  $t_3$  напряжение  $u_C$  на нем станет равным нулю, откроется диод  $VD_1$ , и схема придет в исходное состояние. В момент времени  $t_3$  стадия восстановления завершается, одновибратор переходит в ждущий режим и готов к приходу нового импульса.

Длительность  $t_{\text{в}}$  этапа восстановления определяется выражением:

$$\begin{aligned} t_{\text{в}} &= \tau \ln \frac{-U_{\text{п}} - U_{\text{выкл}}}{-U_{\text{п}}} = R_3 C_2 \ln \frac{-1 - R_4 / (R_2 + R_4)}{-1} = \\ &= R_3 C_2 \ln \left( \frac{R_2 + 2R_4}{R_2 + R_4} \right). \end{aligned}$$

Важно отметить, что запрещается подавать запускающий импульс на

вход одновибратора в течение этапа восстановления, так как одновибратор может либо не запуститься, либо длительность его выходного импульса будет непредсказуемой.

С целью сокращения длительности этапа восстановления часто в схеме одновибратора предусматривается дополнительная цепь (показана пунктиром), состоящая из резистора  $R_5$  и диода  $VD_3$ . Причем резистор  $R_5$  выбирается с меньшим сопротивлением, чем  $R_3$ . В результате конденсатор  $C_2$  в течение этапа восстановления разряжается быстрее.

Регулирование длительности импульса  $t_n$  одновибратора может осуществляться изменением либо параметров времязадающей  $RC$ -цепи  $R_3$  или  $C_2$ , либо изменением сопротивления одного из резисторов ПОС  $R_2$  или  $R_4$ .

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучить принципы работы рассматриваемых типовых каскадов на ОУ, их основные свойства.

3.2. Начертить схемы включения мультивибратора и одновибратора на ОУ.

3.3. По формуле (12.2) рассчитать теоретическое значение частоты сигнала с выхода мультивибратора. Принять сопротивления резисторов:  $R_3=10$  кОм,  $R_1=1$  кОм. Значения емкости конденсатора  $C$  и сопротивления резистора  $R_2$  взять из с таблицы 12.1. Результат записать в таблицу 12.2.

Таблица 12.1

Вариант	$R_2$ , кОм	$C$ , мкФ
1	10	2,2
2	11	2,0
3	12	1,8
4	13	1,6
5	15	1,5
6	16	1,4
7	18	1,2
8	20	1,1
9	22	1,0

3.4. Показать начерченные схемы преподавателю для проверки.

## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

### 4.1. Исследование мультивибратора

4.1.1. С помощью инструментальных средств программы Workbench собрать схему, показанную на рисунке 12.3.

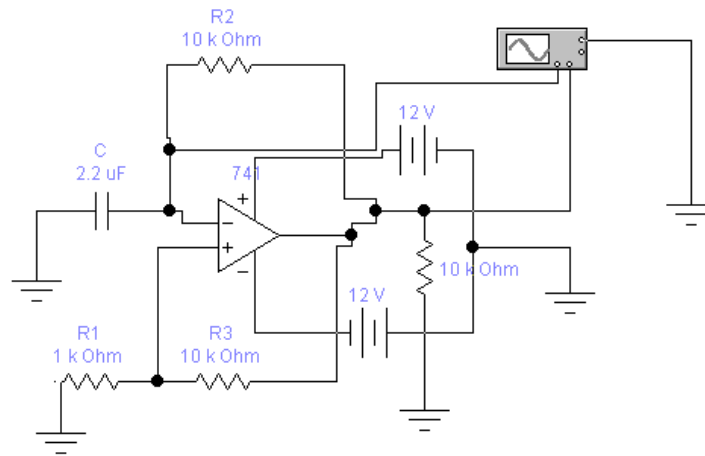


Рисунок 12.3 – Схема для исследования работы мультивибратора

4.1.2. Для выбора операционного усилителя из группы аналоговых компонентов библиотеки *Analog ICs* (кнопка с изображением микросхемы и аббревиатура *ANA*) переместить пиктограмму *3-Terminal Opamp* (операционный усилитель с пятью выводами) на рабочее поле. Выбрать модель операционного усилителя. Для этого подвести указатель мыши к операционному усилителю и, после изменения его вида в изображение руки, двойным щелчком левой клавиши мыши вызвать диалоговое меню *3-Terminal Opamp Properties*. В появившемся диалоговом окне в окошке *Library* (библиотека) выбрать библиотеку *default*, а в окошке *Model* – модель операционного усилителя *741*. После этого левой кнопкой мыши щелкнуть клавишу *OK*.

4.1.3. Установить сопротивления резисторов:  $R_3=10$  кОм,  $R_1=1$  кОм. Установить емкость конденсатора  $C$  и сопротивления резистора  $R_2$  в соответствии с таблицей 12.1.

4.1.4. К выходу ОУ подключить осциллограф и измерить частоту выходного напряжения автоколебательного мультивибратора, совместив риски «1» и «2» на экране осциллографа с началом и концом периода генерируемого сигнала, как показано на рисунке 12.4. Результат записать в таблицу 12.2.

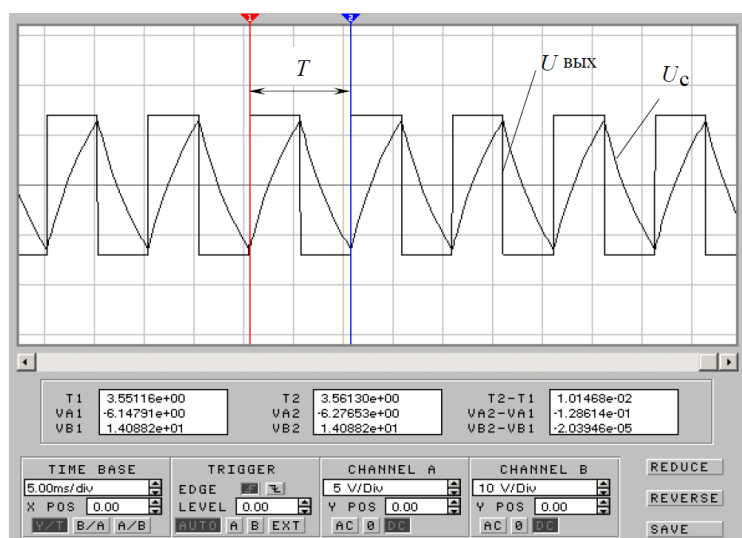


Рисунок 12.4 – Осциллограммы выходного напряжения мультивибратора

Таблица 12.2

$f_{\text{теор}}, \text{Гц}$	$f_{\text{экспер}}, \text{Гц}$

4.1.5. Изменить сопротивления резистора  $R_2$  (при неизменной емкости  $C$ , заданной в таблице 12.1) и емкость конденсатора  $C$  (при неизменном сопротивлении резистора  $R_2$ , заданном в таблице 12.1) таким образом, чтобы частота генератора изменилась в соответствии с таблицей 12.3.

Таблица 12.3

$f, \text{Гц}$	$C, \text{мкФ} (R_2=\text{const})$	$R_2, \text{кОм} (C=\text{const})$
$2f$		
$1,5f$		
$f$		
$0,75f$		
$0,5f$		

4.1.6. По данным таблицы 12.3 построить графики зависимостей  $f(R_2)$  и  $f(C)$ . Сравнить результаты двух экспериментов и сделать выводы.

#### 4.2. Исследование одновибратора

4.2.1. С помощью инструментальных средств программы Workbench собирать схему, показанную на рисунке 12.5.

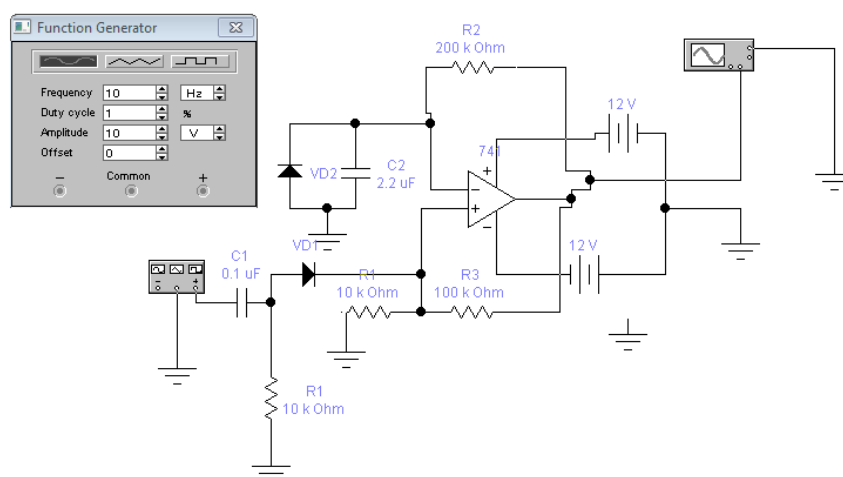


Рисунок 12.5 – Схема для исследования работы одновибратора

4.2.2. Установить сопротивления резисторов:  $R_1=10$  кОм,  $R_3=100$  кОм,  $R_4=10$  кОм. Установить емкость конденсатора  $C_1=0,1$  мкФ. Параметры резистора  $R_2$  и конденсатора  $C_2$  установить в соответствии с таблицей 12.4.

Таблица 12.4

Вариант	$R_2$ , кОм	$C_2$ , мкФ
1	51	2,2
2	43	1,0
3	33	1,8
4	13	1,6
5	27	1,5
6	16	1,3
7	22	1,2
8	20	1,1
9	15	1,0

4.2.3. Установить параметры генератора: **Frequency** - 10 Гц, **Duty cycle** – 1%, **Amplitude** – 10 В.

4.2.4. Измерить длительность импульса ( $T$ ) на выходе ждущего мультивибратора при помощи осциллографа, аналогично, как по п. 4.1.4 (рисунок 12.6).

