

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ  
ПО РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Учебно-методическое пособие**

Махачкала  
Издательство ДГУ  
2025

Физический практикум по радиофизике и электронике: учебно-методическое пособие / сост.: Ашурбеков Н. А., Закарьяева М. З. – Махачкала: Издательство ДГУ, 2025. – 99 с.

Данное учебно-методическое пособие содержит описания лабораторных работ по дисциплине «Основы радиофизики и электроники». В нем представлены два цикла лабораторных работ: цикл виртуальных цифровых лабораторных работ и цикл работ с выполнением реального физического эксперимента. Эти лабораторные работы направлены на углубление понимания студентами сущности и основ теории и практики радиофизики и электроники.

Пособие предназначено для студентов физического факультета университета, обучающихся по направлению 03.03.02 Физика.

Издается по решению редакционно-издательского совета Дагестанского государственного университета.

## Введение

Дисциплина «Основы радиофизики и электроники» представляет собой введение в фундаментальные принципы и концепции, лежащие в основе радиофизики и электроники. Она охватывает основные теоретические и практические аспекты работы с электронными компонентами и системами, включая их характеристики, принципы действия и применение.

В рамках лабораторного практикума по данной дисциплине рассматриваются практические аспекты принципов работы электронных устройств, а также методы анализа и синтеза радиотехнических систем. Студенты знакомятся с основными законами и уравнениями, описывающими процессы в электрических цепях, учатся применять эти знания для решения практических задач. Выполнение лабораторного практикума способствует формированию у студентов базовых знаний и навыков в области радиофизики и электроники, необходимых для дальнейшего освоения специализированных курсов и практической деятельности в этой сфере.

Все лабораторные работы по курсу «Основы радиофизики и электроники» разделены на два блока работ: экспериментальных и виртуальных. Дополнение экспериментальных работ циклом виртуальных работ позволяет формировать у студентов навыки работы с цифровыми платформами, выполнять расчеты и моделирование простейших радиотехнических цепей и устройств.

Экспериментальный блок работ разделен на два цикла. Работы первого цикла выполняются в основном на базе лабораторного стенда «Луч-1», в состав которого входят источники различных сигналов, блок коммутирующих плат, электроизмерительные приборы и осциллограф. Для выполнения на стенде нужной лабораторной работы надо снять блок коммутирующих плат, из блока ЗИП (запасных частей, инструментов и принадлежностей) достать необходимые для схемы детали, установить блок коммутирующих плат, плату для размещения рабочего набора съемных элементов, установить детали по схеме (соединение деталей по схеме произведено уже в блоке коммутирующих плат). Затем присоединить источник питания и приступить к выполнению работы.

Вторая часть лабораторного практикума проводится с использованием комплекта типового лабораторного оборудования «Основы радиоэлектроники». Основными компонентами данного комплекта являются: однофазный источник питания, блок генераторов напряжений с наборным полем, набор мини-блоков, блок мультиметров, ваттметр и осциллограф.

Описание каждой лабораторной работы содержит общие теоретические сведения, экспериментальную часть, порядок выполнения работ и контрольные вопросы.

Раздел «Общие сведения» содержит краткое введение в теорию соответствующего эксперимента. Для более глубокого изучения теоретического материала студентам следует обратиться к учебникам и компьютерным программам

тестирования для проверки усвоения теории и оценки готовности к лабораторно-практическим занятиям.

В разделе «Экспериментальная часть» сформулированы конкретные задачи эксперимента, представлены схемы электрических цепей, таблицы и графики для регистрации и представления экспериментальных данных. Лабораторные работы завершаются контрольными вопросами по рассматриваемой теме, на которые необходимо ответить для получения допуска к выполнению работы и её защиты.

Работы выполняются согласно графика в течение двух-четырех академических часов (в зависимости от сложности работы).

Перед началом лабораторных занятий студенты обязаны ознакомиться с правилами техники безопасности, порядком проведения лабораторных работ и методическими пособиями. Они должны изучить соответствующие разделы теоретического курса по лекциям и учебной литературе, а также содержание лабораторной работы и схему экспериментальной установки. Необходимо выполнить все подготовительные расчеты.

На занятии преподаватель опрашивает студентов, чтобы выяснить степень их подготовки и разъяснить непонятные моменты. Студенты, продемонстрировавшие удовлетворительные знания, допускаются к выполнению работы. Те, кто не подготовился, обязаны присутствовать в лаборатории и продолжать подготовку под наблюдением преподавателя.

Студенты, не сдавшие отчет по предыдущей лабораторной работе, также не допускаются к текущим занятиям, но должны сдать отчет в течение занятия. Студенты, пропустившие занятия без уважительных причин, выполняют лабораторные работы по отдельному графику в конце семестра.

После выполнения всех разделов лабораторной работы студенты заполняют таблицы экспериментальных данных, строят графики и выполняют необходимые расчеты. Все материалы предъявляются преподавателю на проверку, о чем делается запись в журнале.

К следующему занятию каждый студент должен подготовить и оформить индивидуальный отчет по выполненной работе. Отчет должен включать:

- название и цель работы;
- перечень используемых измерительных приборов с указанием их краткой технической характеристики;
- схемы исследуемых электрических цепей или сигналов;
- таблицы, методику и результаты расчетов, графики, диаграммы.

Если студент не защищает отчет, он возвращается на доработку, включая проведение некоторых экспериментов. Зачет по лабораторным работам проводится по накопительной системе после выполнения всех работ и сдачи отчетов.

## Блок экспериментальных работ

### Лабораторная работа № 1 «Изучение принципа работы осциллографа»

**Цель работы:** ознакомиться с устройством лабораторного стенда ЛУЧ-1, изучить генераторы тока и напряжения, освоить работу и принцип действия осциллографа.

#### Общие сведения

Лабораторный стенд ЛУЧ-1 можно консультативно разделить на следующие блоки: генераторные, измерительные, блок питания, блок коммутирующих плат, плата для хранения комплекта съемных элементов части ЗИП и плата для размещения рабочего набора съемных элементов (рис.1).

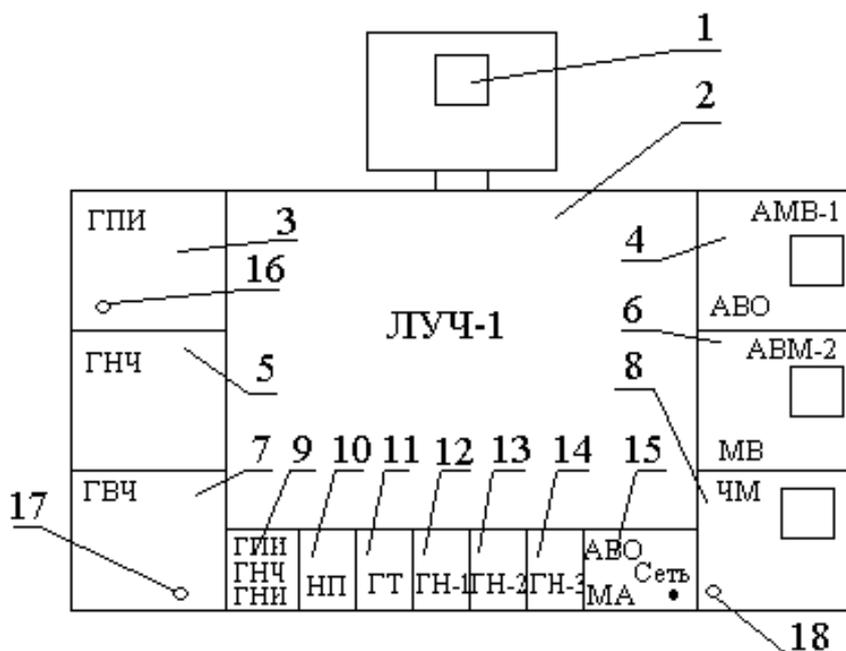


Рис. 1. Схема стенда ЛУЧ-1.

1. Осциллограф.
2. Коммутационная плата.
3. Генератор прямоугольных импульсов.
4. АМВ-1 (прибор для измерения постоянных токов и напряжений), АВО (прибор для измерения малых напряжений, токов и активных сопротивлений).
5. Генератор низкой частоты.
6. АМВ-2 (прибор для измерения постоянного тока и напряжения), МВ (прибор для измерения переменного напряжения).
7. Генератор высокой частоты.

8. *Частотомер и измеритель выходных напряжений блока питания и блока генератора.*

9. *Включатели ГПИ, ГНЧ, ГВЧ.*

10. *Источник переменного напряжения.*

11. *Источник тока ГТ.*

12. *Генератор напряжения.*

13. *Генератор напряжения (стабилизированный).*

14. *Генератор напряжения*

15. *Включатели АВО, МВ, ЧМ.*

16. *Ручка для регулировки длительности импульса.*

17. *Ручка для регулировки глубины модуляции.*

18. *Переключатель измерителя выхода.*

На верхней части установлена платформа с осциллографом.

Генераторная часть состоит из генератора прямоугольных импульсов (ГПИ), генератора низкой частоты (ГНЧ), генератора высокой частоты (ГВЧ).

ГПИ преобразователей полученное от ГНЧ синусоидальное напряжение в прямоугольные импульсы. Для установления необходимой частоты следования импульсов надо установить одинаковые диапазона частот на ГНЧ к ГВЧ. Длительность импульсов регулируется ручкой для регулировки длительности импульса (16). Частота может регулироваться плавно ручкой "частота" на ГНЧ в пределах поддиапазона.

ГВЧ состоит из двух высокочастотных генераторов: основного и вспомогательного (гетеродина). Оба генератора перестраиваются по диапазону так, что сохраняется частота 167 кГц, напряжение основного генератора модулируется по амплитуде сигналом с ГНЧ. Глубина модуляции регулируется потенциометром (17).

**Измерительный блок** подразделяется на три части:

1) **АВМ 1, АВО.** Прибор переключается при работе с выходом АВМ1 и АВО. АВМ 1 используют для измерения постоянных токов и напряжений, АВО предназначен для измерения малых напряжений, токов и активных сопротивлений.

2) **АВМ 2, МВ.** АВМ 2 используется для измерения постоянного тока и напряжения. МВ применяется для измерения переменного напряжения.

3) **ЧМ и ИВ.** При установке пакетного выключателя в положение ЧМ прибор предназначен для измерения частоты, причем в положении переключателя (18) в положении ГНЧ он показывает частоту ГНЧ, а в положении ИВ измеряет выходные напряжения ГНЧ, ГВЧ, ГПИ, ГНЭ, ИП, выходной ток ГТ. В БП размещены блоки питания генераторов и измерительных приборов, а также источники питания лабораторных работ: стабилизированный выпрямитель ГИЧ, генераторы напряжения 4П.

Для выполнения на стенде нужной лабораторной работы, надо снять блок коммутирующих плат, из блока ЗИП достать необходимые для схемы детали,

установить блок коммутирующих плат, плату для размещения рабочего набора съемных элементов, установить детали по схеме (соединение деталей по схеме произведено уже в блоке коммутирующих плат). Затем присоединить источник питания и приступить к выполнению работ.

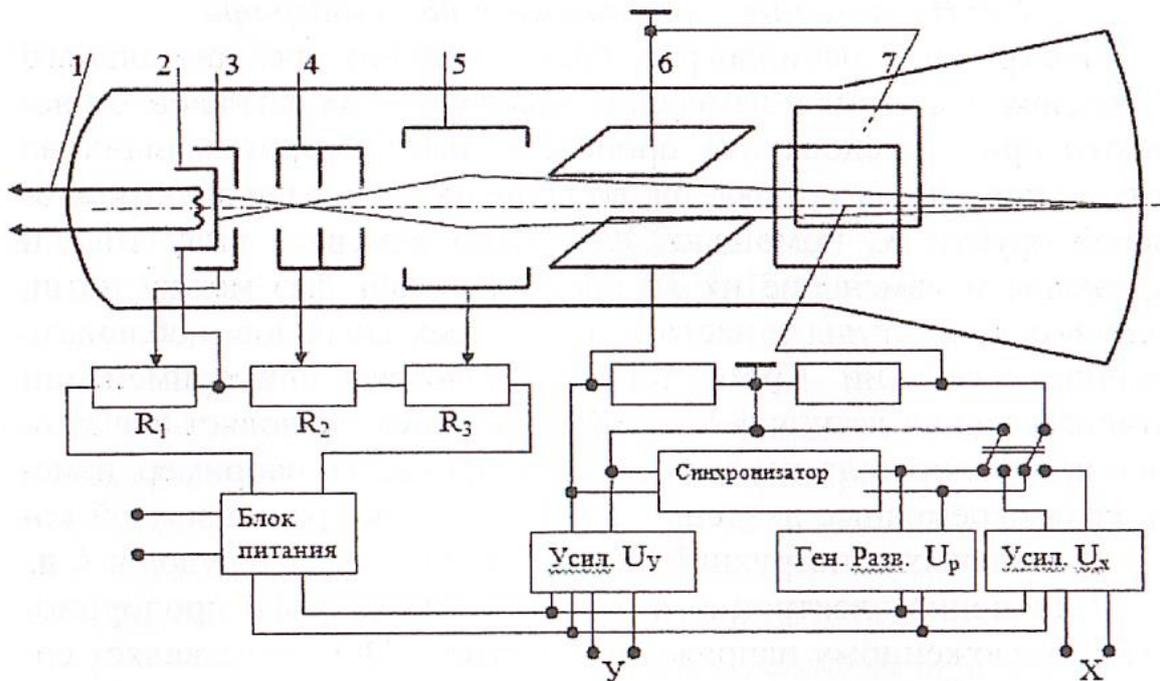
### ***Назначение электронного осциллографа***

Электронный осциллограф (ЭО) – прибор для визуального наблюдения, усиления и измерения электрических сигналов. Он незаменим при исследованиях процессов, быстро протекающих во времени: сигнал развертывается во времени на экране электронно-лучевой трубки. С помощью ЭО можно измерять силу тока и напряжение, а также их изменения во времени, сдвиг фаз между ними, сравнивать амплитуды и частоты различных сигналов, наблюдать сложение колебаний. Кроме того, осциллограф при применении соответствующих датчиков и преобразователей позволяет исследовать и контролировать неэлектрические процессы, например, измерять кратковременные давления, колебания и вибрации земной коры, строительных конструкций, корпусов двигателей и судов и т. д. Отклонение электронного луча в осциллографе пропорционально приложенному напряжению, поэтому ЭО представляет собой быстродействующий вольтметр. Так как масса электронов ничтожно мала, то электронный луч практически не обладает никакой инерцией даже для очень быстро изменяющихся напряжений, в чём и заключается основное достоинство ЭО.

### ***Электронно-лучевая трубка***

Основной частью ЭО является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) (рис. 2), которая состоит из стеклянного баллона, откачанного до глубокого вакуума ( $10^{-6}$  Тор), и ряда впаянных внутрь электродов.

Источником электронов служит катод 2, выполненный в виде цилиндра и подогреваемый нитью накала 1. Вокруг катода располагается модулятор (управляющий электрод) 3 – цилиндр с отверстием в днище. Модулятор служит для управления плотностью электронного потока и для предварительной его фокусировки; он имеет отрицательный потенциал относительно катода ( $-20 \div -70$  В), сжимает выходящий из катода электронный пучок. Изменяя этот потенциал, можно изменить количество электронов, проходящих через диафрагму первого анода 4, и, следовательно, регулировать интенсивность пятна на экране. Потенциал первого анода положителен относительно катода, а потенциал второго анода 5 положителен относительно первого анода. Управляющий электрод 3 и первый анод 4, а также первый анод 4 и второй анод 5 образуют две электронные линзы.



**Рис. 2.** Схема электронно-лучевой трубки (1 – нить накала, 2 – катод, 3 – цилиндр с отверстием, 4 – первый анод 5 – второй анод, 6 – горизонтальные отклоняющие пластины, 7 – вертикальные отклоняющие пластины)

Регулируя потенциалы анодов, можно изменять сходямость электронного луча и добиться наилучшей фокусировки пятна на экране. Потенциал второго анода относительно катода определяет также конечную скорость электронов в пучке. В типовых ЭЛТ потенциал первого анода составляет  $U_1 = +250 \div 500$  В, а потенциал второго анода меняется в пределах  $U_2 = +(1000 \div 2000)$  В. Система, состоящая из катода, модулятора и анодов, называется *электронным прожектором (электронной пушкой)* и служит, таким образом, для создания электронного луча, то есть тонкого потока электронов, летящих с большой скоростью от второго анода к люминесцентному экрану.