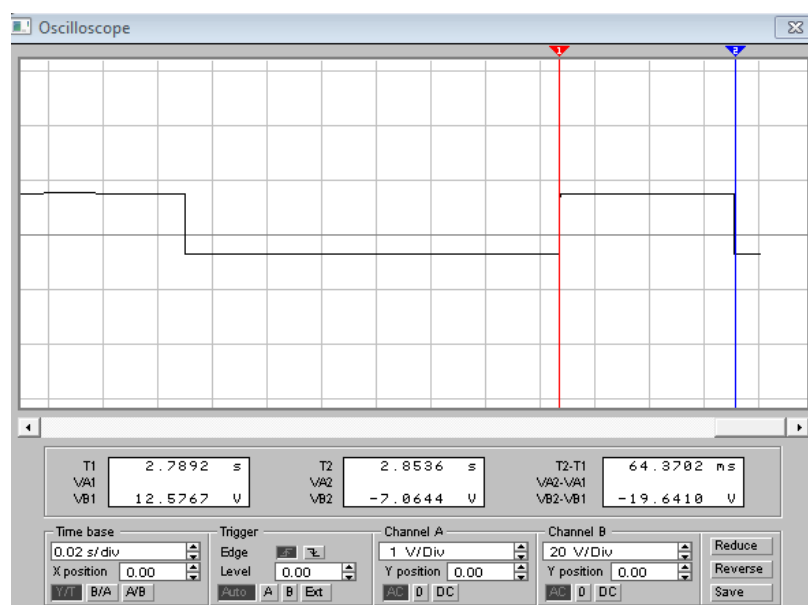


Рисунок 12.6 – Осциллограммы выходного напряжения одновибратора

4.2.5 Изменить сопротивление резистора  $R_2$  таким образом, чтобы получить длительность импульса в соответствии с таблицей 12.5.

Таблица 12.5

$T$ , мс	$0,3T$	$0,5T$	$0,7T$	$0,85T$	$T$	$1,5T$	$2T$	$2,5T$	$3T$
$R_2$ , кОм									

4.26. Построить график зависимости  $T(R_2)$  по значениям таблицы 12.5.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать цель работы, исследуемые схемы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицу с экспериментальными результатами, график полученных характеристик, построенный в масштабе. В отчёте также приводятся результаты расчётов, выводы, сделанные при исследовании.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Дайте определение ждущего мультивибратора (одновибратора).

6.2. Поясните принцип действия этого устройства диаграммами (в общем виде, не «привязываясь» к конкретной схеме).

6.3. Получите выражение, определяющее длительность выходного импульса в основной схеме одновибратора. Приведите диаграммы, поясняющие процесс формирования выходного сигнала.

6.4. Каким образом можно регулировать длительность выходного импульса одновибратора? Предложите, аргументируя, несколько способов.

6.5. Что такое «время восстановления» одновибратора? Укажите это время на соответствующей временной диаграмме. Получите выражение для определения времени восстановления в основной схеме устройства.



### 13. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с работой основных логических цифровых элементов и триггеров.

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Цифровые схемы являются составной частью всех ЭВМ, систем автоматического управления и предназначены для обработки, хранения и передачи дискретной (цифровой) информации. В цифровых схемах выполняются различные логические операции над дискретными сигналами при двоичном способе их представления (1; 0). Цифровые логические схемы делятся на комбинационные схемы и дискретные автоматы с памятью.

К логическим комбинационным схемам относят такие, выходное логическое состояние которых однозначно определяется комбинацией их входных сигналов в данный момент времени. Это логические элементы, дешифраторы, шифраторы, преобразователи кодов и другие устройства.

К дискретным автоматам с памятью относят такие устройства, выходное состояние которых определяется не только комбинацией входных сигналов в данный момент времени, но и тем, какие последовательности сигналов поступали на их входы в предшествующие моменты времени. Автомат помнит свою предысторию и хранит ее в памяти. Это разнообразные триггеры, регистры, счетчики импульсов

Преимущественное распространение получили логические элементы потенциального типа. В них используются дискретные сигналы, нулевому значению «0» которых соответствует уровень низкого потенциала, а единичному значению «1» – уровень высокого потенциала.

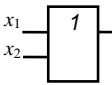
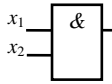
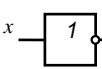
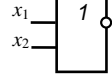
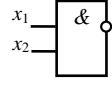
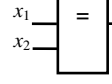
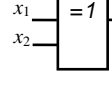
Все схемы цифровой техники выполняются на логических интегральных микросхемах. Закон функционирования логических элементов можно описать, используя алгебру логики (булеву алгебру) или при помощи таблиц, называемых таблицами истинности.

Любое цифровое устройство можно создать, имея в распоряжении набор логических элементов, выполняющих следующие операции: логическое сло-

жение (логическое ИЛИ), логическое умножение (логическое И) и логическое отрицание (логическое НЕ). Можно обойтись и только одним из составных логических элементов 2И-НЕ или 2ИЛИ-НЕ.

В таблице 13.1 представлены условные обозначения основных логических элементов, операции, выполняемые этими элементами и их таблицы истинности.

Таблица 13.1

Название ЛЭ	Логическое уравнение	Условное обозначение	Таблица истинности		
ИЛИ	$y = x_1 \vee x_2$		$x_1$	$x_2$	$y$
			0	0	0
			1	0	1
			0	1	1
И	$y = x_1 \cdot x_2$		$x_1$	$x_2$	$y$
			0	0	0
			1	0	0
			0	1	0
НЕ (инвертор)	$y = \bar{x}$		$x$	$y$	
			0	1	
			1	0	
ИЛИ-НЕ (элемент Пирса)	$y = \overline{x_1 \vee x_2}$		$x_1$	$x_2$	$y$
			0	0	1
			1	0	0
			0	1	0
И-НЕ (элемент Шеффера)	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$		$x_1$	$x_2$	$y$
			0	0	1
			1	0	1
			0	1	1
Эквивалентность (равнозначность)	$y = x_1 \sim x_2$		$x_1$	$x_2$	$y$
			0	0	1
			1	0	0
			0	1	0
Исключающее ИЛИ (неравнозначность)	$y = x_1 \oplus x_2$		$x_1$	$x_2$	$y$
			0	0	0
			1	0	1
			0	1	1
			1	1	0

Триггером (англ. Trigger) называется устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями равновесия и способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешних управляющих сигналов, поступающих на его информационные входы [1].

Триггеры предназначены для записи и хранения цифровой информации (одного бита – одноразрядного двоичного числа).

Классификация. По функциональному признаку триггеры подразделяются на RS-, D-, T-, JK- триггеры.

По способу записи информации триггеры подразделяются на асинхронные и синхронные.

У асинхронных триггеров переход из одного состояния в другое (переключение) происходит при поступлении соответствующих сигналов на информационные входы.

Синхронные триггеры переключаются только при наличии тактового сигнала на дополнительном синхронизирующем входе.

По способу управления синхронные триггеры подразделяются на триггеры со статическим и триггеры с динамическим управлением.

Триггеры со статическим управлением переключаются, когда сигнал на синхронизирующем входе достиг порогового уровня.

У синхронных триггеров со статическим управлением в течение действия синхронизирующего импульса смена сигналов на информационных входах вызывает новые срабатывания. Во многих случаях это свойство является недостатком, так как приводит к сбоям в работе цифрового устройства. От этого недостатка свободны триггеры с динамическим управлением.

Триггеры с динамическим управлением в зависимости от схемы исполнения реагируют либо на фронт, либо на срез (спад) синхронизирующего импульса.

Схемы триггеров выполняются на ЛЭ и могут быть построены в базисах ИЛИ-НЕ или И-НЕ. Рассмотрим работу схем основных триггеров.

Асинхронный RS-триггер на логических элементах ИЛИ-НЕ. Вначале рассмотрим основные понятия, касающиеся всех асинхронных RS-триггеров.

Свое название RS-триггеры взяли от обозначения их входов. Входы, в свою очередь, взяли свое обозначение от первых букв английских слов:

- Set – установка или запись;
- Reset – переустановка, сброс, стирание, установка нуля.

Триггеры имеют два информационных входа S и R и два выхода – пря-

мой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ .

При подаче соответствующего сигнала на вход  $S$  происходит установка триггера, а при подаче соответствующего сигнала на вход  $R$  происходит его сброс. В зависимости от схемы триггеры могут управляться либо лог. 0 либо лог.1.

Под установкой (записью) понимают режим работы триггера, при котором на прямом выходе  $Q$  устанавливается сигнал лог.1, а на инверсном  $\bar{Q}$  – лог.0.

Под сбросом (стиранием) будем понимать режим работы триггера, при котором на прямом выходе  $Q$  устанавливается сигнал лог.0, а на инверсном  $\bar{Q}$  – лог.1.

Режим, при котором при изменении набора входных сигналов состояние выходов триггера не изменяется, называется режимом хранения записанной информации.

Работу триггеров можно рассматривать с помощью таблицы переходов. В отличие от таблицы истинности в таблице переходов при изменении набора входных сигналов последующее состояние выходов триггера зависит от предыдущего.

На рисунке 13.1, *а* приведена схема асинхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ ИЛИ-НЕ. Схема триггера выполнена на двух ЛЭ ИЛИ-НЕ с перекрестными обратными связями.

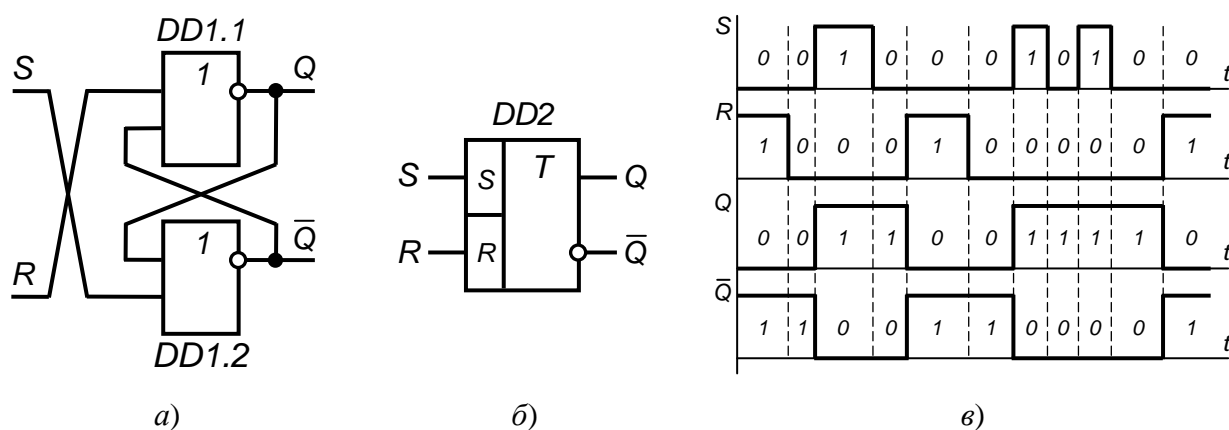


Рисунок 13.1– Асинхронный  $RS$ -триггер на линейных элементах ИЛИ-НЕ: *а* – схема; *б* – условное обозначение; *в* – временные диаграммы работы

Работу  $RS$ -триггера рассмотрим по таблице переходов (таблица 13.2). В таблице 13.2 индекс  $n$  обозначает состояние текущего такта, а  $n-1$  – состояние предыдущего такта.

Таблица 13.2

$S$	$R$	$Q_n$	$\overline{Q}_n$	Режим
1	0	1	0	Установка
0	1	0	1	Сброс
0	0	$Q_{n-1}$	$\overline{Q}_{n-1}$	Хранение
1	1	0	0	Запрещенный

$RS$ -триггер построен на ЛЭ ИЛИ-НЕ, следовательно, на входах необходимо обращать внимание на активный уровень лог.1, так как его присутствие на любом из входов ЛЭ ИЛИ-НЕ однозначно определяет на его выходе лог.0.

При наборе входных сигналов  $S = 1, R = 0$  лог.1 на входе ЛЭ  $DD1.2$  устанавливает на его выходе  $\overline{Q}$  сигнал лог.0, а два лог.0 на входах ЛЭ  $DD1.1$  устанавливает на его выходе  $Q$  сигнал лог.1. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 1, \overline{Q} = 0$  произошла установка (запись) триггера. В триггер записана лог.1, установленная на выходе  $Q$ .

При наборе входных сигналов  $S = 0, R = 1$  лог.1 на входе ЛЭ  $DD1.1$  устанавливает на его выходе  $Q$  сигнал лог.0, а два лог.0 на входах ЛЭ  $DD1.2$  устанавливают на его выходе  $\overline{Q}$  сигнал лог.1. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 0, \overline{Q} = 1$  произошел сброс триггера. Информация из триггера удалена, так как на выходе  $Q$  установлен лог.0.

Следующий набор входных сигналов  $S = 0, R = 0$  однозначно не определяет состояние выходов триггера, а вот лог.1 на входе ЛЭ  $DD1.1$  с выхода  $\overline{Q}$  ЛЭ  $DD1.2$  оставит на выходе  $Q$  лог.0. Два лог.0 на входах ЛЭ  $DD1.2$  оставляют на его выходе  $\overline{Q}$  сигнал лог.1. Таким образом, состояние выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$  триггера не изменилось, следовательно, это режим хранения предыдущего состояния. Если бы перед приходом набора входных сигналов  $S = 0, R = 0$  состояние выходов триггера было  $Q = 1, \overline{Q} = 0$ , то оно бы и сохранилось.

При наборе входных сигналов  $S = 1, R = 1$  состояние выходов  $Q = 0, \overline{Q} = 0$ . Такой набор входных сигналов для данного  $RS$ -триггера запрещен по двум причинам:

1) утеряны свойства триггера, так как имеем  $Q = 0, \overline{Q} = 0$ , а сигналы должны быть противоположными.

2) при переходе из набора входных сигналов  $S = 1, R = 1$  в набор  $S = 0, R = 0$

состояние выходов триггера будет непредсказуемо.

Из анализа таблицы 13.2 следует, что при подаче на вход  $S$  лог.1 происходит установка триггера, а при подаче лог.1 на вход  $R$  – его сброс. Следовательно, данный RS-триггер управляется лог.1, то есть активным логическим уровнем является лог.1.

На рисунке 13.1, б приведено условное обозначение асинхронного RS-триггера на ЛЭ ИЛИ-НЕ. Вверху основного поля изображена буква  $T$ , указывающая на то, что это устройство – триггер. Обозначение входов  $S$  и  $R$  указывает на то, что это RS-триггер. Отсутствие дополнительного синхронизирующего входа  $C$  говорит о том, что данный триггер асинхронный. В обозначении входы триггера  $S$  и  $R$  прямые, так как нет обозначения инверсий. Это указывает на то, что данный RS-триггер управляется лог.1.

Таким образом, по условному обозначению можно узнать функциональное назначение триггера и объяснить логику его работы.

На рисунке 13.1, в приведены временные диаграммы, поясняющие работу асинхронного RS-триггера на ЛЭ ИЛИ-НЕ.

При построении временных диаграмм сначала отмечаются интервалы времени, соответствующие различным наборам входных сигналов  $S$  и  $R$ . На рисунке 13.1, в интервалы разделены вертикальными пунктирными линиями. Затем, анализируя наборы входных сигналов  $S$  и  $R$ , по таблице 13.2 определяются состояния выходов  $Q$ ,  $\bar{Q}$  и указываются на временных диаграммах.

**Асинхронный RS-триггер на логических элементах И-НЕ.** На рисунке 13.3, а приведена схема асинхронного RS-триггера на ЛЭ И-НЕ. Схема триггера выполнена на двух ЛЭ И-НЕ с перекрестными обратными связями.

Триггер имеет два информационных входа  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  и два выхода – прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ .

Работу RS-триггера рассмотрим по таблице переходов (таблица 13.3). В таблице индекс  $n$  обозначает состояние текущего такта, а  $n - 1$  – состояние предыдущего такта.

RS-триггер построен на ЛЭ И-НЕ, следовательно, на входах будем обращать внимание на активный уровень лог.0, так как его присутствие на любом из входов ЛЭ И-НЕ однозначно определяет на его выходе лог.1.

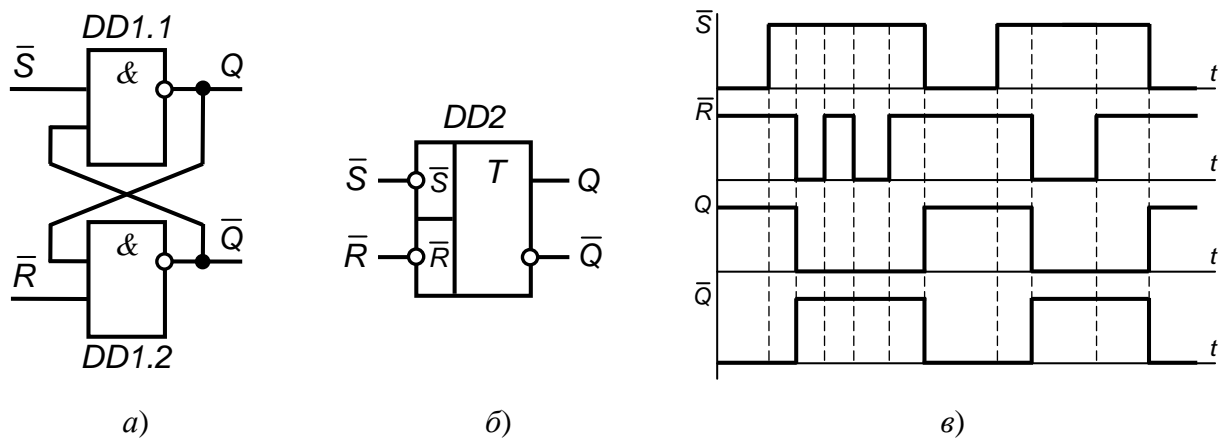


Рисунок 13.2 – Асинхронный RS-триггер на ЛЭ И-НЕ:

*а* – схема; *б* – условное обозначение; *в* – временные диаграммы работы

При наборе входных сигналов  $\bar{S} = 0$ ,  $\bar{R} = 1$  лог.0 на входе ЛЭ DD1.1 устанавливает на его выходе  $Q$  сигнал лог.1, а две лог.1 на входах ЛЭ DD1.2 устанавливает на его выходе  $\bar{Q}$  сигнал лог.0. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 0$  произошла установка (запись) триггера. В триггер записана лог.1, установленная на выходе  $Q$ .

Таблица 13.3

$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q_n$	$\bar{Q}_n$	Режим
0	1	1	0	Установка
1	0	0	1	Сброс
1	1	$0 (Q_{n-1})$	$1(\bar{Q}_{n-1})$	Хранение
0	0	0	0	Запрещенный

При наборе входных сигналов  $\bar{S} = 1$ ,  $\bar{R} = 0$  лог.0 на входе ЛЭ DD1.2 устанавливает на его выходе  $\bar{Q}$  сигнал лог.1, а две лог.1 на входах ЛЭ DD1.1 устанавливают на его выходе  $Q$  сигнал лог.0. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$  произошел сброс триггера. Информация из триггера удалена, так как на выходе  $Q$  установлен лог.0.

Следующий набор входных сигналов  $\bar{S} = 1$ ,  $\bar{R} = 1$  однозначно не определяет состояние выходов триггера, а вот лог.0 на входе ЛЭ DD1.2 с выхода  $Q$  ЛЭ DD1.1 оставит на выходе  $\bar{Q}$  лог.1. Две лог.1 на входах ЛЭ DD1.1 оставляют на его выходе  $Q$  сигнал лог.0. Таким образом, состояние выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$  триггера не изменилось, следовательно, это режим хранения предыдущего состояния. Если бы перед приходом набора входных сигналов  $S = 1$ ,  $R = 1$  состояние выходов триггера было  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 0$ , то оно бы и сохранилось.

При наборе входных сигналов  $\bar{S} = 0$ ,  $\bar{R} = 0$  состояние выходов  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 1$ . Такой набор входных сигналов для данного  $RS$ -триггера запрещен по двум причинам:

1) утеряны свойства триггера, так как имеем  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 1$ , а сигналы должны быть противоположными;

2) при переходе из набора входных сигналов  $\bar{S} = 0$ ,  $\bar{R} = 0$  в набор  $\bar{S} = 1$ ,  $\bar{R} = 1$  состояние выходов триггера будет непредсказуемо.

Из анализа таблицы переходов (таблица 13.3) следует, что при подаче на вход  $\bar{S}$  лог.0 происходит установка триггера, а при подаче лог.0 на вход  $\bar{R}$  – его сброс. Следовательно, данный  $RS$ -триггер управляется лог.0, то есть активным логическим уровнем является лог.0.