На пути электронного луча расположены под прямым углом друг к другу две пары отклоняющих пластин  $\Pi_x$  и  $\Pi_y$ , которые отклоняют пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Если на любую пару пластин подать напряжение, то электронный луч отклонится от первоначального направления, поскольку электроны будут притягиваться к пластине, заряженной положительно, и отталкиваться от пластины, заряженной отрицательно.

При разности потенциалов между катодом и вторым анодом  $U$  работа электрического поля по перемещению электрона от катода к аноду равна  $A = eU$  и тратится на сообщение электрону кинетической энергии

$$eU = mv^2/2, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m$  – его масса,  $v$  – скорость.

Из этой формулы следует, что электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) является практически безынерционным прибором. Действительно, при  $U \approx 10^3$  В величина  $eU$  порядка  $10^{-16}$  Дж, а масса электрона мала ( $m \approx 9,1 \times 10^{-31}$  кг), по-

этому скорость электрона  $v$  очень велика ( $\approx 10^7$  м/с). В результате электроны почти мгновенно достигают экрана.

Пусть под действием приложенного напряжения  $U_x$  электронный луч смещается на величину  $x$  в горизонтальном направлении, а под действием  $U_y$  – на величину  $y$  в вертикальном направлении. Величины

$$j_x = \frac{x}{U_x}, j_y = \frac{y}{U_y} \quad (2)$$

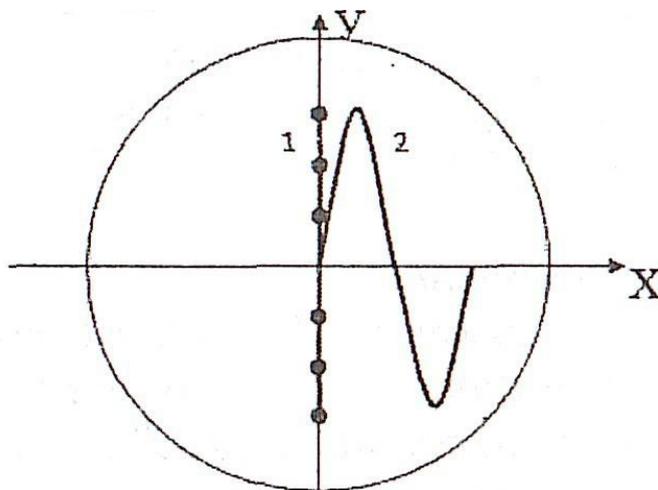
называются *чувствительностями трубки* к напряжению соответственно в направлениях  $x$  и  $y$ . Чувствительность к напряжению показывает величину отклонения электронного луча на экране на разность потенциалов на пластинах в 1 В.

### **Генератор развертки**

Если исследуемое переменное напряжение  $U_y = \sin \omega t$  подать на вертикально отклоняющие пластины, то световое пятно на экране будет совершать колебания. Вследствие световой инерции экрана и способности нашего глаза сохранять некоторое время полученное световое восприятие, на экране будет видна неподвижная вертикальная линия (рис. 3). Пусть одновременно напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах возрастает по линейному закону

$$U_x = k * t. \quad (3)$$

Под действием этого напряжения пятно на экране ЭЛТ будет двигаться слева направо. Результирующая траектория луча представляет зависимость исследуемого напряжения от времени (кривая 2 на рис. 3).



**Рис. 3.** Характерная траектория луча осциллографа

Если по истечении времени, равного периоду исследуемого колебания, напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах  $U_x$  скачком падает до нуля, то световое пятно скачком возвращается в исходное положение. Если  $U_x$  снова возрастает по линейному закону, на экране трубки вновь воспроизводится синусоида. Таким образом, для получения развертки исследуемого напряжения на X-пластины необходимо подать «пилообразное» напряжение (рис. 4),

причем период пилообразного напряжения должен совпадать с периодом исследуемого колебания.

Если период развертывающего пилообразного напряжения в целое число раз больше периода исследуемого напряжения, то на экране получится изображение нескольких полных колебаний. При неравенстве и не кратности периодов кривая на экране будет двигаться. Источником пилообразного напряжения является специальный релаксационный генератор, называемый *генератором развертки*. Частоту генератора пилообразного напряжения в осциллографах можно изменять в широких пределах. При ручной регулировке поддерживать строгое равенство частот напряжений  $U_x$  и  $U_y$  трудно, поэтому осциллографы снабжаются автоматическим устройством для синхронизации пилообразного напряжения с исследуемым.

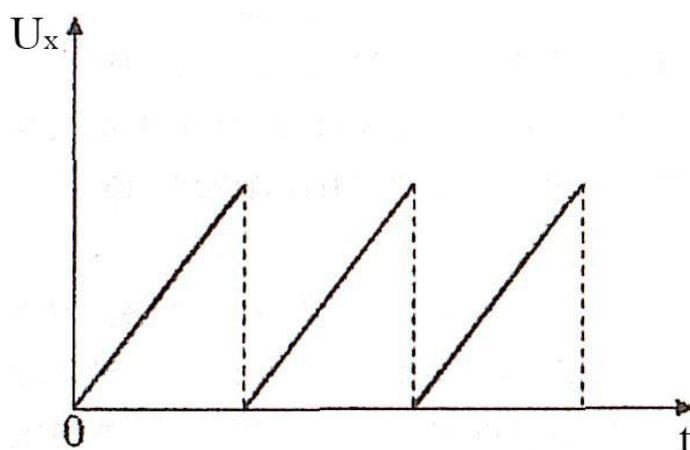


Рис. 4. Форма пилообразного напряжения

### **Блок-схема осциллографа**

На рис. 2 приведена блок-схема осциллографа. Основными узлами осциллографа являются *электронно-лучевая трубка, блок питания, усилитель горизонтального и вертикального отклонения, генератор развертки и синхронизирующее устройство*. Регулировка яркости электронного луча и его фокусировка осуществляются с помощью делителя напряжения, состоящего из сопротивлений, к которым подводится высокое напряжение постоянного тока от блока питания. Исследуемое напряжение  $U_y$  подается непосредственно либо через усилитель на вертикально отклоняющие пластины. На горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение  $U_x$  от какого-либо постороннего источника или пилообразное напряжение от генератора развертки. Под действием электрических полей, создаваемых отклоняющими пластинами 6 и 7, электронный луч вычерчивает на флюоресцирующем экране кривую, которая в первом случае является результатом сложения взаимно перпендикулярных колебаний  $U_x$  и  $U_y$ , а во втором — зависимостью величины исследуемого напряжения  $U_y$  от времени  $t$ :  $U_y = f(t)$ .

### Чувствительность ЭЛТ к напряжению

Чувствительность к напряжению (2) является одним из важных параметров ЭЛТ. Рассмотрим, от каких величин она зависит. Если  $U_y = 0$ , то электрон, обладающий при выходе из второго анода скоростью  $v_z$ , будет двигаться вдоль оси трубки  $Z$  и попадет на экран в точку  $A$  (рис. 5).

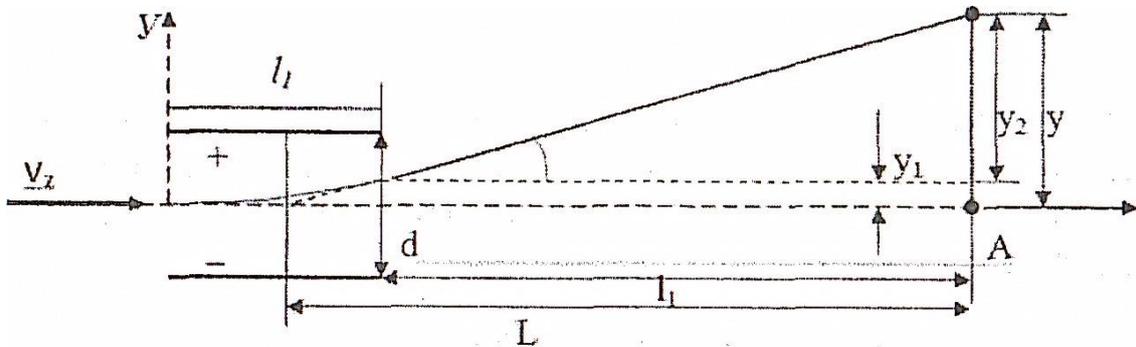


Рис. 5. Траектория движения электронов в ЭЛТ

При подведении к вертикально отклоняющим пластинам некоторой разности потенциалов  $U_y$  светящаяся точка на экране будет смещена в положение  $B$  на расстояние  $y$  под действием отклоняющего поля напряженностью  $E_y = U_y/d$ , где  $d$  – расстояние между пластинами (рис. 5).

Движение электрона в электрическом поле между пластинами является равномерным в направлении оси  $Z$  и равноускоренным в направлении оси  $Y$  и описывается уравнениями:  $z = v_z * t$  и  $y = a_y t^2/2$ .

За время пролета  $t_1$  электроном области поля пластин конденсатора, образованного  $y$ -пластинами, в направлении  $Z$  он сместится на расстояние, равное длине пластин  $l_1 = v_z t_1$ , а в направлении  $Y$  – на величину

$$y_1 = a_y t_1^2/2. \quad (4)$$

Ускорение  $a_y$  можно найти с помощью второго закона Ньютона

$$a_y = \frac{e * E_y}{m} = \frac{e * U_y}{m * d}. \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) найдем:

$$y_1 = \frac{e * U_y * l_1^2}{2 * m * d * v_z^2}. \quad (6)$$

С учетом выражения (1) для скорости электрона  $v_z$ , для отклонения электрона в направлении оси  $Y$  (при выходе из поля конденсатора) получим

$$y_1 = \frac{U_y * l_1^2}{4 * d * U_a}. \quad (7)$$

Согласно рис. 5, угол отклонения  $\alpha$  электронного луча от направления  $Z$  связан с другими параметрами трубки выражением

$$tg \alpha = \frac{y_1}{l_1} = y_2/l_2, \quad (8)$$

где  $l_2$  – расстояние от правого края пластин до экрана,  $y_2$  – смещение луча в направлении  $Y$  после выхода из конденсатора. Полное отклонение пятна на экране осциллографа, как следует из рис. 4, равно

$$y = y_1 + y_2 = y_1 + \frac{l_2 * y_1}{l_1/2} = 2 \frac{l_1/2 + l_2}{l_1} y_1 = 2 \frac{L}{l_1} y_1, \quad (9)$$

где  $L = l_1/2 + l_2$  – расстояние от середины пластин до экрана

Из (7) и (9) получим:

$$Y = \frac{l_1 L}{2d * U_\alpha} U_y. \quad (10)$$

Таким образом, смещение электронного луча пропорционально отклоняющему напряжению. Коэффициент пропорциональности

$$j_y = \frac{y}{U_y} = \frac{l_1 * L}{adU_\alpha} \quad (11)$$

есть чувствительность ЭЛТ к напряжению и зависит от линейных размеров трубки и анодного напряжения. Эту зависимость можно объяснить следующим образом: отклоняющее действие поля тем больше, чем больше длина пластин  $l_1$  (время пролета  $t$ ), меньше расстояние между пластинами  $d$  (больше напряженность поля, а следовательно, сила, действующая на электрон), больше расстояние до экрана  $L$ . С увеличением анодного напряжения  $U_\alpha$  увеличивается скорость электронов, что уменьшает продолжительность воздействия отклоняющего поля на электрон.

### **Экспериментальная часть**

**Задачи:** ознакомиться с назначением всех ручек управления источника синусоидального напряжения низкой (звуковой) частоты – звукового генератора (ЗГ) и электронного осциллографа (ЭО) по их кратким описаниям, прилагаемым к работе, и подготовить приборы к работе, включив их в сеть. После прогрева ЭО, действуя ручками смещения луча «X» и «Y», установить светящуюся точку в центре экрана и отрегулировать фокусировку луча и яркость свечения экрана.

**Задание 1. Определение максимальной чувствительности осциллографа.** Делитель напряжения ЗГ устанавливают на предел  $1 \div 10$  мВ, частоту выбирают в пределах  $50 \div 1000$  Гц, величину подаваемого переменного напряжения отсчитывают по шкале вольтметра, расположенного на лицевой панели ЗГ, ручку «усиление» ЭО переводят в положение максимального усиления. При выключенном генераторе развертки на экране появится вертикальная светящаяся линия, длину которой можно измерить по миллиметровой шкале на экране осциллографа. Так как вольтметр переменного тока измеряет эффективное значение напряжения  $U_{eff}$ , а осциллограф измеряет амплитудное значение того же напряжения  $U_{max}$  (где  $U_{eff} = \sqrt{2}U_{max}$ ), причем длина линии пропорциональна удвоенному значению амплитуды  $U_{max}$ . Чувствительность к напряжению ЭО

$$j_y = \frac{y}{U_y} = \frac{l_y}{2U_{y,eff}} = \frac{l_y}{2\sqrt{2}U_{y,eff}} \text{ (мм/В)}. \quad (12)$$

Измерения повторить 5–7 раз при различных напряжениях на пластинах. По формуле (12) рассчитать чувствительность ЭЛТ, результаты представить в виде таблицы 1. Зная чувствительность осциллографа по оси Y, его можно использовать как вольтметр, измеряющий амплитудные значения переменных напряжений.

**Таблица 1**

$U_{eff}, \text{В}$									
$l_y, \text{мм}$									
$j_y, \text{мм}$									

**Задание 2. Наблюдение на экране осциллографа синусоидального напряжения.**

1. Переключатель «Синхронизация» установить в положение «Внутр.».
2. На вертикально отклоняющие пластины через клеммы вертикального усилителя подать переменное синусоидально меняющееся напряжение.
3. Переключатель «Горизонтальное отклонение» поставить в положение «Непрерывная развертка», переключатель диапазонов развертки поставить на предел 20–200 Гц.
4. Ручкой «Частота плавно» добиться стабильного изображения, а ручкой «Синхронизация горизонтального усиления» устранить проскальзывание изображения, т. е. сделать его полностью неподвижным.
5. Меняя амплитуду напряжения, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины, или частоту колебаний, проследить за изменением кривой на экране, зарисовать вид кривых зависимостей  $U(t)$  для нескольких значений амплитуд напряжения при  $\nu = const$  и нескольких значений частот (например, 20; 50; 200 Гц) при  $U = const$ ; записать несколько значений амплитуд  $l_y$  в мм и вычислить подводимые напряжения по формуле  $U_{eff} = \frac{l_y}{2.8*j_y}$ . Результаты представить в виде таблицы 2.

**Таблица 2.** Измеренные значения амплитуд и рассчитанные напряжения

$l_y, \text{мм}$									
$U_{eff}, \text{В}$									

**Задание 3. Измерение сопротивления, напряжения и силы тока.**

1. Собрать схему (рис. 6), где  $E$  – источник постоянного или переменного тока,  $R_x$  – измеряемое сопротивление,  $R_m$  – магазин сопротивлений,  $R$  – токоограничивающее сопротивление,  $K$  – переключатель.