На рисунке 13.2, б приведено условное обозначение асинхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ. Вверху основного поля изображена буква  $T$ , указывающая на то, что это устройство – триггер. Обозначение входов  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  указывает на то, что это  $RS$ -триггер. Отсутствие дополнительного синхронизирующего входа  $C$  говорит о том, что данный триггер асинхронный. В обозначении входы триггера  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  инверсные, так как есть обозначения инверсий (кружочки на входах). Это указывает на то, что данный  $RS$ -триггер управляется лог.0. Для подтверждения инверсных входов данного триггера над буквенными обозначениями входов ставится знак инверсии.

На рисунке 13.2, в приведены временные диаграммы, поясняющие работу асинхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ. Анализируя наборы входных сигналов  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$ , состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$  определяются по таблице 13.3.

### **Синхронный $RS$ -триггер на логических элементах И-НЕ.**

Во многих цифровых устройствах необходимо синхронизировать во времени переключение триггеров, так как неодновременное их переключение может привести к появлению непредсказуемых состояний устройства и сбоям в его работе.

С этой целью синхронные триггеры снабжены дополнительным входом, называемым синхронизирующим (тактируемым). Назначение синхронизирующего входа заключается в том, чтобы сигналом на этом входе разрешать прием сигналов с информационных входов в заданные временные интервалы для триггеров со статическим управлением и в заданные моменты времени для триггеров с динамическим управлением. При отсутствии сигнала



на синхронизирующем входе сигналы на информационных входах триггером не воспринимаются, и триггер находится в режиме хранения записанной информации [1].

Синхронные триггеры позволяют устранять влияние различий в величинах задержек в распространении сигнала через отдельные элементы схемы, обеспечивая при этом одновременный прием сигналов разными частями схемы. Синхронные триггеры обладают большими логическими возможностями, чем асинхронные.

На рисунке 13.3, *а* приведена схема синхронного *RS*-триггера на ЛЭ И-НЕ.

Схема триггера выполнена на четырех ЛЭ И-НЕ. ЛЭ *DD1.1* и *DD1.2* являются входной логикой (схемой управления), а схема на ЛЭ *DD1.3* и *DD1.4* представляет собой асинхронный *RS*-триггер.

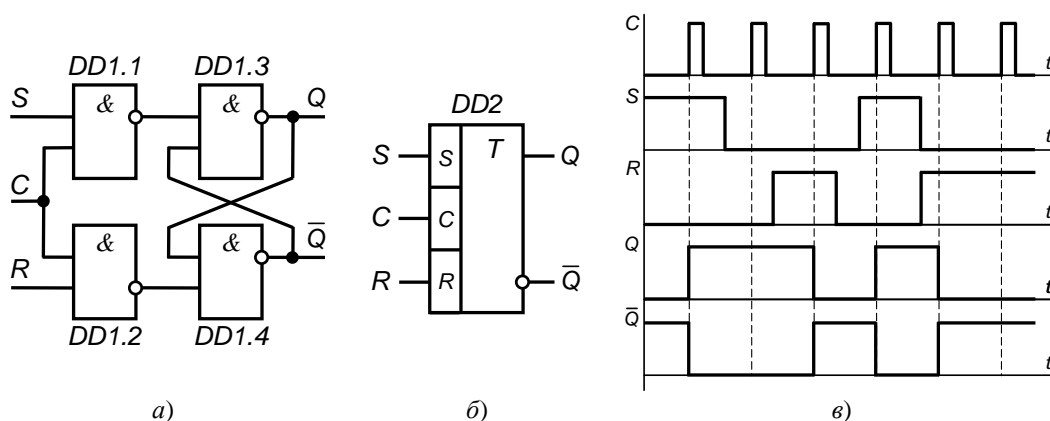


Рисунок 13.3 – Синхронный *RS*-триггер на ЛЭ И-НЕ:

*а* – схема; *б* – условное обозначение; *в* – временные диаграммы работы

Триггер имеет два информационных входа *S* и *R*, синхронизирующий вход *C* (от англ. *Clock*) и два выхода – прямой *Q* и инверсный  $\bar{Q}$ .

Работу синхронного *RS*-триггера рассмотрим по таблице переходов (таблица 13.4). В таблице индекс *n* обозначает состояние текущего такта, а *n* – 1 – состояние предыдущего такта.

Таблица 13.4

<i>C</i>	<i>S</i>	<i>R</i>	$Q_n$	$\bar{Q}_n$	Режим
1	1	0	1	0	Установка
1	0	1	0	1	Сброс
1	0	0	0 ( $Q_{n-1}$ )	1 ( $Q_{n-1}$ )	Хранение
0	x	x	0 ( $Q_{n-1}$ )	1 $Q_{n-1}$	Хранение

Синхронный *RS*-триггер построен на ЛЭ И-НЕ, следовательно, на входах будем обращать внимание на активный уровень лог.0, так как его присутствие на любом из входов ЛЭ И-НЕ однозначно определяет на его выходе лог.1.

При наборе входных сигналов  $C = 1, S = 1, R = 0$  лог.0 на входе ЛЭ *DD1.2* устанавливает на его выходе сигнал лог.1, которая далее ничего не определяет. Две лог.1 на входах ЛЭ *DD1.1* устанавливает на его выходе сигнал лог.0, который в свою очередь устанавливает на выходе  $Q$  ЛЭ *DD1.3* сигнал лог.1. Две лог.1 с выхода  $Q$  и ЛЭ *DD1.2* устанавливают на выходе  $\bar{Q}$  ЛЭ *DD1.4* сигнал лог.0. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 1, \bar{Q} = 0$  произошла установка (запись) триггера. В триггер записана лог.1, установленная на выходе  $Q$ .

При наборе входных сигналов  $C = 1, S = 0, R = 1$  лог.0 на входе ЛЭ *DD1.1* устанавливает на его выходе сигнал лог.1, которая далее ничего не определяет. Две лог.1 на входах ЛЭ *DD1.2* устанавливает на его выходе сигнал лог.0, который в свою очередь устанавливает на выходе  $Q$  ЛЭ *DD1.4* сигнал лог.1. Две лог.1 с выхода  $\bar{Q}$  и ЛЭ *DD1.1* устанавливают на выходе  $Q$  ЛЭ *DD1.3* сигнал лог.0. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 0, \bar{Q} = 1$  произошел сброс триггера. Информация из триггера удалена, так как на выходе  $Q$  установлен лог.0.

При наборе входных сигналов  $C = 1, S = 0, R = 0$  на выходах ЛЭ *DD1.1* и *DD1.2* устанавливаются лог.1, которые для асинхронного *RS*-триггера на ЛЭ *DD1.3* и *DD1.4* определяют его режим хранения предыдущей информации. Таким образом, состояние выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$  триггера не изменилось, следовательно, это режим хранения.

Как только сигнал на синхронизирующем входе  $C$  установится в лог.0, то, вне зависимости от сигналов на информационных входах  $S$  и  $R$  (х – любое состояние), на выходах ЛЭ *DD1.1* и *DD1.2* устанавливаются лог.1 и триггер переходит в режим хранения.

Набор входных сигналов  $C = 1, S = 1, R = 1$  для данного триггера по известным причинам запрещен и в таблице 13.4 не указан.

Из анализа таблицы 13.4 следует, что при подаче на вход  $C$  лог.1 разрешается работа триггера, при лог.0 триггер переходит в режим хранения. При подаче на вход  $S$  лог.1 происходит установка триггера, а при подаче лог.1 на вход  $R$  – его сброс. Следовательно, данный *RS*-триггер управляется

лог.1 как по информационным входам  $S$  и  $R$ , так и по входу синхронизации  $C$ , то есть активным логическим уровнем является лог.1.

На рисунке 13.3, б приведено условное обозначение синхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ. Наличие дополнительного синхронизирующего входа  $C$  говорит о том, что данный триггер синхронный. В обозначении входы триггера  $C$ ,  $S$  и  $R$  прямые, так как нет обозначения инверсий. Это указывает на то, что данный  $RS$ -триггер управляется лог.1 по всем входам.

На рисунке 13.3, в приведены временные диаграммы, поясняющие работу синхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ.

Особенностью построения временных диаграмм работы синхронного  $RS$ -триггера заключается в том, что анализ набора входных сигналов необходимо производить только при наличии на синхронизирующем входе  $C$  активного уровня лог.1, так как триггер может переключиться только в течение этих интервалов времени. Анализируя наборы входных сигналов  $C$ ,  $S$  и  $R$ , состояния выходов  $Q$ ,  $\bar{Q}$  определяются по таблице 13.4.

Рассмотренный синхронный  $RS$ -триггер является триггером со статическим управлением, так как он может переключаться в течение времени действия синхронизирующего импульса на входе  $C$ .

**$D$ -триггер на логических элементах И-НЕ.**  $D$ -триггер – это синхронный триггер, который задерживает поступающую на его вход информацию до прихода очередного синхронизирующего импульса.

Свое название  $D$ -триггер взял от обозначения его информационного  $D$ -входа.  $D$ -вход в свою очередь взял свое обозначение от первой буквы английского слова *Delay* – задержка.

На рисунке 13.4, а приведена схема синхронного  $D$ -триггера на ЛЭ И-НЕ. Схема триггера выполнена на двух ЛЭ И-НЕ с перекрестными обратными связями.

Схема  $D$ -триггера выполнена на четырех ЛЭ И-НЕ. ЛЭ  $DD1.1$  и  $DD1.2$  являются входной логикой (схемой управления), а схема на ЛЭ  $DD1.3$  и  $DD1.4$  представляет собой асинхронный  $RS$ -триггер.