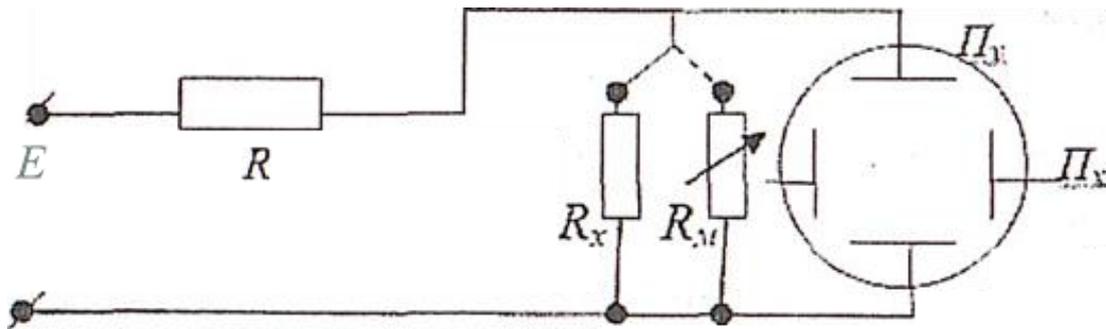


Рис. 6

2. К вертикально отклоняющим пластинам  $\Pi_y$  (канал Y) осциллографа подключить измеряемое сопротивление  $R_x$  и на экране измерить отклонение луча  $l$  по вертикали (в мм). Переключая пластины на  $R_m$ , подобрать в магазине такое значение сопротивления  $R_m$ , при котором на экране осциллографа отклонение луча для  $R_m$  будет такое же, как и для  $R_x$ . В этом случае  $R_x = R_m$ . Зная чувствительность осциллографа  $j_y$  (в мм/В), можно определить значение напряжения  $U = \frac{l_y}{2j_y}$  при постоянном токе и  $U_{eff} = \frac{l_y}{2.8*j_y}$  при переменном токе (где  $u$  – отклонение в мм, соответствующее амплитуде сигнала), а также силу тока в цепи  $I = U/R_x$ . Если измерения проводятся на переменном токе, то сопротивления должны быть безреактивными, т. е. чисто резистивными ( $R_L = R_C = 0$ ).

**Задание 4. Сложение колебаний одного направления.** Как известно, гармоническое колебание  $y = A \sin(\omega t + \phi)$  можно изобразить графически как проекцию вектора амплитуды  $\vec{A}$ , равномерно вращающегося вокруг точки  $O$  в плоскости с угловой скоростью  $\omega$ , на ось ординат (рис. 7а).

Пусть точка на экране осциллографа участвует в двух колебаниях одного направления и одинаковой частоты:  $y_1 = A_1 \sin(\omega t + \phi_1)$  и  $y_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi_2)$ . Так как векторы  $\vec{A}_1$  и  $\vec{A}_2$  вращаются с одинаковой угловой скоростью  $\omega$ , то разность фаз  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  между ними постоянна, и результирующее колебание  $y = y_1 + y_2$  можно представить как проекцию суммы векторов  $\vec{A}_1 + \vec{A}_2$  на ось ординат (рис. 7б).

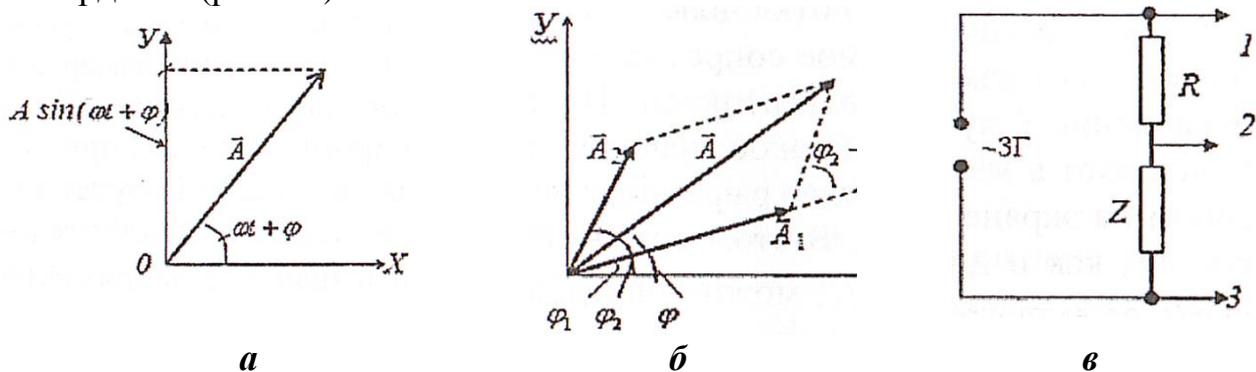


Рис. 7. Графическое представление вектора амплитуды колебаний  
Тогда уравнение результирующего колебания имеет вид:

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(\omega t + \phi) \quad (13)$$

т. е. точка совершает также гармонические колебания в том же направлении с той же частотой, что и складываемые колебания. Амплитуда  $A$  и начальная фаза  $\phi$  результирующего колебания определяются из векторной диаграммы (рис. 7б):

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\phi), \quad (14)$$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{A_1 \sin\phi_1 + A_2 \sin\phi_2}{A_1 \cos\phi_1 + A_2 \cos\phi_2}. \quad (15)$$

Для изучения сложения колебаний одного направления собирают схему (рис. 7в): делитель напряжения, состоящий из активного сопротивления  $R$  и реактивного сопротивления  $Z$ , соединяется со звуковым генератором ЗГ, с выхода делителя сигнал подается на вход осциллографа. При подключении ЭО к клеммам 1-2, 2-3, 1-3 на вертикально отклоняющие пластины подается переменное напряжение, пропорциональное соответственно  $y_1, y_2, y_1 + y_2$ . Упражнение состоит в измерении амплитудных значений напряжения  $A_1, A_2, A$  и вычислении по ним разности фаз  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  складываемых колебаний согласно формуле (14).

**Задание 5. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний, фигуры Лиссажу.** Если на горизонтально отклоняющие пластины ЭО подать напряжение, изменяющееся по гармоническому закону –  $x = A \cos(\omega_1 t)$ , а на вертикально отклоняющие –  $y = B \cos(\omega_2 t + \phi)$ , где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – циклические частоты колебаний,  $\phi$  – разность фаз,  $A$  и  $B$  – амплитуды, то в результате сложения взаимно перпендикулярных колебаний электронный луч чертит на экране кривую сложной формы, называемую **фигурой Лиссажу**. Если частоты складываемых колебаний одинаковы ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ), то уравнение траектории результирующего колебания можно получить, исключив из выражений для  $x(t)$  и  $y(t)$  параметр  $t$ . Для этого записываем складываемые колебания в виде:

$$\frac{x}{A} = \cos(\omega t), \quad \frac{y}{B} = \cos(\omega t + \phi) = \cos(\omega t) \cos\phi - \sin(\omega t) \sin\phi$$

Заменяя  $\cos(\omega t)$  на  $\frac{x}{A}$  и  $\sin(\omega t)$  на  $\sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2}$  и возводя в квадрат, получим:

$$x^2/A_2 + y^2/B_2 - \frac{2xy}{AB\cos\phi} = \sin^2\phi \quad (16)$$

Это уравнение эллипса, поэтому результирующие колебания называются **эллиптически поляризованными**. Ориентация осей эллипса и его размеры зависят от амплитуд складываемых колебаний  $A$  и  $B$  и разности их фаз  $\phi$ .

Физический интерес представляют следующие случаи:

1. Разность фаз  $\phi = 0$  или  $\phi = 180^\circ$  (колебания совершаются в одинаковых фазах или противофазах), уравнение траектории (16) принимает вид мой  $\left(\frac{x}{A} \pm \frac{y}{B}\right)^2 = 0$  или  $y = \pm \frac{B}{A} x$ , т. е. имеем линейно поляризованные колебания.

2. Разность фаз  $\phi = \pm 90^\circ$ , тогда из (16) получим  $x^2/A^2 + y^2/B^2 = 1$  – уравнение эллипса, оси которого совпадают с осями координат, а полуоси равны амплитудам  $A$  и  $B$ . Если  $A = B$ , то эллипс вырождается в окружность  $x^2 + y^2 = R^2$ , т. е. имеем колебания, поляризованные по кругу.

**Задание 6. Формы фигур Лиссажу для различных соотношений частот.** Формы фигур Лиссажу зависят от соотношения амплитуд, частот и разности фаз складываемых колебаний. В данном упражнении необходимо включить приборы согласно блок-схеме (рис. 8), получить на экране устойчивое изображение фигур для отношения частот и разности фаз, указанных в таблице, и зарисовать полученные осциллограммы.

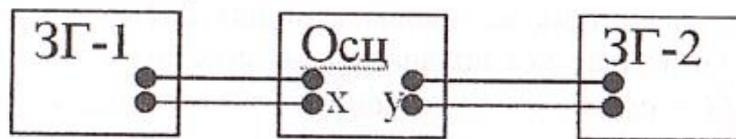


Рис. 8. Блок-схема для наблюдения фигур Лиссажу

$\nu_x : \nu_y$	Разность фаз $\varphi = 0; \pi$	$\varphi = \pi/2$
1:1		
1:2		
1:3		
2:3		
3:4		
2:1		
3:1		
3:2		
4:3		

**Задание 7. Определение частоты исследуемого сигнала.** Если частоты складываемых колебаний относятся как целые числа (отношение  $\omega_y : \omega_x$  – рациональное), то результирующие колебания накладываются сами на себя и дают устойчивую картину – **фигуры Лиссажу** (рис. 9). Очевидно, что чем больше частота колебаний в направлении одной оси (например,  $\omega_y$ ), тем больше число пересечений результирующей траекторией другой оси ( $n_x$ ), т. е. имеет место соотношение  $\omega_y / \omega_x = n_x / n_y$ , где  $n_x, n_y$  – число пересечений траекторией оси  $X$  и  $Y$ , соответственно.

Если частота одного из колебаний известна, то по фигуре Лиссажу можно определить частоту другого колебания. Такое сравнение частот можно выполнить осциллографическим методом, подавая на горизонтально отклоняющие пластины напряжение известной частоты, например  $\nu_x = 50$  Гц, а на вертикально отклоняющие пластины – исследуемое напряжение с неизвестной частотой  $\nu_y$ . Поскольку  $\nu_y / \nu_x = n_x / n_y$ , то  $\nu_y = \nu_x * n_x / n_y$ . Для нахождения от-

ношения  $n_x/n_y$  проводят две произвольные прямые АВ и CD, как показано на рис. 9, подсчитывают число точек пересечения фигуры Лиссажу с прямой АВ ( $n_x$ ) и с прямой CD ( $n_y$ ). В случае, приведённом на рис. 9,  $n_x = 6, n_y = 2$ , т. е.  $v_y/v_x = 3/1$ . Прямые АВ и CD выбирают так, чтобы они не проходили через точки пересечения самих фигур.

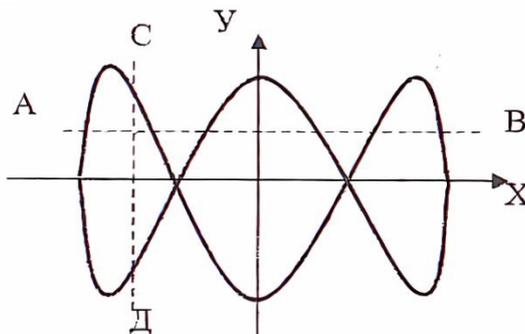


Рис. 9. Схематическое изображение фигуры Лиссажу

**Задание 8. Измерение сдвига фаз.** В данном упражнении определяется сдвиг фаз между напряжением на участке 1–2 ( $U_y$ ) и на участке 2–3 ( $U_x$ , рис. 10а). Напряжения  $U_x$  и  $U_y$  имеют одинаковую частоту, но разные амплитуды и фазы, т. к. на участке 1–2 включена ёмкость С.

Сдвиг фаз между двумя колебаниями по осям X и Y можно определить по формуле сложения двух гармонических колебаний (уравнение эллипса из предыдущего раздела). Для точек пересечения эллипса с осями координат уравнение имеет следующий вид:

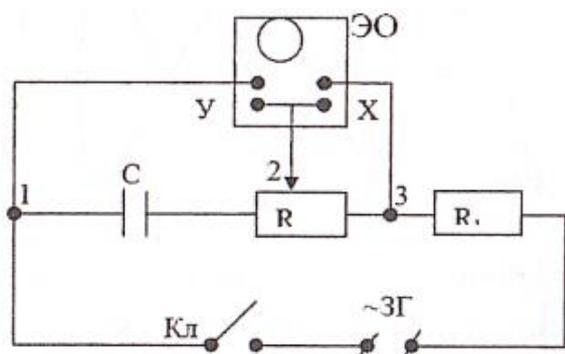
Для пересечения с осью Y ( $x = 0$ ):

$$y/B = \sin\phi \quad (17)$$

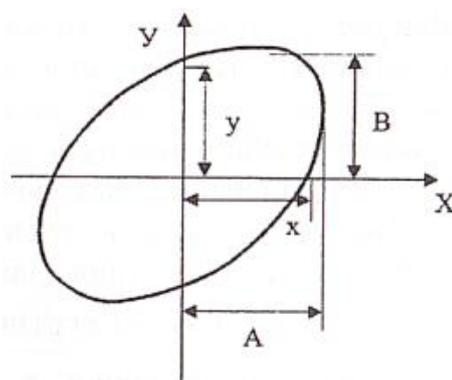
Для пересечения с осью X ( $y = 0$ ):

$$x/A = \sin\phi \quad (18)$$

Таким образом, измеряя координаты точек пересечения эллипса с осями (например,  $y$  и  $B$  для формулы (17) или  $x$  и  $A$  для формулы (18), рис. 10б), по соответствующим формулам определяют сдвиг фаз  $\phi$ .



а



б

Рис. 10. Схема определения сдвига фаз

## **Форма отчета по лабораторной работе**

### **1. Титульный лист**

- Название работы (например, "Изучение принципов работы осциллографа и фигур Лиссажу").
- ФИО исполнителя, группа, дата.
- Название вуза/кафедры.

### **2. Цель работы**

- Краткое описание задач (например, "Изучить работу осциллографа, измерить параметры колебаний и построить фигуры Лиссажу").

### **3. Теоретические основы**

- Ключевые формулы и понятия (например, уравнения движения электронов в ЭЛТ, сложение колебаний, фигуры Лиссажу).

### **4. Экспериментальная установка**

- Описание оборудования (осциллограф, генераторы сигналов, схема подключения).
- Принципиальная схема (если применимо).

**Ход работы.** Последовательность действий (настройки осциллографа, измерения, наблюдения).

### **5. Результаты измерений**

- Таблицы с данными (например, амплитуды, частоты, сдвиги фаз).
- Графики/фотографии экрана осциллографа.

**Обработка результатов.** Расчеты (формулы, погрешности, анализ фигур Лиссажу).

**Выводы.** Сравнение с теорией, источники ошибок, практические применения.

**Литература.** Список источников (учебники, методички).

## **Контрольные вопросы**

1. Основные блоки осциллографа и их назначение. Устройство и принцип действия электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).
2. Движение электронов в электрическом и магнитном полях. Как определяются траектории электронов в горизонтальном и вертикальном направлениях в ЭЛТ?
3. Вывод выражения для отклонения  $y_1$  траектории электрона на выходе из отклоняющей системы и для отклонения  $y$  пятна на экране ЭЛТ. Как определяется чувствительность трубки?
4. Сложение колебаний одного направления, получить выражение для амплитуды  $A$  и начальной фазы результирующего колебания. Биения.

5. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний, получить уравнение траектории результирующего колебания в общем случае. Линейно поляризованные колебания и колебания, поляризованные по кругу.

6. Фигуры Лиссажу, определение частоты исследуемого сигнала и сдвига фаз между двумя сигналами равной частоты.

7. Какие физические величины можно измерить с помощью осциллографа? Области применения осциллографов.

### Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0

2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0

3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В.И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 498 с.

4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

## Лабораторная работа № 2 «Исследование полупроводникового диода»

**Цель работы:** ознакомление с основными параметрами и характеристиками полупроводниковых выпрямительных диодов.

### Общие сведения

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним р-п-переходом и двумя выводами. Электронно-дырочный переход (р-п-переход) – это контакт двух полупроводников с различным типом проводимости. Изготавливается он обычно из одного кристалла полупроводника, в котором формируются области с повышенной концентрацией акцепторной примеси (р-область) и донорной (п-область). Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рис. 1а, б.

Область р-п-перехода

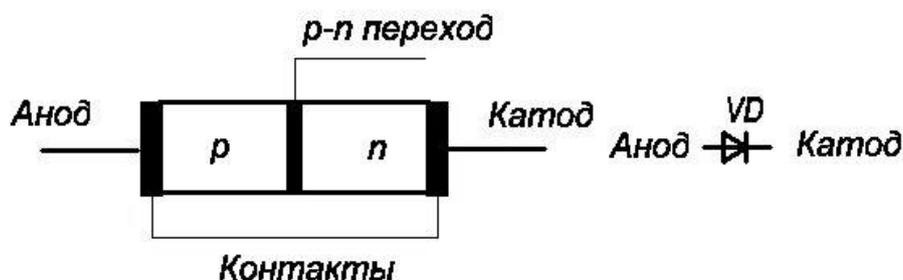


Рис. 1. Слева (а) – структура диода; справа (б) – условное обозначение

Буквами *p* и *n* обозначают слои полупроводника с проводимостями соответственно р-типа и п-типа. Обычно концентрации основных носителей заряда (дырок в слое *p* и электронов в слое *n*) сильно различаются. Одна из областей р-п-структуры, называемая эмиттером, имеет большую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, называемая базой.

В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в р-п-переходе различают шесть основных функциональных типов диодов: *выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы.*

На рис. 2 представлены структуры планарно-эпитаксиального (слева) и сплавного (справа) диодов. База и эмиттер образуют омические переходы (невыпрямляющие контакты) с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы для включения диода в цепь.

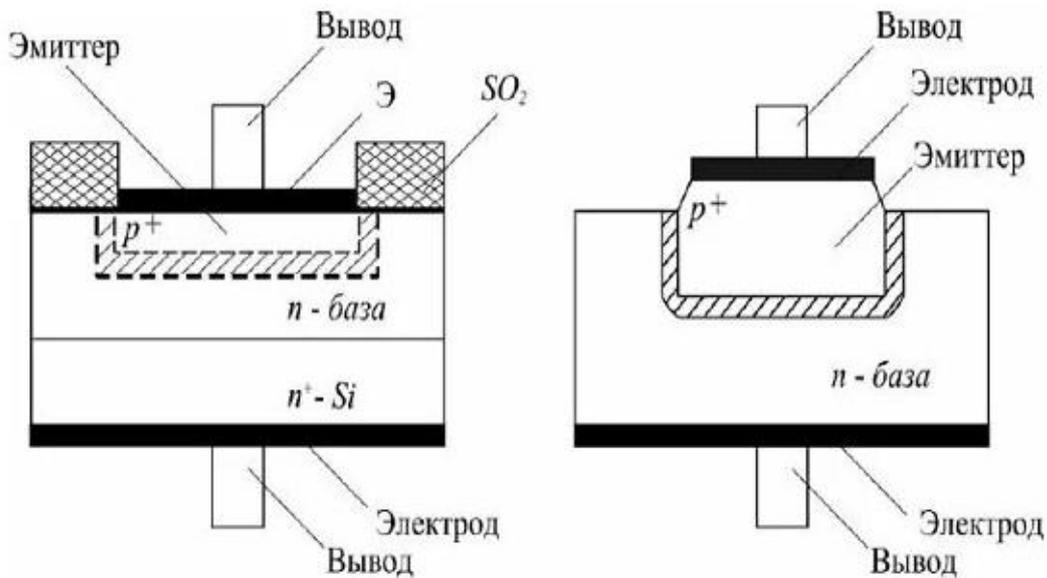
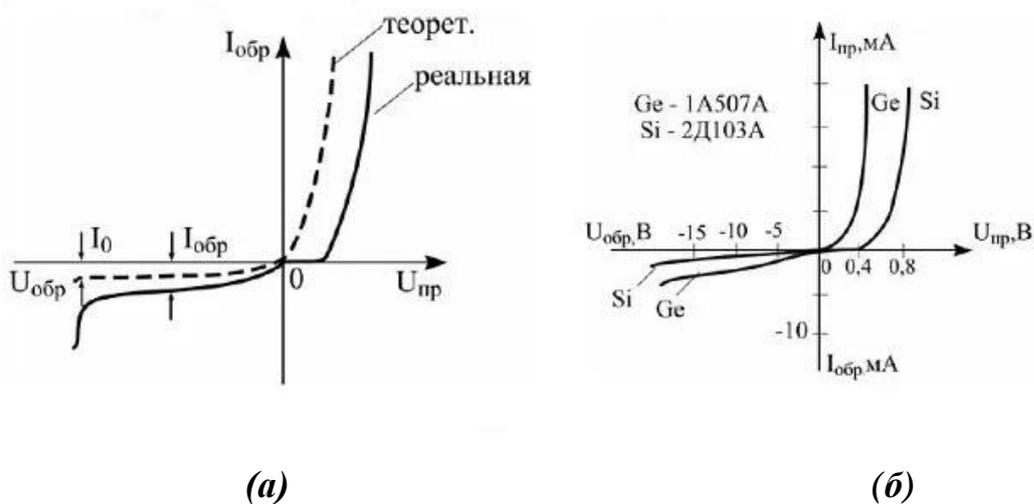


Рис. 2

Основной характеристикой полупроводниковых диодов служит **вольт-амперная характеристика** (ВАХ). В отличие от характеристики идеального р-п-перехода (пунктирная кривая на рис. 3а), характеристика реального диода (сплошная кривая на рис. 3а) в области прямых напряжений располагается несколько ниже из-за падения части приложенного напряжения на объемном сопротивлении базы диода. Уравнение ВАХ имеет вид:

$$I = I_0 (\exp(U/\varphi_T) - 1),$$

где  $U$  – напряжение на р-п-переходе;  $I_0$  – обратный (или тепловой) ток,  $\varphi_T = kT/e$  – температурный потенциал электрона.



(а)

(б)

Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диода

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объеме полупроводника. При достижении обратным напряжением определенного критического значения ток диода начинает резко возрастать. Это явление называют **пробоем диода**. Различают три основных вида пробоя: *лавинный, туннельный и тепловой*. Во всех случаях резкий рост тока связан с увеличением числа носителей заряда в переходе.

Полупроводниковые диоды отличаются друг от друга материалом полупроводника. Наиболее часто в них используют германий или кремний.

ВАХ кремниевого и германиевого диодов представлены на рис. 3б. При повышении температуры абсолютная величина изменения обратного тока в кремниевом диоде (рис. 4а) значительно меньше, чем в германиевом (рис. 4б).

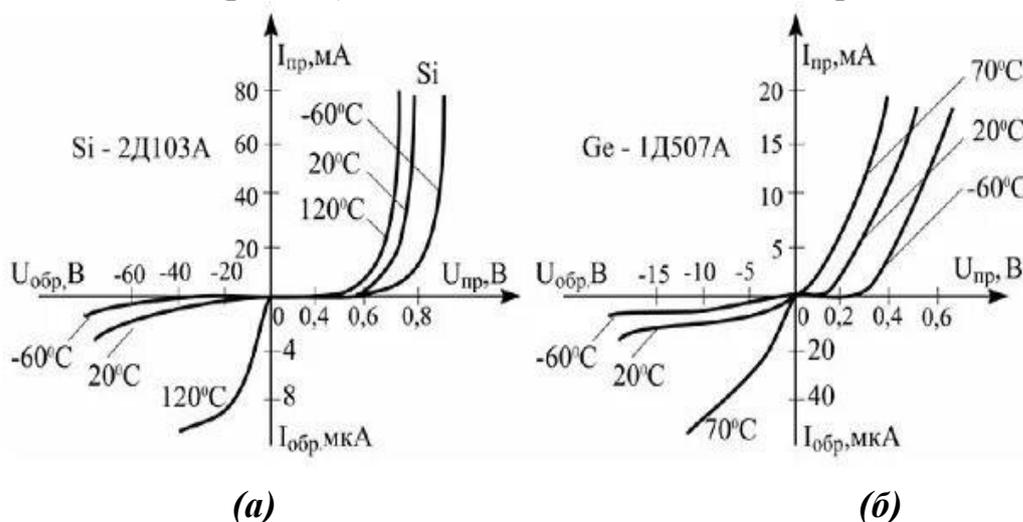


Рис. 4. К определению обратного тока диода

Выпрямительные диоды используют для выпрямления переменных токов частотой 50 Гц – 100 кГц. В них используется главное свойство р-п-перехода – односторонняя проводимость.

Главная особенность выпрямительных диодов – большие площади р-п-перехода, поскольку они рассчитаны на выпрямление больших по величине токов. Основные параметры выпрямительных диодов даются применительно к их работе в однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой (без конденсатора, сглаживающего пульсации).

**Среднее прямое напряжение**  $U_{пр.ср}$  – среднее за период прямое напряжение на диоде при протекании через него максимально допустимого выпрямленного тока.

**Средний обратный ток**  $I_{обр.ср}$  – средний за период обратный ток, измеряемый при максимальном обратном напряжении.

**Максимально допустимое обратное напряжение**  $U_{обр.мах}$  – наибольшее постоянное (или импульсное) обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать.

**Максимально допустимый выпрямленный ток**  $I_{\text{вп.ср.мах}}$  – средний за период ток через диод (постоянная составляющая), при котором обеспечивается его надежная длительная работа. Превышение максимально допустимых величин ведет к резкому сокращению срока службы или пробую диода.

**Максимальная частота**  $f_{\text{мах}}$  – наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины.

В выпрямительном устройстве энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока за счет односторонней проводимости диодов.

На рис. 5 приведена схема *однополупериодного выпрямителя*. Работа выпрямителя происходит следующим образом. Если генератор вырабатывает синусоидальное напряжение  $U_{\text{вх}}(t) = E_m \sin \omega t$ , то в течение положительного (+) полупериода напряжение для диода является прямым, его сопротивление мало, и через резистор проходит ток, который создает на резисторе  $R$  падение напряжения  $U_{\text{вых}}$ , повторяющего входное напряжение  $U_{\text{вх}}(t)$ . В следующий, отрицательный (–) полупериод, напряжение для диода является обратным, сопротивление диода велико, тока практически нет и, следовательно,  $U_{\text{вых}} = 0$ . Таким образом, через диод и  $R$  протекает пульсирующий выпрямленный ток. Он создает на резисторе  $R$  пульсирующее выпрямленное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , которое обычно используется в качестве напряжения питания электронных схем.

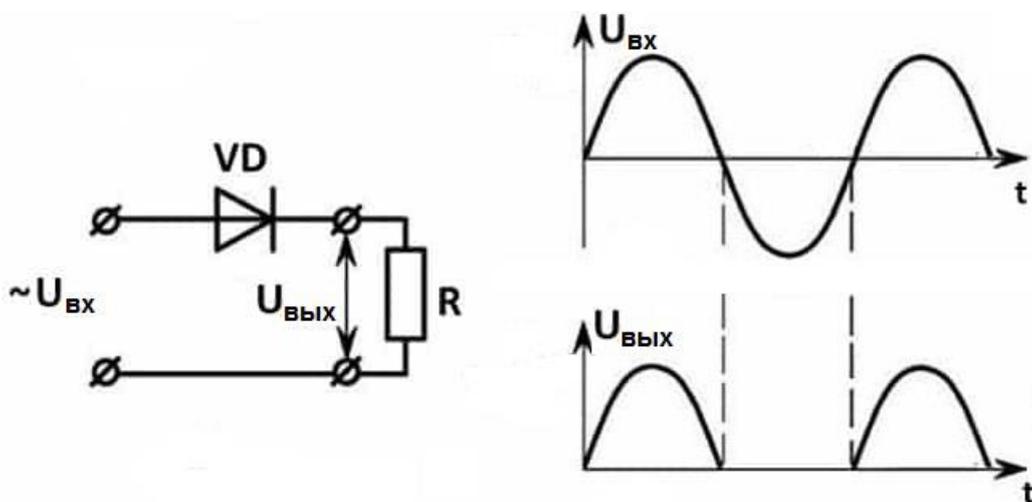


Рис. 5. Схема однополупериодного выпрямителя

### Описание схемы измерений

Снятие вольт-амперной характеристики диодов производится по схемам на рисунке 6.

Для уменьшения погрешности измерения следует соблюдать порядок включения измерительных приборов. При прямом включении диода по схеме (рис. 6а) миллиамперметр измеряет сумму токов, проходящих через вольтметр и диод. Поскольку сопротивление прямо включенного перехода мало по сравне-

нию с внутренним сопротивлением вольтметра, ток через диод значительно превышает ток вольтметра, и погрешность измерения тока будет незначительна.

Если по той же схеме производить измерение обратного тока диода, то погрешность его измерения будет большой, поскольку сопротивление обратно смещенного перехода очень велико, и ток вольтметра может в несколько раз превышать ток диода. Поэтому измерение обратного тока диода следует производить по схеме (рис. 6б), для которой существует некоторая погрешность измерения напряжения на диоде. Однако эта погрешность очень мала, поскольку падение напряжения на низкоомном миллиамперметре значительно меньше, чем падение напряжения на диоде.

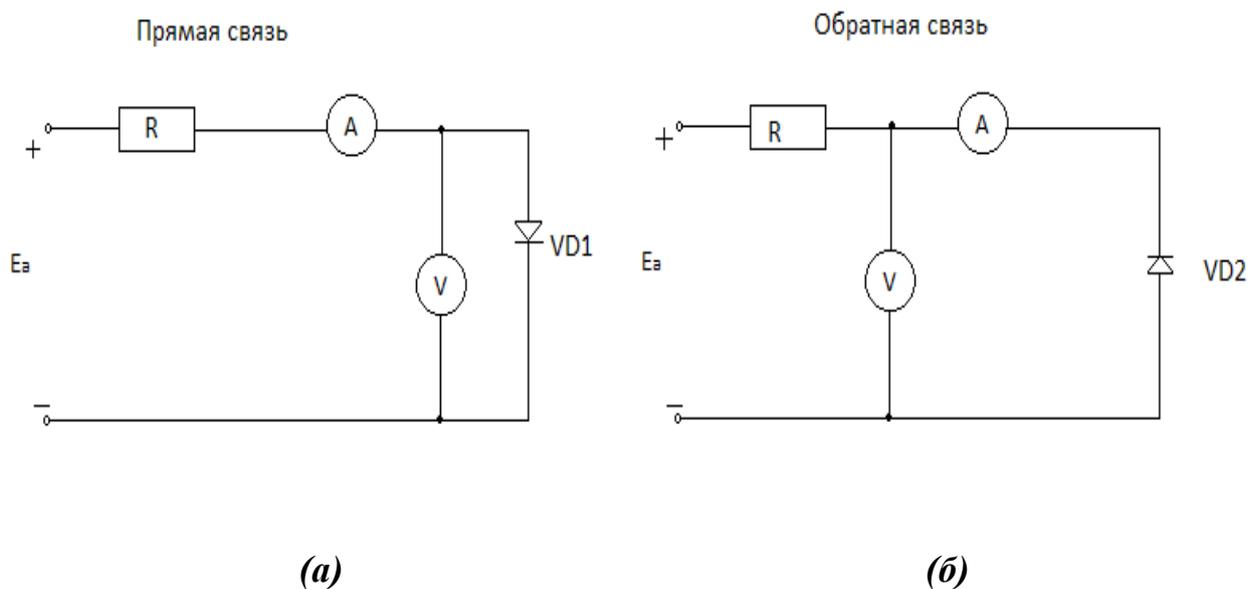


Рис. 6. Схемы включения диода

Таблица 1. Основные параметры некоторых диодов

Тип диода	Выпрямительный ток (среднее значение), $I_{выпр}, A$	Обратный ток (среднее значение), $I_{об}, mA$	Наибольшая амплитуда обратного тока, $I_{об.мах}, mA$	Вид полупроводника	Постоянное прямое напряжение, более В
Д7А-Д7Ж	0,1-0,3	0,1	50-400	Германий	0,5
Д202-Д205	0,4	0,5	100-400	Кремний	1,0
Д226 Б.Г.Д	0,3	0,1	400,300,200,100	Кремний	1,0

*Примечание.* Значение ЭДС источника постоянного тока зависит от типа исследуемого полупроводникового прибора. Однако в большинстве случаев достаточно прикладывать к диоду в прямом направлении напряжение порядка 1 В, а в обратном – порядка 50–40 В. В таблицах 1 и 2 приведены основные параметры некоторых плоскостных полупроводниковых диодов и стабилитронов, получивших широкое применение в электронной аппаратуре.