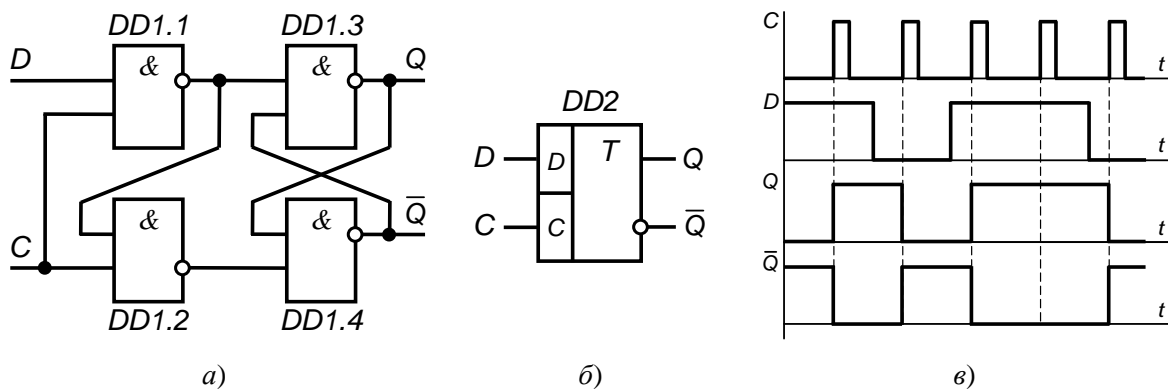


Рисунок 13.4 –  $D$ -триггер на ЛЭ И-НЕ:

$a$  – схема;  $b$  – условное обозначение;  $c$  – временные диаграммы работы

$D$ -триггер имеет один информационный вход  $D$ , синхронизирующий вход  $C$  и два выхода – прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ .

Работу  $D$ -триггера рассмотрим по таблице переходов (таблица 13.5). В таблице 13.5, как обычно, индекс  $n$  обозначает состояние текущего такта, а  $n - 1$  – состояние предыдущего такта.

Таблица 13.5

$C$	$D$	$Q_n$	$\bar{Q}_n$	Режим
1	1	1	0	Установка
1	0	0	1	Сброс
0	x	0 ( $Q_{n-1}$ )	1 ( $\bar{Q}_{n-1}$ )	Хранение

При наборе входных сигналов  $C = 1$ ,  $D = 1$  две лог.1 на входах ЛЭ DD1.1 устанавливает на его выходе сигнал лог.0, который в свою очередь устанавливает сигнал лог.1. на выходе  $Q$  ЛЭ DD1.3 и на выходе ЛЭ DD1.2. Две лог.1 с выхода  $Q$  и ЛЭ DD1.2 устанавливают на выходе  $\bar{Q}$  ЛЭ DD1.4 сигнал лог.0. Таким образом, в соответствие с состоянием выходов  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 0$  произошла установка (запись) триггера. В триггер записана лог.1, установленная на выходе  $Q$ .

При наборе входных сигналов  $C = 1$ ,  $D = 0$  лог.0 на входе ЛЭ DD1.1 устанавливает на его выходе сигнал лог.1, которая далее ничего не определяет. Две лог.1 на входах ЛЭ DD1.2 устанавливает на его выходе сигнал лог.0, который в свою очередь устанавливает на выходе  $Q$  ЛЭ DD1.4 сигнал лог.1. Две лог.1 с выхода  $\bar{Q}$  и ЛЭ DD1.1 устанавливают на выходе  $Q$

ЛЭ DD1.3 сигнал лог.0. Таким образом, в соответствии с состоянием выходов  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$  произошел сброс триггера. Информация из триггера удалена, так как на выходе  $Q$  установлен лог.0.

Как только сигнал на синхронизирующем входе  $C$  установится в лог.0, то, вне зависимости от сигнала на информационном входе  $D$  (х – любое состояние), на выходах ЛЭ DD1.1 и DD1.2 устанавливаются лог.1 и триггер переходит в режим хранения.

На рисунке 13.4, б приведено условное обозначение  $D$ -триггера на ЛЭ И-НЕ. Наличие дополнительного синхронизирующего входа  $C$  говорит о том, что данный триггер синхронный. В обозначении входы триггера  $C$  и  $D$  прямые, так как нет обозначения инверсий. Это указывает на то, что данный  $D$ -триггер управляется лог.1 по обоим входам.

На рисунке 13.4, в приведены временные диаграммы, поясняющие работу  $D$ -триггера на ЛЭ И-НЕ.

**$T$ -триггер.** Внутренняя структура  $T$ -триггера достаточно сложна, поэтому приведем на рисунке 13.5, а только его условное обозначение на схемах.

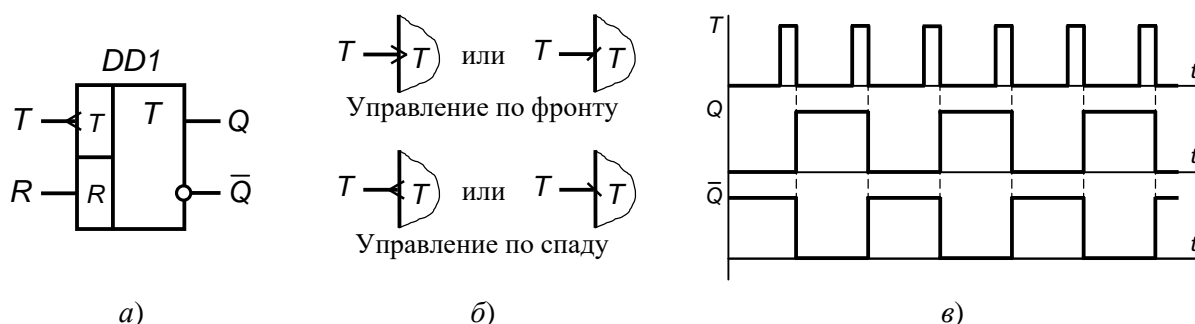


Рисунок 13.5 –  $T$ -триггер: а – условное обозначение;

б – обозначение динамических входов; в – временные диаграммы работы

$T$ -триггер имеет один информационный вход  $T$  и два выхода – прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ . Для установки в нулевое состояние (сброса)  $T$ -триггер обычно дополняется асинхронным входом предварительной установки  $R$ .

Входы предварительной установки  $S$  и  $R$ , если они имеются, имеют приоритет (преимущество) над всеми остальными входами.

$T$ -триггер (или счетный триггер) является триггером с динамическим управлением и переключается в результате воздействия на его информационный вход  $T$  каждого очередного активного сигнала.

Активным сигналом у триггеров с динамическим управлением может быть либо фронт, либо спад входного сигнала. На рисунке 13.5, б приведены

варианты (как было показано выше) условных обозначений динамических входов.

Из условного обозначения  $T$ -триггера (рисунок 13.5,  $a$ ) видно, что приведенный  $T$ -триггер с динамическим управлением по спаду, сброс триггера производится лог.1 на входе  $R$ .

Работа  $T$ -триггера заключается в следующем.

При активном уровне лог.1. на входе  $R$   $T$ -триггер находится в сброшенном состоянии и не чувствует сигналы на его информационном входе  $T$ . При этом состояния выходов соответствуют  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$ .

При лог.0. на входе  $R$   $T$ -триггер переключается при воздействии на его информационный вход  $T$  каждого очередного спада входного сигнала.

На рисунке 13.5,  $b$  приведены временные диаграммы, поясняющие работу  $T$ -триггера.

Из временных диаграмм (рисунок 13.5,  $b$ ) видно, что частота выходных импульсов  $T$ -триггера в два раза меньше частоты входных импульсов. Поэтому  $T$ -триггер широко используется в делителях частоты и цифровых счетчиках импульсов.

**$JK$ -триггер.**  $JK$ -триггеры относятся к универсальным триггерам, так как обладают следующими свойствами:

- 1) они не имеют запрещенных комбинаций входных сигналов;
- 2) посредством определенного соединения их выводов они легко превращаются в триггеры других типов;
- 3) эти триггеры с равным успехом могут быть использованы в регистрах, счётчиках, делителях частоты и других цифровых узлах.

Схемная реализация  $JK$ -триггера достаточно сложна, поэтому приведем только его условное обозначение на схемах (рисунок 13.6,  $a$ ).

$JK$ -триггер (рисунок 13.6,  $a$ ) имеет два информационных входа  $J$  и  $K$ , синхронизирующий вход  $C$ , два инверсных входа предварительной установки  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  и два выхода – прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ . Вход  $C$  динамический с управлением по спаду.

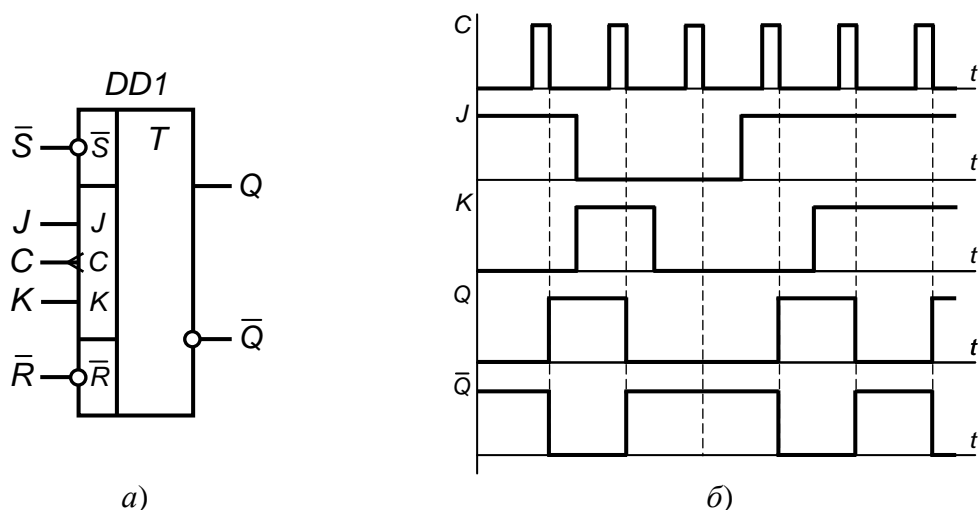


Рисунок 13.6 –  $JK$ -триггер:  $a$  – условное обозначение;  
 $b$  – временные диаграммы работы

Из условного обозначения (рисунок 13.6,  $a$ ) видно, что это  $JK$ -триггер, так как в наличии входы  $J$  и  $K$ , причем прямые, поэтому триггер управляется лог.1. Наличие и обозначение входа  $C$  говорит о том, что это синхронный триггер с динамическим управлением. Обозначение инверсных входов предварительной установки  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  (кружочки на входах) свидетельствует о том, что предварительная установка производится лог.0.

Как уже отмечалось, входы предварительной установки  $S$  и  $R$  имеют приоритет над всеми остальными входами, поэтому рассмотрение работы  $JK$ -триггера необходимо начинать с них.

При наборе сигналов  $\bar{S} = 0$  (активный уровень),  $\bar{R} = 1$  (неактивный уровень) происходит установка триггера, при этом на выходах будем иметь  $Q = 1$ ,  $\bar{Q} = 0$ .