**Таблица 2.** Основные параметры стабилитронов

Тип стабилитрона	Напряжение стабилизации при $I = 5 \text{ мА}$	Прямое напряжение при токе 50 мА не более, В	Максимальный ток стабилизации, мА	Минимальный ток стабилизации, мА	Дифференциальное сопротивление при $I = 5 \text{ мА}$ не более, Ом
Д219С- Д220С Д223С		1,0–1,5	50		
Д808- Д813	7–14	1,0	33–20	3,0	6, 10, 12, 15, 18
Д814А- Д814Д	7–8, 50 ДО 11, 5–14		40–24	3,0	6, 10, 12, 15, 18
Д817 ФА, БВ, Г	56, 68, 82, 100		90, 75, 60, 50	5, 5, 5, 5	52, 60, 87, 75
Д815	8,2		950	50	1,5

### Задания

#### Экспериментальная часть

1. Собрать схему для снятия прямых характеристик диода VD1 (рис. 6 а) и определить цену деления каждого измерительного прибора.
2. Снять зависимость  $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$  для диода VD1 (германиевого), изменяя  $I_{\text{пр}}$  от 0 до 10 мА с интервалом 0,5 мА, при помощи регулятора «Рег.  $U_{\text{вых}}$ » и переключателя напряжения «0–3/3–12 В».
3. Повторить измерения с диодом VD2 (кремниевым).
4. Результаты измерений занести в таблицу 3.
5. Собрать схему (рис. 4) для снятия обратных характеристик диодов.
6. Снять зависимость  $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$  для диодов VD1 и VD2, изменяя  $U_{\text{обр}}$  в соответствии с таблицей 4; результаты занести в таблицу 4.

**Таблица 3.** Зависимость  $I_{пр} = f(U_{пр})$

№ опыта	VD1		VD2	
	$U_{пр}(В)$	$I_{пр}(mA)$	$U_{пр}(В)$	$I_{пр}(mA)$
1		0		0
2		0.5		0.5
3		1		1
4		2		2
5		3		3
6		4		4
7		5		5
8		6		6
9		7		7
10		8		8
11		9		9
12		10		10

**Таблица 4.** Зависимость  $I_{обр} = f(U_{обр})$

№ опыта	VD1		VD2	
	$U_{обр}(В)$	$I_{обр}(mA)$	$U_{обр}(В)$	$I_{обр}(mA)$
1		0		0
2		2		2
3		4		4
4		6		6
5		8		8
6		10		10

**Таблица 5.** Результаты снятия ВАХ стабилитрона

№ опыта	Прямое включение		Обратное включение	
	$U(В)$	$I(mA)$	$U(В)$	$I(mA)$
1		0		0
2		0.5		0.5
3		1		1
4		2		2
5		3		3
6		4		4
7		5		5
8		6		6
9		7		7
10		8		8
11		9		9
12		10		10

7. Построить ВАХ для диодов VD1 и VD2.
8. Определить динамические сопротивления  $R_{пр}$ ,  $R_{обр}$  для диодов VD1 и VD2.
9. Определить коэффициенты выпрямления  $K_v$  исследуемых диодов при напряжении 0,1 В по формуле  $K_v = I_{пр}/I_{обр}$ .
10. Снять вольт-амперные характеристики стабилитрона: при исследовании обратной ветви характеристики от нуля до  $U_{ст}$  следует пользоваться схемой на рис. 6 б, снять зависимость  $I_{обр} = f(U_{обр})$ , изменяя  $I_{обр}$  от 0 до max (8 мА) с шагом 0,5 мА.
11. При снятии рабочего участка, когда ток стабилитрона начинает резко увеличиваться, необходимо перейти к схеме на рис. 6а, поменяв в ней полярность включения диода.
12. Чтобы снять ВАХ стабилитрона при прямом включении, поменяйте полярность включения источника «Рег.  $U_{вых}$ » и измерительных приборов.
13. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.
14. Построить ВАХ для стабилитрона VD4.
15. Определить для стабилитрона  $U_{ст}$ ,  $I_{ст min}$ ,  $I_{ст max}$  и сравнить полученные параметры с их значениями из таблицы 2.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Название и цель работы;
2. Оборудование и перечень приборов;
3. Схемы для снятия ВАХ диодов;
4. Схемы для снятия ВАХ стабилитрона;
5. Таблицы с результатами измерений;
6. ВАХ для VD1, VD2, VD4;
7. Для диодов – динамическое сопротивление  $r_{d, r_{пр}, r_{обр}}$  и коэффициенты выпрямления  $K_v$ ;
8. Для стабилитрона –  $U_{ст}, I_{ст min}, I_{ст max}, r_{ст}$ ;
9. Вывод о проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Свойства p-n-перехода, поясните, как образуется потенциальный барьер.
2. Какой из выводов полупроводникового диода называют базой, а какой эмиттером и почему?
3. Виды полупроводниковых диодов, назначение, область применения, основные параметры и характеристики.
4. В чем особенность диодов Шоттки, их достоинства и область применения.
5. В чем отличие идеальной ВАХ полупроводникового диода от реальной?
6. Сравнить ВАХ германиевого и кремниевого полупроводниковых диодов, сопоставить с полученными экспериментальными данными.
7. Объясните природу прямого и обратного токов через диод.
8. Какое явление называется пробоем диода? Виды пробоя.

9. Что называют дифференциальным сопротивлением диода?
10. Каковы основные свойства стабилитрона?

### **Литература**

1. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы : учебное пособие / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 9-е изд. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 480 с. – ISBN 978-5-8114-0368-4
2. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий: учебное пособие / А. С. Глинченко, Н. М. Егоров, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 352 с. – ISBN 5-94074-416-8

## Лабораторная работа № 3 «Изучение работы однофазного выпрямителя»

**Цель работы:** изучение принципов работы и сравнение основных параметров и характеристик различных вариантов однофазных выпрямителей переменного тока.

### Общие сведения

**Действующее и среднее значения переменного тока.** При расчетах цепей переменного тока, а также при электрических измерениях неудобно пользоваться мгновенными или амплитудными значениями токов и напряжений, так как их средние значения за период равны нулю. Кроме того, об электрическом эффекте периодически изменяющегося тока (о количестве выделенной теплоты, о совершенной работе и т.д.) нельзя судить по амплитуде этого тока. Наиболее удобным оказалось введение понятий так называемых **действующих значений тока и напряжения**. В основу этих понятий положено тепловое действие тока, не зависящее от его направления.

**Действующее значение переменного тока** – это значение постоянного тока, при котором за период переменного тока в проводнике выделяется столько же теплоты, сколько и при переменном токе. Оно определяется как среднее квадратичное значение за период:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1)$$

Если ток на участке цепи изменяется по гармоническому закону  $i = I_m \sin \omega t$ , то для действующего значения синусоидального тока получается:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{I_m^2 \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{I_m^2 * T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Аналогичный результат можно получить для синусоидальных ЭДС и напряжений. Таким образом, действующие значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения меньше своих амплитудных значений в  $\sqrt{2}$  раз.

Электроизмерительные приборы переменного тока градуируют в действующих значениях измеряемых величин.

В цепях переменного тока, а также в цепях выпрямленных нефильТРованных токов пользуются также *средними за период значениями переменного тока и напряжения*. Для синусоидального переменного тока (аналогично для напряжения и ЭДС) его среднее значение равно:

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2I_m}{T} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m \quad (3)$$

### Основные характеристики выпрямителей

Большинство электронных управляющих, измерительных, вычислительных и других устройств питаются напряжением постоянного тока. Так как напряжение в электросети *переменное*, то практически каждый электронный

прибор снабжен автономным преобразователем напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока.

Основным узлом преобразователя напряжения является **выпрямитель**. Схема любого выпрямителя содержит три основных элемента:

- *Силовой трансформатор* – устройство для понижения или повышения напряжения питающей сети и гальванической развязки сети с аппаратурой.
- *Выпрямительный элемент* (вентиль), имеющий одностороннюю проводимость – для преобразования переменного напряжения в пульсирующее.
- *Фильтр* – для сглаживания пульсирующего напряжения.

Основными характеристиками выпрямителей являются:

- *Номинальное напряжение постоянного тока* – среднее значение выпрямленного напряжения, заданное техническими требованиями. Обычно указывается напряжение до фильтра  $U_0$  и напряжение после фильтра (или отдельных его звеньев) –  $U$ . Определяется значением напряжения, необходимым для питаемых выпрямителем устройств.

- *Номинальный выпрямленный ток*  $I_0$  – среднее значение выпрямленного тока, т. е. его постоянная составляющая, заданная техническими требованиями. Определяется значением тока, необходимым для питаемых выпрямителем устройств.

- *Напряжение сети*  $U_{\text{сети}}$  – напряжение сети переменного тока, питающей выпрямитель. Стандартное значение этого напряжения для бытовой сети 220 В с допускаемыми отклонениями не более 10 %.

- *Пульсация* – переменная составляющая напряжения или тока на выходе выпрямителя. Это качественный показатель выпрямителя.

- *Частота пульсаций* – частота наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя. Для самой простой – однополупериодной схемы выпрямителя частота пульсаций равна частоте питающей сети. Двухполупериодные мостовые схемы и схемы удвоения напряжения дают пульсации, частота которых равна удвоенной частоте питающей сети. Многофазные схемы выпрямления имеют частоту пульсаций, зависящую от схемы выпрямителя и числа фаз.

- *Коэффициент пульсаций* – отношение амплитуды наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя к среднему значению напряжения или тока. Различают коэффициент пульсаций на входе фильтра ( $k_{п0}$ , %) и коэффициент пульсаций на выходе фильтра ( $k_{п}$ , %). Допускаемые значения коэффициента пульсаций на выходе фильтра определяются характером нагрузки.

- *Коэффициент фильтрации (коэффициент сглаживания)* – отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра  $k_{сг} = k_{п0}/k_{п}$ . Для многозвенных фильтров коэффициент фильтрации равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев.

- *Колебания* (нестабильность) напряжения на выходе выпрямителя – изменение напряжения постоянного тока относительно номинального. При отсутствии стабилизаторов напряжения определяются отклонениями напряжения сети.

### Различные схемы выпрямителей

Выпрямители, применяемые для однофазной бытовой сети, выполняются по трем основным схемам: однополупериодной, двухполупериодной с нулевой точкой и двухполупериодной мостовой.

#### Однополупериодная схема выпрямления

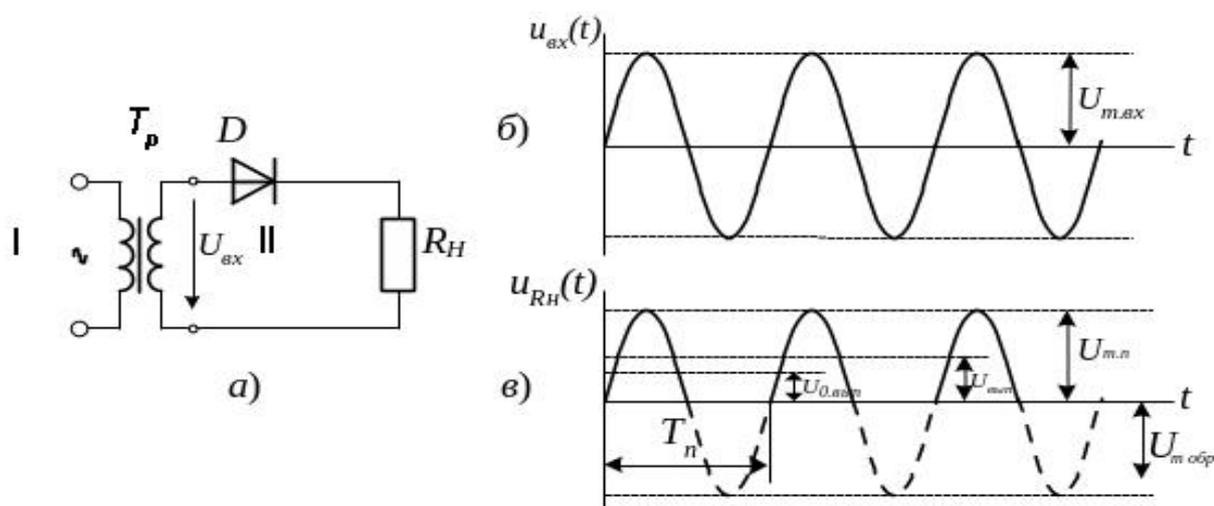


Рис. 1. Схема однополупериодного выпрямителя

Однополупериодная схема с активной нагрузкой приведена на рис. 1, где  $T_p$  – силовой трансформатор, первичная обмотка I которого называется сетевой, а вторичная обмотка II – низковольтной, D – вентиль (диод),  $R_H$  – нагрузка.

Под действием положительных импульсов переменного напряжения, возникающего в обмотке II, через вентиль (диод) D и нагрузку протекает пульсирующий ток. Сопротивление диода D непостоянно: оно определяется крутизной вольт-амперной характеристики в каждой точке. Однако при включении последовательно с диодом нагрузки  $R_H$  сопротивление этой цепи равно  $R_d + R_H$ , и характеристику можно считать линейной.

Если  $U_m \sin \omega t$  – переменное синусоидальное напряжение, подлежащее выпрямлению, тогда выпрямленный ток ( $i_a$ ), имеющий форму половины синусоиды, равен  $i_a = I_m \sin \omega t$ , где амплитуда пульсации тока

$$I_m = U_m / (R_d + R_H) \quad (4)$$

Найдем среднее за период значение выпрямленного (пульсирующего) тока:

$$I_{cp} = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^{T/2} i_a dt = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = I_m/\pi \quad (5)$$

Среднее за период значение выпрямленного суммарного падения напряжения на диоде и нагрузке равно:

$$U_{cp} = I_{cp} (R_d + R_H) = \frac{I_m}{\pi} * (R_d + R_H) = U_m/\pi.$$

Откуда постоянное напряжение  $U_0$  на нагрузке  $R_H$  (на выходе выпрямителя) равно

$$U_0 = I_0 R_H = \frac{U_m}{\pi} - I_0 R_d. \quad (6)$$

Без нагрузки ( $I_0 = 0$ ) напряжение на зажимах выпрямителя равно среднему за период значению положительной полуволны синусоиды, т. е.  $U_0 = U_m / \pi$ .

С увеличением тока нагрузки напряжение на выходе выпрямителя линейно падает на величину падения напряжения на диоде ( $I_0 R_d$ ).

Из схемы видно, что в отрицательный полупериод, когда диод D закрыт, он находится под напряжением вторичной обмотки трансформатора, поэтому наибольшее обратное напряжение, действующее на диод, равно  $U_{обр} = U_m$ , а обратное напряжение на диоде более чем в 3 раза превышает выпрямленное напряжение на нагрузке.

Действующее значение импульсов тока во вторичной обмотке трансформатора равно

$$I = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^{T/2} i_a^2 dt} = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m/2 \quad (7)$$

Разложение выражения для пульсаций напряжения на нагрузке в ряд Фурье имеет вид:

$$U = \frac{U_m}{\pi} + \frac{U_m}{2} \cos \omega t + (-1)^{\frac{n}{2}-1} \frac{2U_m}{\pi} \sum_n \frac{\cos n \omega t}{n^2-1} \quad (8)$$

где  $n = 2, 4, 6$ . Первый член этого ряда  $\frac{U_m}{\pi}$  – постоянная составляющая, равная среднему значению  $U_0$ , второй член ряда  $\frac{U_m}{2} \cos \omega t$  – первая гармоника, имеющая частоту напряжения сети, остальные члены – переменные составляющие более высоких частот с быстро уменьшающейся амплитудой, которых можно не учитывать.

Величина пульсаций выпрямленного напряжения, как было указано, характеризуется коэффициентом пульсаций:

$$k_n = U_{1m}/U_0. \quad (9)$$

где  $U_{1m}$  – амплитуда первой гармоники, а  $U_0$  – постоянная составляющая напряжения на нагрузке  $R_H$ . Тогда для однополупериодной схемы получим величину  $k_n = (U_m / 2) / (U_m/\pi) = \pi / 2 = 1,57$ .