При наборе сигналов  $\bar{S} = 1$  (неактивный уровень),  $\bar{R} = 0$  (активный уровень) происходит сброс триггера, при этом на выходах будем иметь  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$ .

При наборе сигналов  $\bar{S} = 1$ ,  $\bar{R} = 1$  (неактивные уровни) входы  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  не оказывают влияния на работу триггера.

Работа  $JK$ -триггера заключается в следующем.

При всех комбинациях входных сигналов, кроме одной  $J = 1$ ,  $K = 1$ ,  $JK$ -триггер работает как синхронный  $RS$ -триггер с динамическим управлением, причем вход  $J$  выполняет роль входа  $S$ , а вход  $K$  выполняет роль входа  $R$ .

При комбинации входных сигналов  $J = 1$ ,  $K = 1$   $JK$ -триггер работает как  $T$ -

триггер, то есть его переключение происходит при приходе каждого спада синхронизирующего импульса на входе *C*.

На рисунке 13.6, *б* представлены временные диаграммы, поясняющие работу *JK*-триггера.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Изучите теоретический материал, касающийся основных ЛЭ и простейших комбинационных устройств, а также триггеров.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

#### 4.1. Исследование логических элементов

##### 4.1.1. Запустите программу EWB.

4.1.2. С помощью программы EWB соберите поочередно одну из схем лабораторной установки (рисунок 13.7) и установите требуемые параметры элементов схемы.

4.1.3. Включите лабораторную установку. Подайте на входы исследуемого логического элемента с помощью переключателей *S1* и *S2* наборы входных сигналов ЛЭ согласно таблице 13.6. По светодиодным индикаторам *HL1-HL3* наблюдайте состояния выхода ЛЭ в соответствии с состояниями его входов. Следует отметить, что в EWB ЛЭ ИЛИ обозначается символом « $\geq 1$ », а не «1» как принято. Результаты наблюдений запишите в таблицу 13.6. Сравните полученные результаты с теоретическими.

Таблица 13.6

Входы X		Выход Y					
$X_1$	$X_2$	И	ИЛИ	И-НЕ	ИЛИ-НЕ	ЭКВ-ТЬ	ИСКЛ. ИЛИ

#### 4.2. Исследование RS- триггеров

4.2.1. С помощью программы EWB соберите схему асинхронного *RS*-триггера на ЛЭ ИЛИ-НЕ (рисунок 13.8) и установите требуемые параметры элементов схемы.



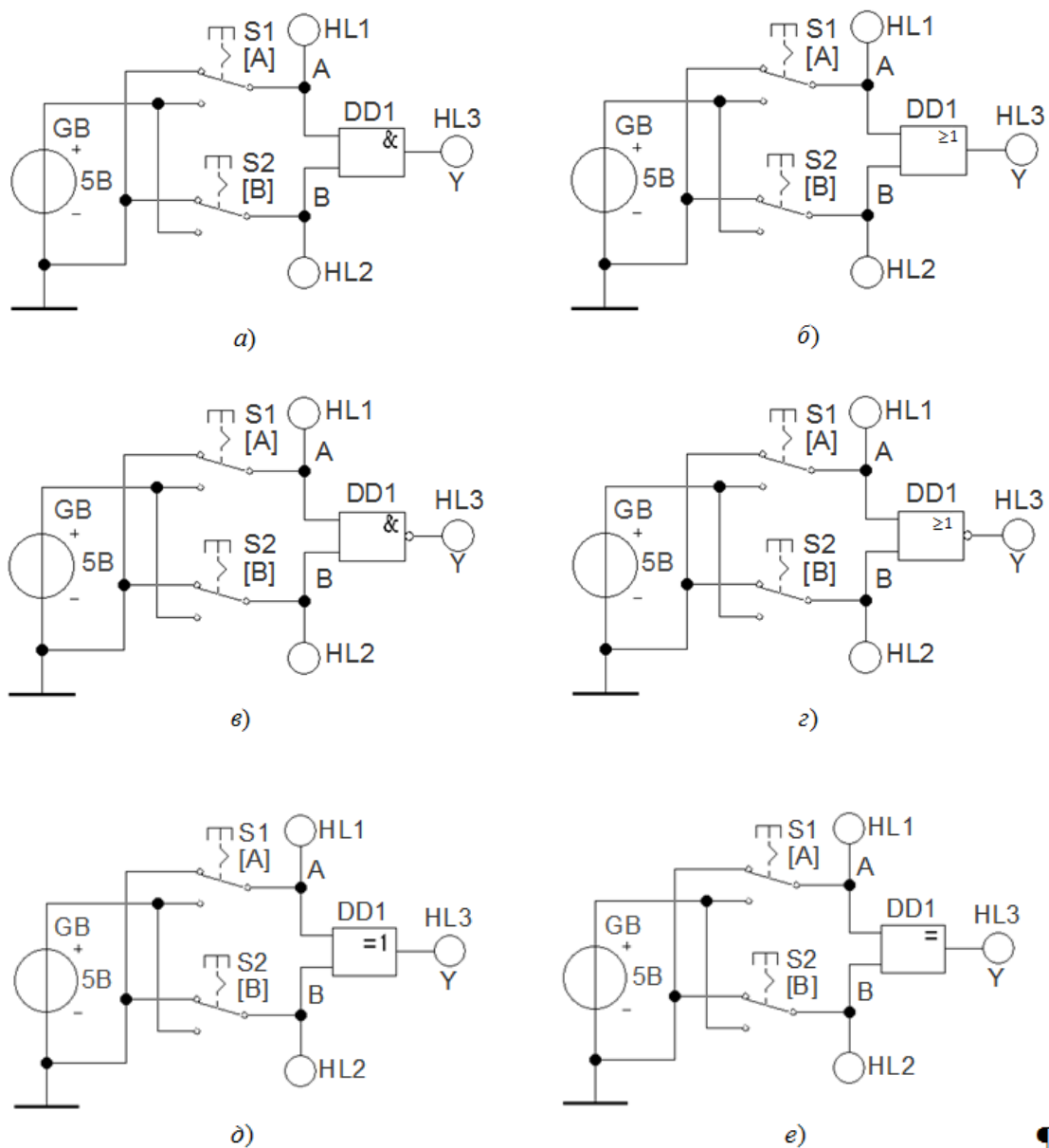


Рисунок 13.7 – Схема лабораторной установки для исследования логических элементов

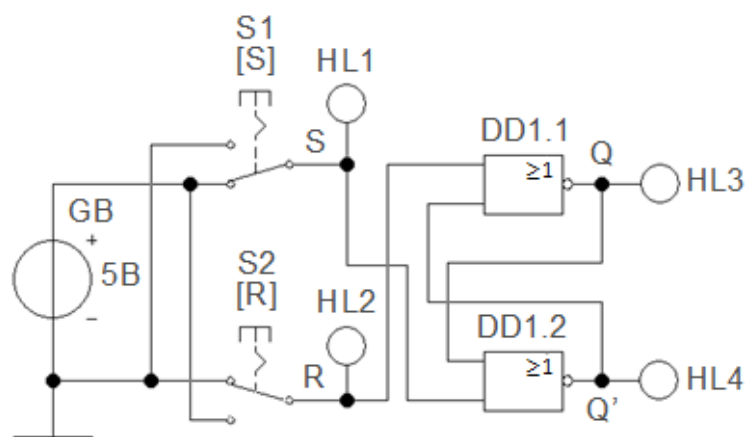


Рисунок 13.8 – Схема лабораторной установки для исследования асинхронного RS-триггера на ЛЭ ИЛИ-НЕ

4.2.2. Включите лабораторную установку. Подайте на входы RS-триггера с помощью переключателей S1, S2 последовательно наборы входных сигналов S и R согласно таблице 13.7. По светодиодным индикаторам HL1, HL2 контролируйте состояния входов S и R, а по светодиодным индикаторам HL3, HL4 наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$  RS-триггера в соответствии с состояниями его входов. Полученные результаты занесите в таблицу переходов (таблица 13.7) и сравните их с теоретическими.

Таблица 13.7

Входы		Выходы	
$S$	$R$	$Q_n$	$\overline{Q}_n$
1	0		
0	1		
0	0		

4.2.3. По результатам таблицы 13.7 изобразите в масштабе временные диаграммы работы асинхронного RS-триггера на ЛЭ ИЛИ-НЕ

4.2.4. С помощью программы EWB соберите схему асинхронного RS-триггера на ЛЭ И-НЕ (рисунок 13.9) и установите требуемые параметры элементов схемы.

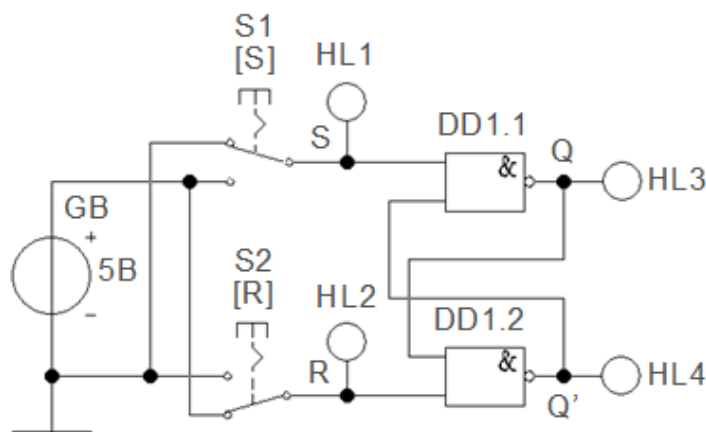


Рисунок 13.9 – Схема лабораторной установки для исследования асинхронного RS-триггера на ЛЭ И-НЕ

4.2.5. Включите лабораторную установку. Подайте на входы RS-триггера с помощью переключателей S1, S2 последовательно наборы входных сигналов S и R согласно таблице 13.8. По светодиодным индикаторам HL1, HL2 контролируйте состояния входов S и R, а по светодиодным индикаторам HL3,

HL4 наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$   $RS$ -триггера в соответствии с состояниями его входов. Полученные результаты запишите в таблицу переходов (таблица 13.8) и сравните их с теоретическими.