На рис. 1б, в наглядно показано, что период пульсаций выпрямленного однополупериодного напряжения  $T$  равен периоду входного напряжения. Значит, и частота пульсаций  $f_n$  равна частоте входного напряжения, а кратность пульсаций  $f_n / f$  равна единице.

Однополупериодная схема выпрямления используется в современных выпрямительных устройствах очень редко (в основном для получения токов нагрузки до 30 мА). К недостаткам этих выпрямителей следует отнести малое значение выпрямленного напряжения ( $U_o \approx U_m/3$ ); высокий уровень пульсаций ( $k_n = 1,57$ ) и большое обратное напряжение на диоде ( $U_{обр} = U_m$ ).

### Двухполупериодная схема выпрямления со средней точкой

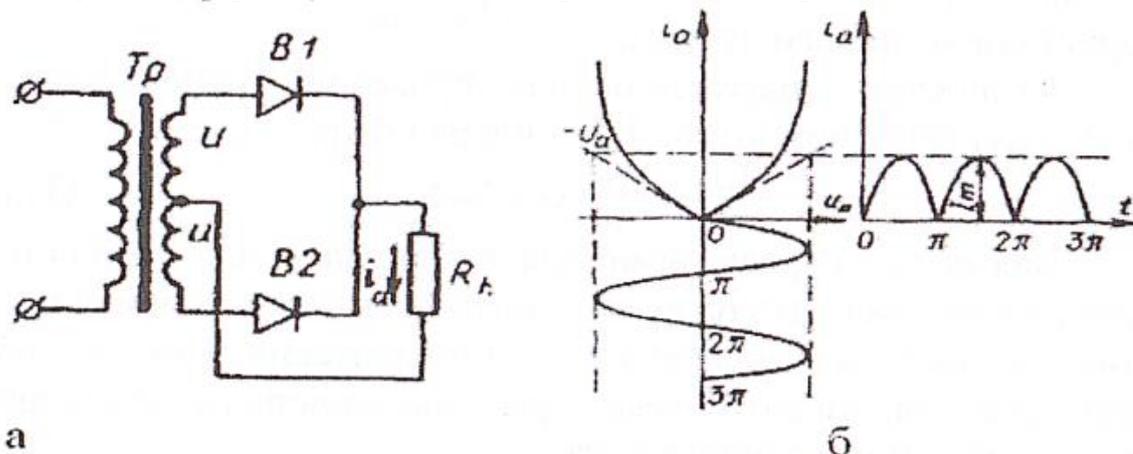


Рис. 2. Схема двухполупериодного выпрямителя

Значительно лучшими параметрами обладает схема двухполупериодного выпрямителя, разработанная в 1901 г. академиком Миткевичем (рис. 3).

В состав схемы входят: источник синусоидального напряжения, трансформатор с выводом от средней точки вторичной обмотки, два диода и сопротивление нагрузки  $R_n$ . Сопротивление нагрузки включено между катодами диодов и средней точкой вторичной обмотки. Эту схему можно рассматривать как две самостоятельные однополупериодные схемы, имеющие общую нагрузку. Поскольку диоды  $B_1$  и  $B_2$  оказываются открытыми в разные половины периода переменного напряжения, ток через нагрузку  $R_n$  протекает в обе половины периода, пульсируя с двойной частотой; кратность пульсаций  $f_n/f$  равна двум.

Считая диоды  $B_1$  и  $B_2$  одинаковыми, можно записать значение тока для каждого диода:

$$i_a = I_m \sin \omega t,$$

где амплитуда пульсации тока  $I_m = U_m / (R_d + R_n)$ .

Напряжение, подлежащее выпрямлению, определяется половиной вторичной обмотки трансформатора:  $u = U_m \sin \omega t$ .

Каждый диод здесь работает как в однополупериодной схеме. Токи диодов складываются, поэтому постоянные составляющие тока и напряжения равны среднему значению полусинусоидальных импульсов, т. е. с учётом соотношений (5) и (6) можно записать:

$$I_o = 2 \frac{I_m}{\pi}, \quad U_o = I_o R_n = 2 \frac{U_m}{\pi} - I_o R_d. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что в отсутствие нагрузки напряжение на выходе двухполупериодного выпрямителя вдвое больше, чем на выходе однополупериодного (нагрузочная характеристика несколько лучше).

Разложение выражения для пульсаций напряжения при двухполупериодном выпрямлении в ряд Фурье имеет вид:

$$u = \left(2 \frac{U_m}{\pi}\right) - \left(\frac{4U_m}{3\pi}\right) \cos 2\omega t + \dots \quad (11)$$

Как видно, первая гармоника этого ряда с частотой  $\omega$  в данном разложении отсутствует, а низшая частота переменных составляющих вдвое больше частоты напряжения сети. Это облегчает условия, необходимые для последующего сглаживания пульсаций выпрямленного тока.

Для двухполупериодной схемы коэффициент пульсаций меньше:

$$k_n = (4U_m/3\pi) / (2U_m/\pi) = 2/3 \approx 0,67. \quad (12)$$

В рассматриваемой схеме обратное напряжение, действующее на каждый диод, находящийся в закрытом состоянии, равно сумме амплитуд напряжений обеих половин вторичной обмотки.

$$U_o = 2U_m = 2 \frac{\pi U_o}{2} = \pi U_o. \quad (13)$$

На основании выражения (10) для тока, протекающего через каждый диод, можно записать:

$$I_B = I_m/2 = \pi I_o/4 \quad (14)$$

т. е. в двухполупериодной схеме по сравнению с однополупериодной через каждый диод протекает ток вдвое меньший (лучше используются обмотки по току).

На практике двухполупериодную схему Миткевича используют часто. Её недостатками являются наличие отвода от середины вторичной обмотки трансформатора и неполное использование вторичной обмотки по напряжению. Эти недостатки устранены в мостовой схеме.

Мостовая схема выпрямления приведена на рисунке 3. В неё входят силовой трансформатор  $T_p$  с двумя обмотками и четыре диода  $B1 - B4$ . Диагональ моста АВ подключена ко вторичной обмотке трансформатора  $T_p$ , диагональ CD – к нагрузке.

При подаче на первичную обмотку переменного напряжения на концах обмотки II полярность напряжения изменяется через каждый полупериод. В результате при более высоком потенциале точки А (+) по сравнению с потенциалом точки В (–) ток проходит в течение полупериода по цепи  $A \rightarrow B_1 \rightarrow C \rightarrow R_n \rightarrow D \rightarrow B_2 \rightarrow B \rightarrow A$ , и в следующий полупериод полярность меняется, и ток идёт по цепи  $B \rightarrow B_2 \rightarrow C \rightarrow R_n \rightarrow D \rightarrow B_4 \rightarrow A \rightarrow B$ .

### Мостовая однофазная схема выпрямления

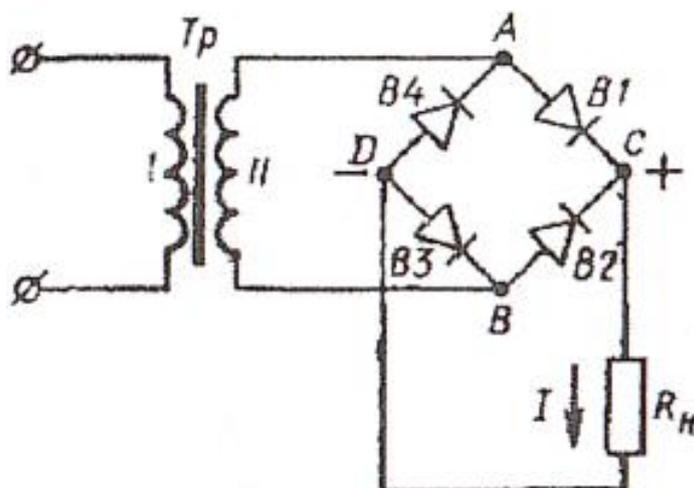


Рис. 3. Схема мостовой схемы выпрямителя

Таким образом, через нагрузку  $R_H$  протекает выпрямленный ток в течение всего периода переменного тока, поэтому мостовая схема является двухполупериодной. Легко видеть, что в мостовой схеме выпрямленный ток и напряжение имеют такую же форму, как и в схеме со средней точкой, поэтому значение выпрямленного тока согласно (10) равно  $I_o = 2I_m/\pi$ , а выпрямленного напряжения  $U_o = I_o R_H = 2 \frac{U_m}{\pi} - I_o R_d$ . В случае отсутствия нагрузки ( $I_o = 0$ ) выпрямленное напряжение на выходе равно  $U_o = 2U_m/\pi$ .

Особенностью мостовой схемы является отсутствие отвода от середины вторичной обмотки трансформатора, поэтому для получения одного и того же значения выпрямленного напряжения в мостовой схеме требуется обмотка с числом витков, вдвое меньшим по сравнению со схемой Миткевича. Поэтому обратное напряжение, действующее на каждый диод, в два раза меньше, чем в схеме со средней точкой:

$$U_{обр} = U_m = 1.57 U_o \quad (15)$$

Действующее значение тока, протекающего через диод, равно

$$I = \frac{\pi I_o}{4} = 0.785 I_o \quad (16)$$

Следует отметить, что в мостовой схеме через каждый диод ток проходит только в течение одного полупериода, тогда как во вторичной обмотке трансформатора – в течение всего периода. Действующее значение тока, протекающего через вторичную обмотку, равно

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_o}{2\sqrt{2}} = 1.1 I_o. \quad (17)$$

Частота пульсаций выпрямленного напряжения в мостовой схеме такая же, как и в схеме со средней точкой, поэтому и коэффициент пульсаций такой же ( $k_n = 0.67$ ).

Полупроводниковые диоды отличаются малыми габаритами и массой, не требуют питания цепей накала, поэтому мостовая схема выпрямления является основной и наиболее часто применяется в самых различных устройствах.

### Сглаживающие фильтры

Рассмотренные выше схемы выпрямления позволяют получить выпрямленное, но пульсирующее напряжение. Для питания электронных приборов пульсирующее напряжение непригодно: оно создаёт фон переменного тока на выходе, вызывает искажения сигналов, приводит к неустойчивой работе прибора. Требования к коэффициенту пульсаций напряжения питания стандартных радиоэлектронных схем достаточно жёстки. Например, для входных низкочастотных усилительных каскадов коэффициент пульсаций должен быть не больше  $10^{-6}$ , основных усилительных каскадов –  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ , импульсных, генераторных схем и усилителей мощности –  $10^{-2}$ – $10^{-4}$ .

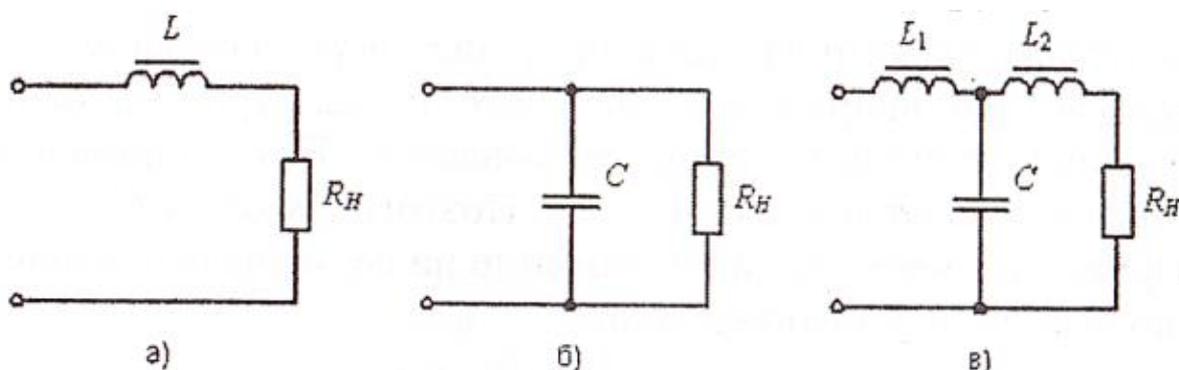


Рис. 4. Схемы сглаживающих фильтров

Для устранения пульсаций (сглаживания) применяют так называемые **сглаживающие фильтры**. Сглаживающий фильтр состоит из реактивных элементов: конденсаторов и катушек индуктивности (дросселей). Сущность работы сглаживающего фильтра – разделение выпрямленного пульсирующего тока на постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая (полезная) направляется в нагрузку, а переменная (нежелательная) замыкается через конденсатор, минуя нагрузку.

Так как сопротивление индуктивности  $X_L = \omega L$  прямо пропорционально частоте, то для постоянной составляющей пульсирующего напряжения сопротивление идеальной индуктивности равно нулю, а для переменной составляющей (гармоник) оно тем больше, чем выше частота пульсаций (номер гармоники). Поэтому индуктивность полезно включать последовательно нагрузке (рис. 4а). Сопротивление ёмкости  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  обратно пропорционально частоте. Для постоянной составляющей это сопротивление бесконечно велико, а для гармоник – мало, и тем меньше, чем выше номер гармоники. Поэтому ёмкость полезно включать параллельно нагрузке (рис. 4б). Для повышения качества фильтрации применяются комбинированные LC-фильтры, например как на рис. 4в.

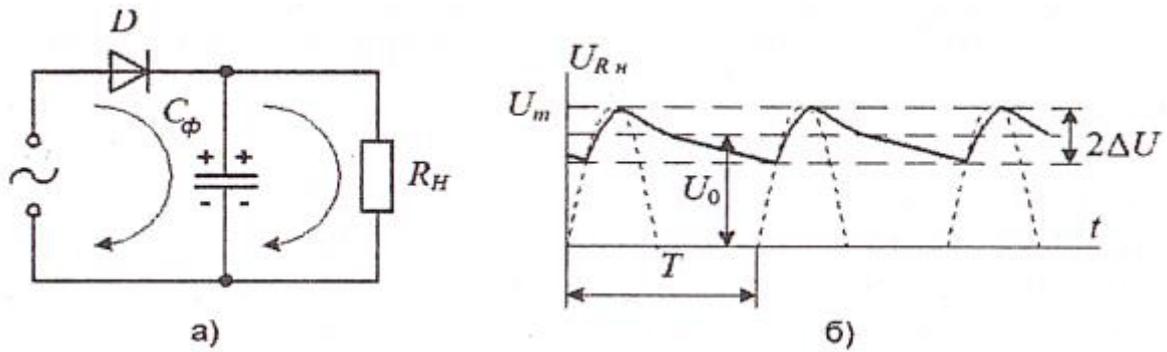


Рис. 5. Схема работы емкостного фильтра

Рассмотрим принцип работы простейшего ёмкостного фильтра, сглаживающего пульсации однополупериодного выпрямителя (рис. 5а). Собственно выпрямитель (диод  $D$  и сопротивление  $R_H$ ) формирует пульсации напряжения с периодом  $T$  и амплитудным значением  $U_m$  (пунктир на рис. 5б). Так как сопротивление ёмкости переменному току значительно меньше сопротивления нагрузки  $X_{C_\phi} \ll R_H$ , то прямой ток диода на интервале пульсации протекает через конденсатор  $C_\phi$ , заряжая его до напряжения, близкого к  $U_m$ . При уменьшении напряжения пульсации диод закрывается. Его сопротивление становится значительно больше, поэтому ёмкость  $C_\phi$  начинает разряжаться через  $R_H$ , и напряжение на её обкладках уменьшается по экспоненциальному закону:

$$U_{C_\phi}(t) = U_{R_H} = U_m \exp(-t/\tau_\phi), \quad (18)$$

где  $\tau_\phi = C_\phi R_H$  – постоянная фильтра. В конце периода пульсаций, когда  $t = T$ ,

$$U_{C_\phi}(t) = U_m \exp(-T/\tau_\phi). \quad (19)$$

Очевидно, что чем больше  $\tau_\phi$ , тем меньше напряжение  $U_{C_\phi}(T)$  будет отличаться от амплитудного  $U_m$ . Реальные фильтры имеют  $\tau_\phi \geq 100T$ . При этом уменьшение выходного напряжения  $2\Delta U$  за время одного периода равно разности

$$2\Delta U = U_m - U_{C_\phi}(T) = U_m [1 - \exp(-T/\tau_\phi)]. \quad (20)$$

При малом значении показателя экспоненты разность

$$[1 - \exp(-T/\tau_\phi)] \approx T/\tau_\phi. \quad (21)$$

Поэтому

$$2\Delta U = U_m T/\tau_\phi. \quad (22)$$

Теперь среднее значение выпрямленного напряжения определим как разность  $U_m - \Delta U$ , т. е.

$$U_o = U_m - \Delta U = U_m [1 - T/2\tau_\phi]. \quad (23)$$

Таким образом, рис. 5 б и полученные выражения показывают, что величина пульсаций выпрямленного напряжения уменьшилась до значения  $2\Delta U$ . Часто частота пульсаций осталась прежней  $f_n = 1/T$ . Поэтому огибающая выходного напряжения теперь совпадает с максимумами первой гармоники пульсаций. Значит,  $U_{m_1} = \Delta U$ . Поэтому коэффициент пульсаций

$$k_n = \frac{U_{m1}}{U_o} = \frac{\Delta U}{U_o} = \frac{T}{2\tau_\phi \left(1 - \frac{T}{2\tau_\phi}\right)} \approx \frac{T}{2\tau_\phi}. \quad (24)$$

Легко видеть, что подбором  $C_\phi$  можно обеспечить требуемое значение коэффициента пульсаций, а значит, и качество выпрямленного напряжения. В заключение отметим, что *ёмкостной сглаживающий фильтр эффективен в сочетании с высокоомной нагрузкой  $R_H$* . При низкоомной нагрузке необходимо применять комбинированные фильтры.