Таблица 13.8

Входы		Выходы	
$S$	$R$	$Q_n$	$\bar{Q}_n$
1	0		
0	1		
1	1		

4.2.6. По результатам таблицы 13.8 изобразите в масштабе временные диаграммы работы асинхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ

4.2.7. С помощью программы EWB соберите схему синхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ (рисунок 13.10) и установите требуемые параметры элементов схемы.

4.2.8. Включите лабораторную установку. Подайте на входы  $RS$ -триггера с помощью переключателей  $S1$ - $S3$  последовательно наборы входных сигналов  $S$ ,  $R$  и  $C$  согласно таблице 13.9. Последовательность действий следующая. При  $C = 0$  установите набор входных сигналов  $S = 0$  и  $R = 1$  и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S2$ , затем верните его в исходное состояние ( $C = 0$ ) и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . При  $C = 0$  установите следующий набор входных сигналов  $S = 1$  и  $R = 0$  и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S2$ , затем верните его в исходное состояние ( $C = 0$ ) и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . И так далее.

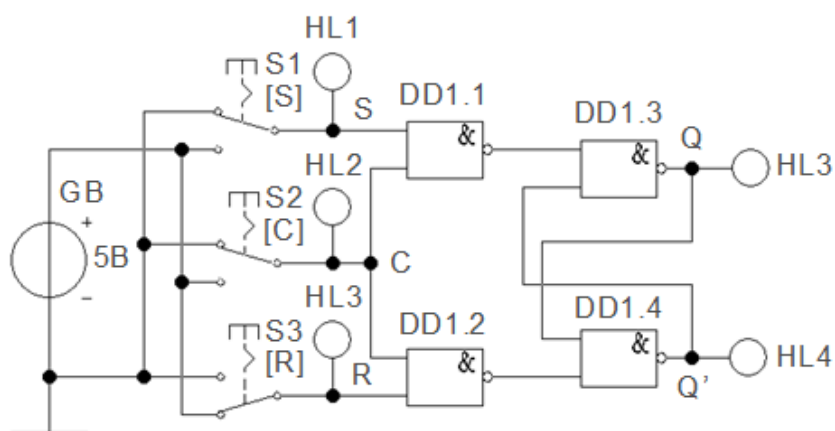


Рисунок 13.10 – Схема лабораторной установки для исследования синхронного  $RS$ -триггера на ЛЭ И-НЕ

4.2.9. По светодиодным индикаторам HL1-HL3 контролируйте состояния входов  $S$ ,  $R$  и  $C$ , а по светодиодным индикаторам HL3, HL4 наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$  RS-триггера в соответствии с состояниями его входов. Полученные результаты запишите в таблицу переходов (таблица 13.9) и сравните их с теоретическими.

Таблица 13.9

Входы			Выходы	
$C$	$S$	$R$	$Q_n$	$\overline{Q}_n$
0	0	1		
1	0	1		
0	1	0		
1	1	0		
0	0	0		
1	0	0		

4.2.10. По результатам таблицы 13.9 изобразите в масштабе временные диаграммы работы синхронного RS-триггера.

#### 4.3. Исследование D-триггера

4.3.1. С помощью программы EWB соберите схему синхронного D-триггера со статическим управлением на ЛЭ И-НЕ (рисунок 13.11) и установите требуемые параметры элементов схемы.

4.3.2. Включите лабораторную установку. Подайте на входы D-триггера с помощью переключателей  $S1$ ,  $S2$  последовательно наборы входных сигналов  $D$  и  $C$  согласно таблице 13.10. Последовательность действий следующая. При  $C = 0$  установите  $D = 1$  и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S2$ , затем верните его в исходное состояние ( $C = 0$ ) и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$ . При  $C = 0$  установите  $D = 0$  и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S2$ , затем верните его в исходное состояние ( $C = 0$ ) и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S2$  и, изменяя состояние входа  $D$  запишите состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$ .

4.3.3. По светодиодным индикаторам HL1, HL2 контролируйте состояния входов  $D$  и  $C$ , а по светодиодным индикаторам HL3, HL4 наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$  D-триггера в соответствии со состояниями его входов. Полученные результаты запишите в таблицу переходов (таблица 13.10) и сравните их с теоретическими.

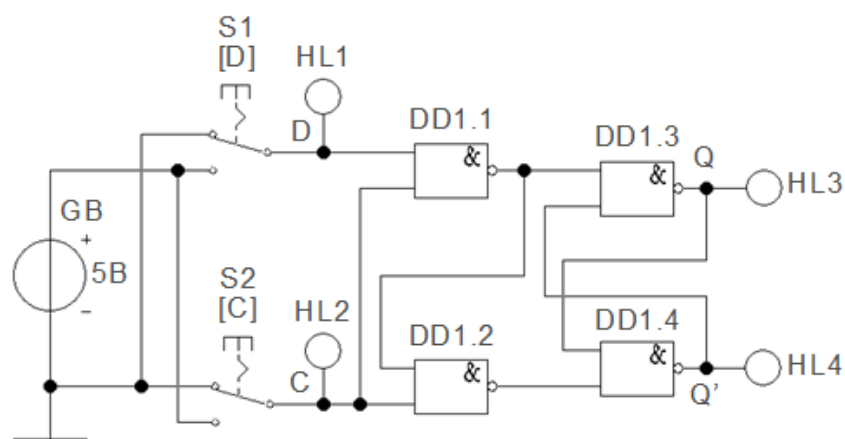


Рисунок 13.11 – Схема лабораторной установки для исследования синхронного D-триггера на ЛЭ И-НЕ

Таблица 13.10

Входы		Выходы	
$C$	$D$	$Q_n$	$\overline{Q_n}$
0	1		
1	1		
0	0		
1	0		
1	1		
1	0		

4.3.4. По результатам таблицы 13.10 изобразите в масштабе временные диаграммы работы синхронного  $D$ -триггера со статическим управлением.

4.3.5. С помощью программы EWB соберите схему лабораторной установки для исследования синхронного  $D$ -триггера с динамическим управлением (рисунок 13.12) и установите требуемые параметры элементов схемы.

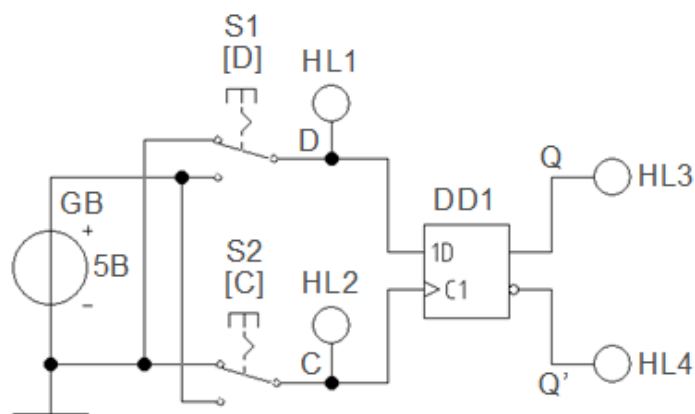


Рисунок 13.12 – Схема лабораторной установки для исследования синхронного  $D$ -триггера с динамическим управлением

4.3.7. Включите лабораторную установку. Подайте на входы  $D$ -триггера с помощью переключателей  $S1$ ,  $S2$  последовательно наборы входных сигналов  $D$  и  $C$  согласно таблице 13.11. Последовательность действий аналогична, выше, изложенной в п. 4.3.2. Знак  $\uparrow$  – означает фронт входного импульса.

4.3.8. По светодиодным индикаторам HL1, HL2 контролируйте состояния входов  $D$  и  $C$ , а по светодиодным индикаторам HL3, HL4 наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$   $D$ -триггера в соответствии с состояниями его входов. Полученные результаты запишите в таблицу переходов (таблица 13.11) и сравните их с теоретическими.

Таблица 13.11

Входы		Выходы	
$C$	$D$	$Q_n$	$\bar{Q}_n$
0	1		
$\uparrow$	1		
0	0		
$\uparrow$	0		
1	1		
1	0		

4.3.9. По результатам таблицы 13.11 изобразите в масштабе временные диаграммы работы синхронного  $D$ -триггера с динамическим управлением.

#### 4.4. Исследование $T$ -триггера

4.4.1. С помощью программы EWB соберите схему для исследования  $T$ -триггера (рисунок 13.13, а) и установите требуемые параметры элементов схемы.

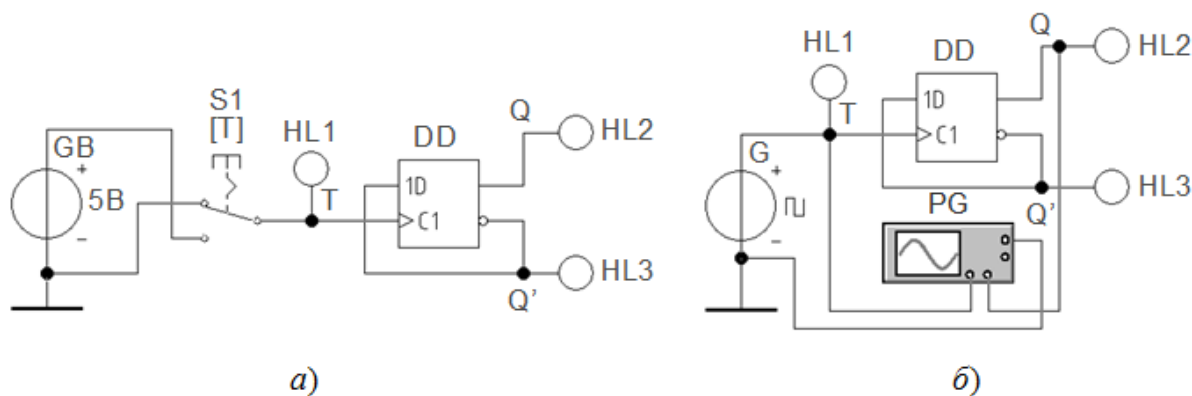


Рисунок 13.13 – Схемы лабораторной установки для исследования  $T$ -триггера с управлением по фронту

4.4.2. Включите лабораторную установку. Подайте на вход  $T$ -триггера с помощью переключателя  $S1$  входные сигналы  $T$  согласно таблице 13.12.