## Экспериментальная часть

### Описание метода измерений

Экспериментальная установка состоит из источника синусоидальных колебаний, электроизмерительных приборов и осциллографа, которые входят в состав лабораторного стенда «Луч-1».

В работе изучается форма сигнала после прохождения однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей, сглаживающие свойства ёмкости и измеряется величина постоянной составляющей выпрямленного напряжения  $U_o$ .

Величина  $U_o$  может быть измерена с помощью прибора АВМ1, а также определена по графику зависимости выпрямленного напряжения от времени, т. е. по осциллограмме (рис. 5б).

### Порядок выполнения измерений

Включить лабораторный стенд и осциллограф и дать им прогреться в течение 5 мин.

1. Собрать на сборной плате стенда однополупериодный выпрямитель с сопротивлением нагрузки  $R_H = 1,6$  кОм. Переменное напряжение с амплитудой  $U_{вх} \approx 15$  В и сетевой частотой  $f = 50$  Гц подводится на вход исследуемой схемы от крайних зажимов источника питания ИП стенда и измеряется прибором ИВ в правом нижнем углу стенда, переводом его переключателя в положение "ИП 25 В".

2. Получить на экране осциллографа устойчивую картину двух-трех периодов выпрямленного напряжения, выбрав оптимальные значения вертикального усиления (в В/дел) и времени развертки (в с/дел).

3. Нарисовать осциллограммы выпрямленного напряжения при отсутствии фильтра и с фильтром при различных сопротивлениях нагрузки  $R_H$ , ёмкости фильтра  $C$  и сравнить их.

4. В качестве измерителя тока нагрузки RA(1) использовать прибор стенда АВМ 2 на пределах 50 и 10 мА.

5. Постоянные напряжения на выходе схемы можно измерять с помощью АВМ1 на пределах 2 и 10 В.

6. Пульсации в схеме измерить милливольтметром МВ стенда на пределах 5 В, 1 В, 500 мВ и 100 мВ, а их форму наблюдать с помощью осциллографа.

7. Определить коэффициент пульсации выпрямленного напряжения при отсутствии фильтра и с фильтром при различных  $R_H$  и  $C$  согласно выражению

$k_n = (U_{max} - U_{min})/U_{cp}$  и сравнить его с теоретическим значением (как было показано выше, для однополупериодной схемы без сглаживающего фильтра  $k_n = 1,57$ , а для двухполупериодной схемы  $k_n = 0,67$ ) и записать выводы.

8. Пункты 2-7 упражнений повторить для схемы двухполупериодного выпрямителя. Результаты измерений и расчётов оформить в виде таблицы.

Написать заключение по работе, в котором привести все полученные результаты, их анализ и сравнение с расчётными значениями.

**Таблица 1**

	$R_H$ , кОм	1,6			1		0,5	
	$C1 = C2$ , мкФ	0	20	50	50	50	50	50
<b>Однополупериодная схема</b>								
$U_{max}$								
$U_{min}$								
$U_{cp}$								
$k_n$								
$I, A$								
$U_{R_H}, B$								
$K_{ПД} = P_{ВЫХ}/P_{ВХ}$								
<b>Двухполупериодная схема</b>								
$U_{max}$								
$U_{min}$								
$U_{cp}$								
$k_n$								
$I, A$								
$U_{R_H}, B$								
$K_{ПД} = P_{ВЫХ}/P_{ВХ}$								

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение действующего и среднего значения переменного тока.
2. Назовите 3 основных элемента схемы любого выпрямителя и перечислите основные его характеристики.
3. Объясните принцип работы полупроводникового диода, нарисуйте и объясните ход прямой и обратной ветвей ВАХ. В чем заключается эффект выпрямления?
4. Нарисуйте принципиальную схему однополупериодного выпрямителя и график изменения напряжения на его выходе. Объясните принцип его работы.
5. Нарисуйте принципиальную схему двухполупериодного выпрямителя и график изменения напряжения на его выходе. Объясните принцип его работы.
6. Частота пульсаций  $f_n$  и кратность пульсаций  $f_n/f$  в выпрямителях. Как вычисляется коэффициент пульсаций выпрямителя при отсутствии фильтра?
7. Чем отличается схема выпрямления Миткевича от мостовой схемы, каковы преимущества и недостатки схем?

8. Принцип действия сглаживающих фильтров в выпрямителях. Как включаются индуктивность и ёмкость фильтра по отношению к нагрузке? Схема LC-фильтра.

9. Объясните график временной зависимости выходного напряжения. Как по этому графику определить коэффициент пульсаций?

10. Каков физический смысл постоянной времени  $\tau_{\phi} = C_{\phi}R_n$  ёмкостного фильтра? Какие требования к величине коэффициента пульсаций напряжения питания предъявляются в различных устройствах?

### Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0

2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники: учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0

3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В.И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. – 498 с

4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей: учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

## Лабораторная работа № 4 «Изучение основных свойств избирательных цепей (фильтров)»

**Цель работы:** изучить принципы построения и характеристики различных вариантов фильтров и экспериментально исследовать частотную зависимость передаточных характеристик на примере электрических RC-фильтров.

### Основы теории

Как известно, величина сопротивления реактивных элементов электрической цепи (конденсаторов и катушек) зависит от частоты электрического тока. Это свойство используется для изготовления **фильтров**, с помощью которых можно выделить или отфильтровать электрические сигналы различной частоты.

Электрическими фильтрами называются радиоэлектронные устройства, выделяющие или подавляющие часть спектральных составляющих сигнала за счет особой зависимости их **коэффициента пропускания**  $K_{\text{пр}}$  (отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного) от частоты.

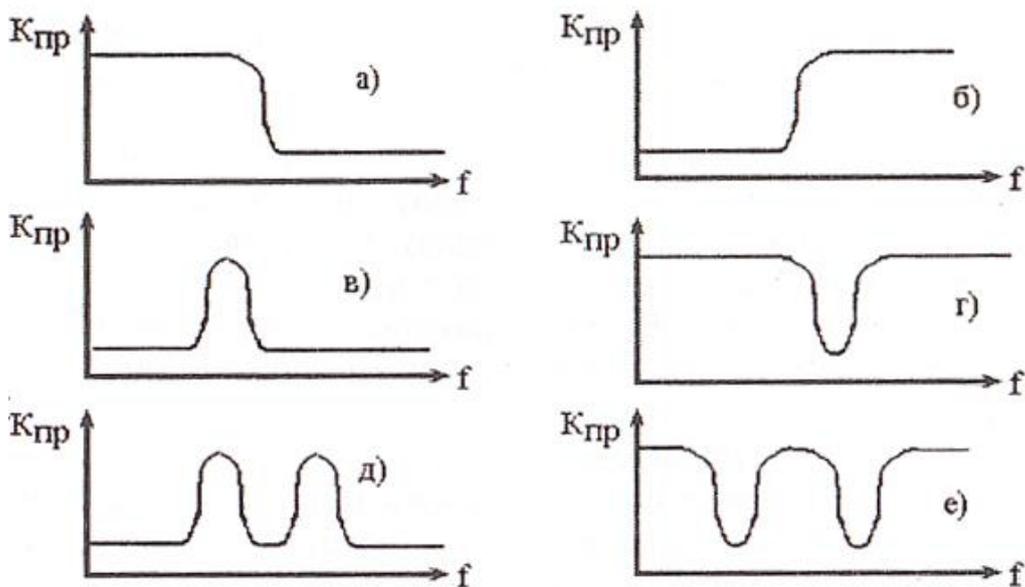


Рис. 1. Характерные частотные характеристики фильтров

Электрические фильтры подразделяются на:

- фильтры низких частот (рис. 1а),
- фильтры высоких частот (рис. 1б),
- полосовые фильтры пропускания (рис. 1в),
- режекторные фильтры (подавления) (рис. 1г),
- гребенчатые фильтры пропускания (рис. 1д) и подавления (рис. 1е).

Назначение фильтров следует из их названия. Например, фильтры низких частот пропускают гармонические составляющие сигнала с частотой ниже некоторой, называемой верхней частотой среза; режекторные – не пропускают гармонические составляющие сигнала в некотором диапазоне частот, и т.д.

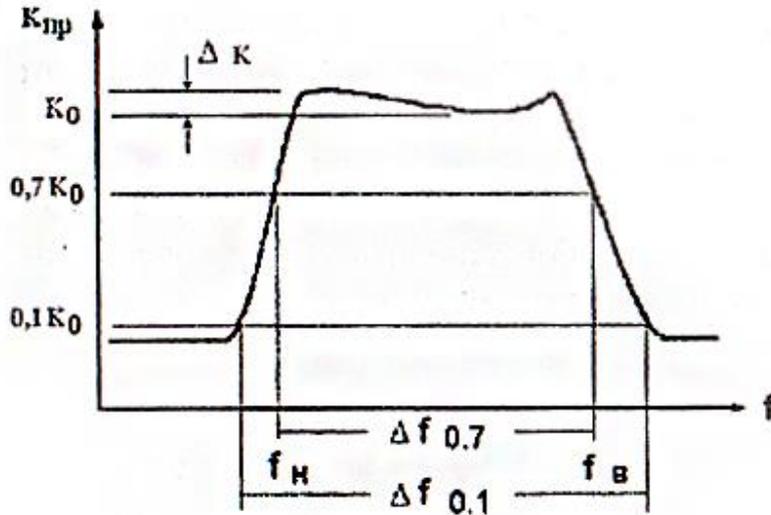


Рис. 2. Основные параметры электрических фильтров

Электрические фильтры характеризуются следующими параметрами (см. рис. 2):

- **частотой среза** (верхней  $f_{\text{В}}$  или нижней  $f_{\text{Н}}$ , или обеими для полосовых фильтров), на которой коэффициент пропускания  $K_{\text{пр}}$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз (на 3 дБ) по сравнению с его средним значением  $K_0$  в полосе пропускания фильтра;
- **полосой пропускания** (подавления)  $\Delta f$  – разностью между верхней и нижней частотами среза ( $\Delta f = f_{\text{В}} - f_{\text{Н}}$ );
- **избирательностью**  $D$ , характеризующей ослабление сигнала в полосе подавления при изменении частоты в два раза (на октаву);  $D = 20 * \lg(K_{\text{пр}}(f)/K_{\text{пр}}(2f))$  (дБ/октаву);
- **коэффициентом прямоугольности** (для полосовых фильтров) – отношением ширины полосы пропускания на уровне  $0,1 K_0$  к ширине полосы пропускания на уровне  $0,7 K_0$ , где  $K_0$  – среднее значение  $K_{\text{пр}}$  в полосе пропускания фильтра (рис. 2).

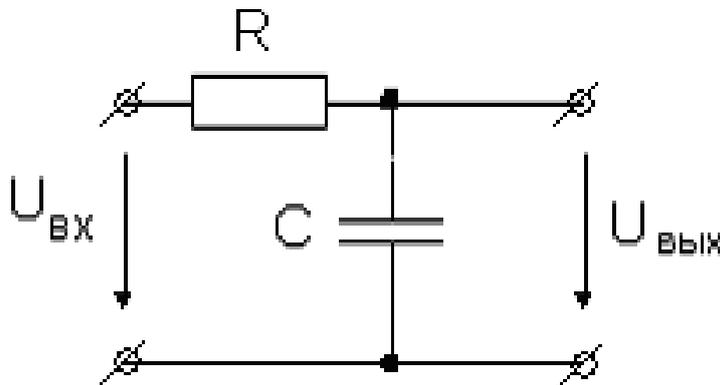


Рис. 3. Схема RC фильтра

Рассмотрим принцип построения и метод расчета одного из возможных вариантов фильтров нижних частот – RC-фильтра. На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема RC-фильтра нижних частот в виде четырехпо-

люсника. Для низкочастотных составляющих сигнала сопротивление (импеданс) конденсатора  $C$  стремится к бесконечности. Поэтому на низких частотах коэффициент передачи схемы близок к 1.

Для высокочастотных составляющих сигнала импеданс конденсатора  $C$  близок к нулю, поэтому напряжение на нем и, следовательно, коэффициент передачи тоже близки к нулю.

Математически это описывается следующим образом. Пусть входное напряжение меняется по гармоническому закону:  $U_{\text{вх}} = U_0 \cos(\omega t)$ .

Тогда полное входное сопротивление (импеданс) цепи в комплексном виде равно

$$Z_{\text{вх}} = R + 1/i\omega C, \quad (1)$$

а его модуль  $|Z_{\text{вх}}| = \sqrt{R^2 - \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ .

Выходное сопротивление четырехполосника равно

$$Z_{\text{вых}} = 1/i\omega C \quad (2)$$

Из закона Ома для цепи переменного тока:  $U_{\text{вх}} = i * Z_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}} = i * Z_{\text{вых}}$  следует:

$$K_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{Z_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}}. \quad (3)$$

Модуль коэффициента пропускания находится из формул (1)-(3):

$$|K_{\text{пр}}| = 1/\sqrt{1 + (\omega RC)^2}. \quad (4)$$

Из формулы (4) можно получить выражение для частоты среза RC-фильтра:  $K_{\text{пр}}(0) = 1, K_{\text{пр}}(f_{\text{ср}}) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi f_{\text{ср}}RC)^2}}$ , откуда  $2\pi f_{\text{ср}}RC = 1$  и  $f_{\text{ср}} = 1/2\pi RC$ .

Избирательность данного фильтра на частоте среза находится следующим образом: на частоте среза  $f_{\text{ср}}$  коэффициент пропускания  $K_{\text{пр}}$  равен  $1/\sqrt{2}$ , а на удвоенной частоте  $K_{\text{пр}}$  равен  $1/\sqrt{5}$ . Тогда

$D = 20 \lg \left( \frac{K_{\text{пр}}(f_{\text{ср}})}{K_{\text{пр}}(2f_{\text{ср}})} \right) = 20 \lg \sqrt{\frac{5}{2}} = 4 \text{ дБ/октаву}$  (точнее, расчет дает около 4 дБ/октаву, но с учетом точных значений).

Величина избирательности 4 дБ/октаву является недостаточной для большинства радиотехнических схем. Как минимум вдвое большей избирательностью обладают фильтры, построенные на LC-элементах.

### Описание экспериментальной установки и метода измерений

Экспериментальная установка состоит из электронного вольтметра В7-39 (или В7-40, В7-41), генератора синусоидальных колебаний ГЗ-33 (или ГЗ-34) и исследуемой схемы (фильтра), собранной на универсальной монтажной плате (рис. 4). Амплитуда и частота выходного напряжения генератора (рис. 5) изменяются ручками соответственно "Выход" (1) и "Частота" (2), а ступенчато – с помощью переключателей (3) и (4).