Таблица 13.12

$T$	$Q_n$	$\overline{Q}_n$
0		
$\frac{1}{2}$		
0		
$\frac{1}{2}$		
0		
$\frac{1}{2}$		

4.4.3. По светодиодным индикаторам  $HL1$  контролируйте состояния входа  $T$ , а по светодиодным индикаторам  $HL2$ ,  $HL3$  наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$   $T$ -триггера в соответствии с состояниями его входов. Полученные результаты занесите в таблицу переходов (таблица 13.12) и сравните их с теоретическими.

4.4.5. С помощью программы EWB соберите схему для исследования  $T$ -триггера (рисунок 13.13, б) и установите требуемые параметры элементов схемы.

4.4.6. Установите следующие параметры генератора прямоугольных импульсов  $G$ : частоту **Frequency** = 1 Гц; коэффициент заполнения **Duty cycle** = 50%; напряжение **Voltage** = 5 В.

4.4.7. Включите лабораторную установку и наблюдайте на экране осциллографа  $PG$  временные диаграммы входного и выходного сигналов.

4.4.8. Сделайте копию экрана, в момент полного заполнения экрана осциллографа исследуемыми сигналами, нажав клавишу *Print Screen* на клавиатуре.

#### 4.5. Исследование $JK$ -триггера

4.5.1. С помощью программы EWB соберите схему  $JK$ -триггера (рисунок 13.14) и установите требуемые параметры элементов схемы.

4.5.2. Включите лабораторную установку. Подайте на входы  $JK$ -триггера с помощью переключателей  $S1$ - $S5$  последовательно наборы входных сигналов  $S$ ,  $R$ ,  $J$ ,  $K$  и  $C$  согласно таблице 13.13.

Последовательность действий следующая. При  $C = 0$  установите набор сигналов предварительной установки  $S = 0$  и  $R = 1$ , информационных сигналов  $J = 1$  и  $K = 0$  и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S3$ , затем верните его в исходное состояние ( $C = 0$ )

и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . При  $C = 0$  установите следующий набор сигналов предварительной установки  $S = 1$  и  $R = 0$ , информационных сигналов  $J = 0$  и  $K = 1$  и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . Установите  $C = 1$  с помощью переключателя  $S2$ , затем верните его в исходное состояние ( $C = 0$ ) и запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ . Затем При  $C = 0$  установите набор сигналов предварительной установки  $S = 1$  и  $R = 1$  и, подавая последовательно набора сигналов  $J, K$  и  $C$  согласно таблице 13.13 запишите состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ .

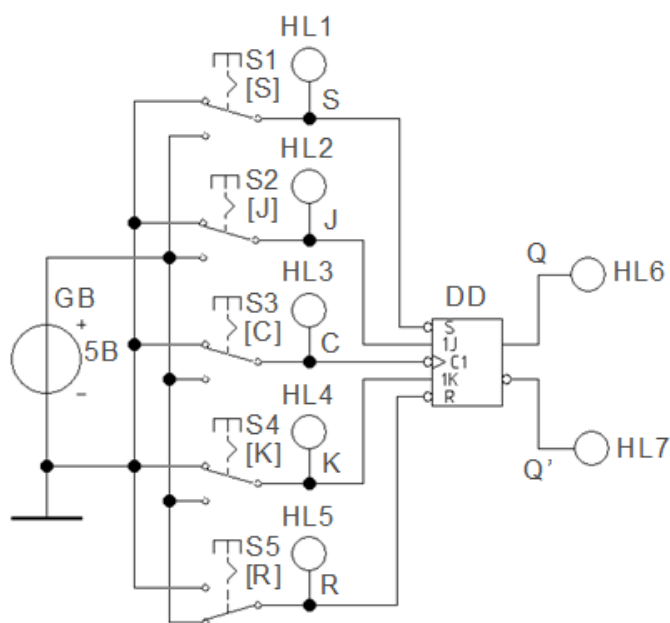


Рисунок 13.14 – Схемы лабораторной установки для исследования  $JK$ -триггера

Таблица 13.13

Входы					Выходы	
$S$	$R$	$C$	$J$	$K$	$Q_n$	$\bar{Q}_n$
0	1	0	1	0		
0	1	$\uparrow$	1	0		
1	0	0	0	1		
1	0	$\downarrow$	0	1		
1	1	0	1	0		
1	1	$\uparrow$	1	0		
1	1	0	0	1		
1	1	$\downarrow$	0	1		
1	1	0	0	0		
1	1	$\uparrow$	0	0		
1	1	0	1	1		
1	1	$\downarrow$	1	1		
1	1	$\uparrow$	1	1		
1	1	$\downarrow$	1	1		



4.5.3. По светодиодным индикаторам HL1-HL5 контролируйте состояния входов  $S$ ,  $R$ ,  $J$ ,  $K$  и  $C$ , а по светодиодным индикаторам HL6, HL7 наблюдайте состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ .  $JK$ -триггера в соответствии с состояниями его входов. Полученные результаты занесите в таблицу переходов (таблица 13.13) и сравните их с теоретическими.

4.5.4. Выключите установку. Запустите программу **Screen Capture** и скопируйте изображение собранной схемы, нажав клавишу *Print Screen* на клавиатуре.

4.5.5. По результатам таблицы 13.13 изобразите в масштабе временные диаграммы работы  $JK$ -триггера.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Что называется логическим элементом (ЛЭ)?
- 6.2. Приведите условные графические обозначения на схемах, исследуемых в работе ЛЭ.
- 6.3. Что называется таблицей истинности и сколько в ней строк?
- 6.4. Приведите таблицы истинности исследуемых в работе ЛЭ.
- 6.5. Какие ЛЭ получили наиболее широкое распространение на практике и почему?
- 6.6. Сформулируйте логику работы ЛЭ ИЛИ-НЕ и И-НЕ.
- 6.7. Сформулируйте закон Де-Моргана.
- 6.8. Реализовать предложенные ЛЭ в базисах ИЛИ-НЕ и И-НЕ.
- 6.9. Какой логический сигнал необходимо подать на один из входов ЛЭ ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, чтобы по второму входу он выполнял роль инвертора?
- 6.10. Построить схему комбинационного логического устройства по заданному логическому уравнению.
- 6.11. Что называется триггером?
- 6.12. Что такое асинхронный триггер?
- 6.13. Изобразите принципиальную схему асинхронного  $RS$ -триггера на логических элементах ИЛИ-НЕ.
- 6.14. Поясните работу асинхронного  $RS$ -триггера на логических элементах ИЛИ-НЕ с помощью таблицы переходов.
- 6.15. Какой набор входных сигналов является запрещенным для асинхронного  $RS$ -триггера на логических элементах ИЛИ-НЕ?

- 6.16. Изобразите принципиальную схему асинхронного *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ.
- 6.17. Поясните работу асинхронного *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ с помощью таблицы переходов.
- 6.18. Какой набор входных сигналов является запрещенным для асинхронного *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ?
- 6.19. Что такое синхронный триггер?
- 6.20. Изобразите принципиальную схему синхронного *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ.
- 6.21. Поясните работу синхронного *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ с помощью таблицы переходов.
- 6.22. Что такое *D*-триггер?
- 6.23. Изобразите принципиальную схему синхронного *D*-триггера на логических элементах И-НЕ.
- 6.24. Поясните работу синхронного *D*-триггера на логических элементах И-НЕ с помощью таблицы переходов.
- 6.25. Каковы особенности триггеров с динамическим управлением?
- 6.26. Что такое *T*-триггер?
- 6.27. Поясните работу *T*-триггера с помощью временных диаграмм.
- 6.28. Что такое *JK*-триггер?
- 6.29. Изобразите условное графическое обозначение *JK*-триггера.
- 6.30. Поясните работу *JK*-триггера.
- 6.31. Изобразите схемы *D*- и *T*-триггеров на основе *JK*-триггера.

Приложение А  
Форма титульного листа отчёта по лабораторной работе

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им.В.П.Грязева (ИВТС)  
Кафедра «Электротехника и электрооборудование»

ОТЧЕТ

лабораторная работа №\_\_

\_\_\_\_\_  
(Наименование работы)

по дисциплине \_\_\_\_\_  
(Наименование дисциплины)

Вариант № \_\_\_\_

Выполнил(а) студент(ка) уч. группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Фамилия, инициалы)

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

Оценка \_\_\_\_\_

Проверил \_\_\_\_\_  
(Фамилия, инициалы) (Подпись) (Дата)

Тула 2020

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Колесников Е.Б. Основы функционирования цифровой техники и интегральных микросхем. (Основы функционирования систем сервиса, часть II): учебное пособие / Е.Б. Колесников. – Новомосковск, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. – 293 с.
- 2 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
- 3 Водовозов А.М. Элементы систем автоматики: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.М. Водовозов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 224 с.
- 4 Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
- 5 Гершунский Б.С. Основы электроники. – М.: Высшая школа, 1977. – 344 с.
- 6 Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника / Под ред. В.А. Лабунцова. – М., Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
- 7 Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
- 8 Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвелт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с.
- 9 Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. – М.: Радио и связь, 1991. – 376 с.
- 10 Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1983. – 320 с.
- 11 Основы промышленной электроники / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков. – М.: Высшая школа, 1986. – 336 с.
- 12 Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт, 1998. – 400 с.
- 13 Ровдо А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 256 с.
- 14 Сергеев Б.С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания: Справочник. – М.: Радио и связь, 1992. – 224 с.

- 15 Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных интегральных схем. – М.: Мир, 1985. – 572 с.
- 16 Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1990. – 496 с.
- 17 Электрические измерения / Байда Л.И., Добротворский Н.С., Душин Е.М. и др.: Под ред. А.В. Фрумке и Е.М. Душина. – Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1980. – 392 с.
- 18 Электрические измерения / Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, В.С. Попов и др.: Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 392 с.
- 19 Электротехника и электроника. В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.
- 20 Миловзоров О.В. Электроника: учебник для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – М.: Высш. шк., 2004. – 288 с.

Учебное издание

ШПРЕХЕР Дмитрий Маркович  
СУРКОВ Виктор Васильевич  
КОЛЕСНИКОВ Евгений Борисович  
ПОЛЕВОЙ Валерий Евгеньевич

ЭЛЕКТРОНИКА

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СХЕМЫ

Виртуальный лабораторный практикум

Авторское редактирование

Компьютерная вёрстка Д.М. Шпрехер, Е.Б. Колесников

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 11.10.2018.

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 13,8.

Тираж 100 экз. Заказ 133

Тульский государственный университет  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95