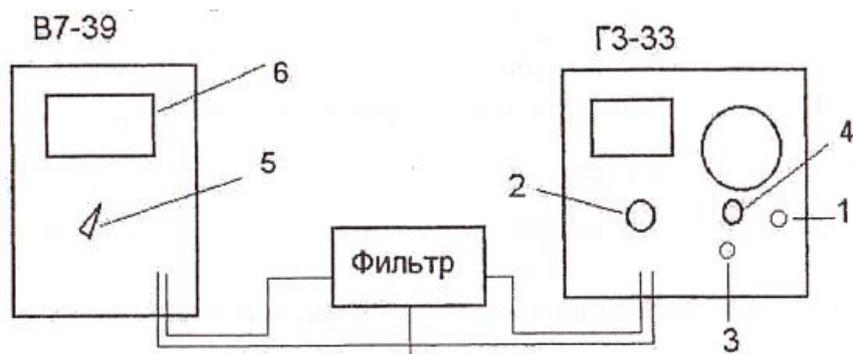


Рис 4. Схема экспериментальной установки

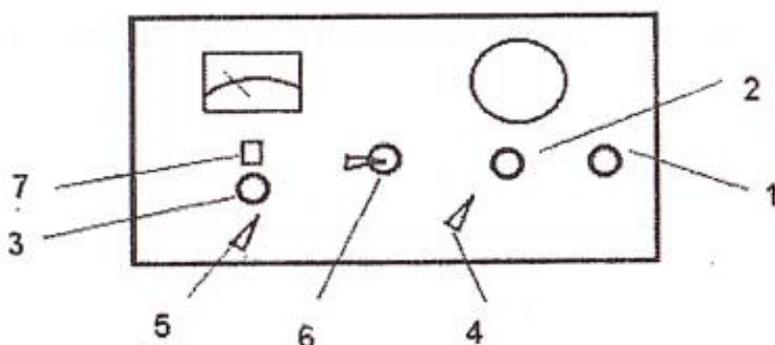


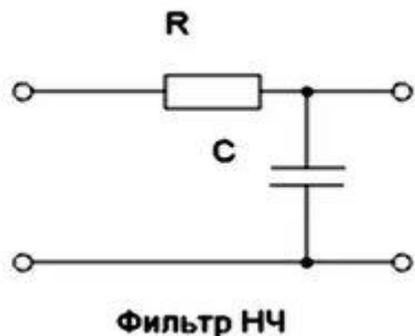
Рис. 5. Панель управления генератора

Для ступенчатого изменения амплитуды необходимо переключатель выходного сопротивления генератора (6) поставить в положение "ВНУТР", а величину этого сопротивления – 600 Ом – установить переключателем (5). Вращением переключателя (3) можно устанавливать желаемое значение максимального выходного напряжения генератора: величина напряжения показывается в окошке (7).

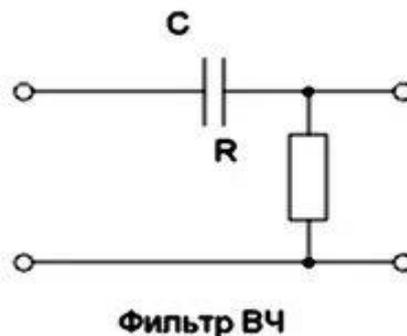
Вольтметр В7-39 является многопредельным. Максимальное значение измеряемого напряжения устанавливается переключателем (5) (рис. 4), в соответствии с положением которого выбираются разные шкалы индикатора (6). При значении диапазона, кратном 10, выбирается верхняя шкала, оканчивающаяся цифрой «10». При диапазоне, кратном 3, выбирается нижняя шкала, оканчивающаяся цифрой «30». Выбор диапазона напряжений вольтметра определяется положением стрелки на шкале прибора. Если стрелка «зашкалила», т. е. ушла вправо за конец шкалы, то надо перейти на более высокий диапазон. Если стрелка отклоняется менее чем на одну треть от длины шкалы, то надо перейти на более низкий диапазон.

Среди радиотехнических элементов лабораторного стенда имеются, в частности, сопротивления (резисторы), конденсаторы и соединительные элементы. Номиналы, указанные на элементах, могут иметь значительную погрешность. Рекомендуемые для данной работы элементы имеют следующие погрешности: конденсаторы – 10 %; резисторы – 5 %. Указанные выше погрешно-

сти необходимо учитывать при вычислении погрешностей теоретических значений характеристик фильтров.

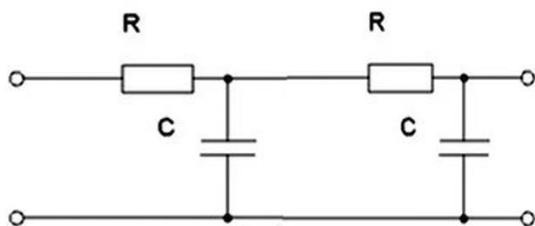


*Рис. 6.* Схема фильтра НЧ

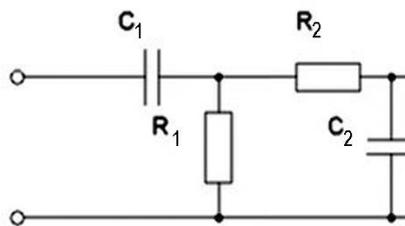


*Рис. 7.* Схема фильтра ВЧ

На рис. 6 и 7 приведены электрические схемы соответственно фильтров нижних (НЧ) и верхних частот (ВЧ) на RC-элементах. Стрелками обозначены входы, на которые подается напряжение с генератора, и выходы, с которых сигналы подаются на вход вольтметра.



*Рис. 8.* Схема двойного фильтра НЧ



*Рис. 9.* Схема полосового фильтра

На рис. 8 приведена принципиальная электрическая схема двухкаскадного (двойного) фильтра нижних частот (Двойной фильтр НЧ). Для получения полосового фильтра пропускания необходимо собрать схему, приведенную на рис. 9. В ходе данной работы необходимо будет измерить зависимость коэффициента пропускания фильтров от частоты входного сигнала и найти такие характеристики фильтров, как частота среза, избирательность и коэффициент прямоугольности.

### Порядок выполнения измерений

1. Внимательно ознакомиться с приборами, находящимися на рабочем столе. Изучить описание вольтметра и генератора.
2. Включить вольтметр и генератор и дать им прогреться 5 минут.
3. Установить ручку переключателя диапазонов вольтметра в положение 10 В. Подать на вход вольтметра сигнал с генератора с частотой  $f = 1$  кГц и амплитудой около 5 В и измерить его величину. Записать величину установ-

ленного напряжения  $U_{вх}$ . В процессе дальнейших измерений величину амплитуды входного напряжения не менять.

4. Собрать на монтажной плате фильтр нижних частот, включив сопротивление  $R = 68 \text{ кОм}$  и конденсатор  $C = 3300 \text{ пФ}$  (рис. 7). Подключить выход генератора и вход вольтметра к схеме.

5. Установить на генераторе частоту  $f = 20 \text{ Гц}$  и измерить амплитуду сигнала на выходе фильтра. Результат занести в таблицу.

6. Провести измерения амплитуды выходного сигнала на фильтре для всех частот, указанных в таблице 1, т. е. для частот 40, 80, 120 Гц и т. д. Результаты занести в строку «НЧ» таблицы.

7. Собрать на монтажной плате второй фильтр НЧ (не разбирая первого) с точно такими же параметрами. Включить оба фильтра в цепь последовательно (см. рис. 8) и измерить частотную зависимость амплитуды сигнала на выходе двойного НЧ-фильтра. Результаты занести в таблицу в строку «Дв НЧ».

8. Собрать фильтр верхних частот из сопротивления  $R = 12 \text{ кОм}$  и конденсатора  $C = 3300 \text{ пФ}$  (рис. 6).

9. Провести измерения амплитуды сигнала на выходе фильтра ВЧ для частот, указанных в таблице. Результаты занести в строку «ВЧ» таблицы.

10. Собрать полосовой фильтр пропускания (рис. 9) со следующими параметрами:  $C_1 = C_2 = 3300 \text{ пФ}$ ,  $R_1 = 68 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 12 \text{ кОм}$ .

11. Провести измерения амплитуды сигнала на выходе полосового фильтра для частот, указанных в таблице. Результаты занести в строку «Полосовой» таблицы.

**Таблица 1**

Фильтр	$f$	Герцы						Килогерцы					
		20	40	80	120	200	800	1,2	2	4	8	12	20
	$U_{вх}, \text{В}$												
НЧ	$U_{вых}, \text{В}$												
ДвНЧ	$U_{вых}, \text{В}$												
ВЧ	$U_{вых}, \text{В}$												
Полосовой	$U_{вых}, \text{В}$												

### Обработка результатов

1. Построить графики зависимости коэффициентов пропускания фильтров от частоты. Для оси частот необходимо выбрать логарифмический масштаб.

2. По построенным графикам найти экспериментальные значения следующих характеристик фильтров:

- частоты среза
- избирательность на частоте среза
- коэффициент прямоугольности и полосу пропускания полосового фильтра

3. Рассчитать теоретические значения верхних и нижних частот среза и избирательности на частоте среза.

4. Оценить погрешности определения теоретических значений частоты среза и избирательности, зная погрешности номиналов RC-элементов.

5. Рассчитать относительное отклонение экспериментальных результатов от теоретических по формуле:

$$\delta = \frac{|f_{\text{экспер}} - f_{\text{расч}}|}{f_{\text{расч}}} * 100\%$$

6. Написать заключение по работе, сделав вывод о совпадении или несовпадении экспериментальных и теоретических результатов. Сравнить параметры одинарного и двойного фильтров.

### **Контрольные вопросы**

1. Дать определение электрических фильтров, их классификацию и основные характеристики.

2. Нарисовать принципиальную схему фильтра НЧ (RC, RL, LC) и вывести формулу частотной зависимости его коэффициента пропускания.

3. Нарисовать принципиальную схему фильтра ВЧ и вывести формулу частотной зависимости коэффициента пропускания.

4. Привести схемы простейших полосовых фильтров пропускания и объяснить принцип их действия.

5. Привести схемы простейших режекторных фильтров и объяснить принцип их действия.

### **Литература**

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы: учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0

2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0

3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В.И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. – 498 с.

4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей: учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва: ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

5. Бобровников В. З. Радиотехника и электроника: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Недра, 1980. – § 49–56.

6. Основы радиоэлектроники: учебное пособие / под ред. Г. Д. Петрухина. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – § 8.2.

## Лабораторная работа № 5 «Снятие вольт-амперных характеристик нелинейных элементов на постоянном токе»

**Цель работы:** экспериментальное снятие и построение графиков вольт-амперных характеристик (ВАХ) различных нелинейных элементов: лампы накаливания, стабилитрона, полупроводникового диода и р-п-р-транзистора (при трёх значениях тока базы), а также анализ их свойств на основе полученных данных.

### Общие сведения

#### Виды и характеристики нелинейных элементов

**Вольт-амперная характеристика (ВАХ)** некоторого элемента электрической цепи (ЭЦ) представляет собой график зависимости напряжения от тока  $U(I)$  или наоборот – тока от напряжения  $I(U)$  на данном участке.

Если вольт-амперная характеристика элемента (например, резистора) представляет собой прямую линию  $U = RI$  (рис. 1), то такой элемент электрической цепи называют линейным (ЛЭ).

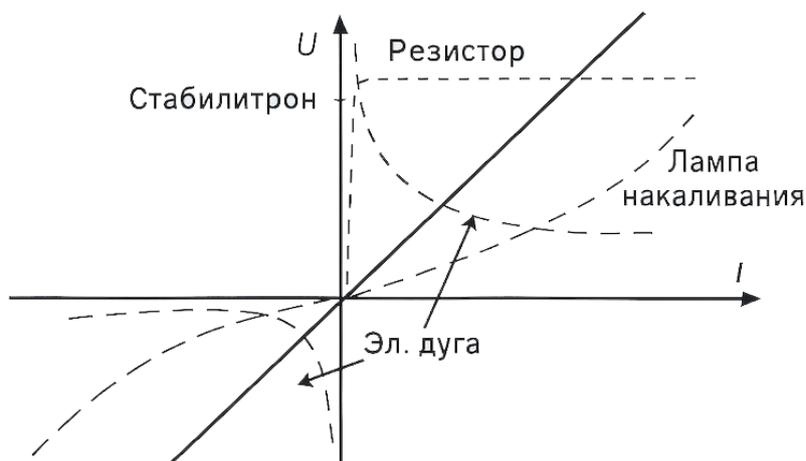


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики различных радиотехнических элементов

Для ряда элементов (лампы накаливания, электрическая дуга, диоды, транзисторы и другие электронные приборы) эта зависимость более сложная и часто неоднозначная (рис. 1). Элемент ЭЦ с нелинейной вольт-амперной характеристикой является нелинейным элементом (НЭ). Наличие в ЭЦ хотя бы одного НЭ делает ее нелинейной ЭЦ.

Все пассивные элементы  $R, L, C$  могут быть линейными или нелинейными; в последнем случае их обозначают так, как показано на рис. 2.



Рис. 2. Схематические изображения радиотехнических элементов

Нелинейные элементы могут иметь монотонную, N-или S-образную вольт-амперную характеристику (рис. 3). Для НЭ, управляемых с помощью внешних воздействий, положение ВАХ может изменяться, что порождает целое «семейство» ВАХ, построенных для различных управляющих воздействий. Например, для радиолампы, транзистора и других приборов известны «семейства» анодных, сеточных, коллекторных, эмиттерных и прочих характеристик.



Рис. 3. Характерный вид ВАХ

Наиболее распространены резистивные НЭ: лампы накаливания, барреторы (стабилизаторы тока), термисторы, терморезисторы, стабилитроны (стабилизаторы напряжения), неоновые лампы, ламповые и полупроводниковые диоды и триоды, разрядники и др. В магнитных цепях используются нелинейные индуктивности; в системах автоматики и управления используются нелинейные емкости (варикапы).

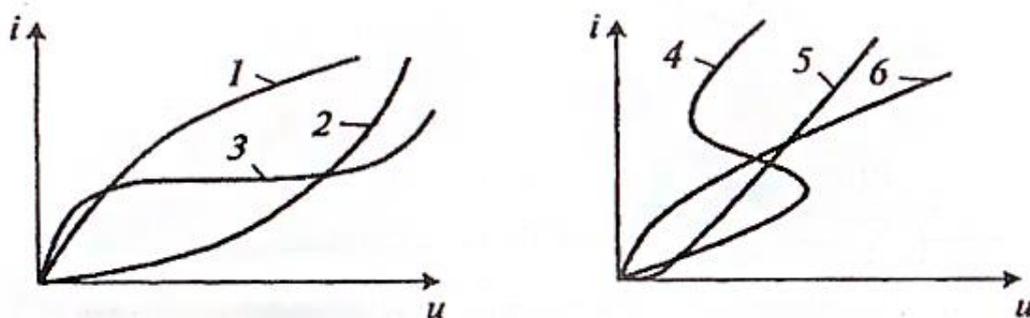


Рис. 4. ВАХ нелинейных радиотехнических элементов

На рис. 4 приведены ВАХ наиболее распространенных резистивных НЭ: 1 – лампы накаливания с вольфрамовой нитью; 2 – лампы накаливания с угольной нитью; 3 – барреторы; 4 – стабилитроны, неоновые лампы; 5 – полупроводниковые диоды; 6 – ламповые диоды.

## Основные параметры НЭ

1. статическое сопротивление  $R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{1}{G_o}$ ;
2. динамическое сопротивление  $R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1}{S}$  – или крутизна  $S$ .

Точка  $P$  называется **рабочей точкой ВАХ**, определяющей статический режим работы НЭ, т. е. при отсутствии переменных воздействий (режим постоянного тока). Статическое сопротивление пропорционально  $ctg\alpha$ , а динамическое – пропорционально  $ctg\beta$ .

Сопротивление  $R_o$  всегда больше 0, а  $R_d$  зависит от вида ВАХ: для их возрастающих участков  $R_d > 0$ , а для спадающих («падающих»)  $R_d < 0$ .

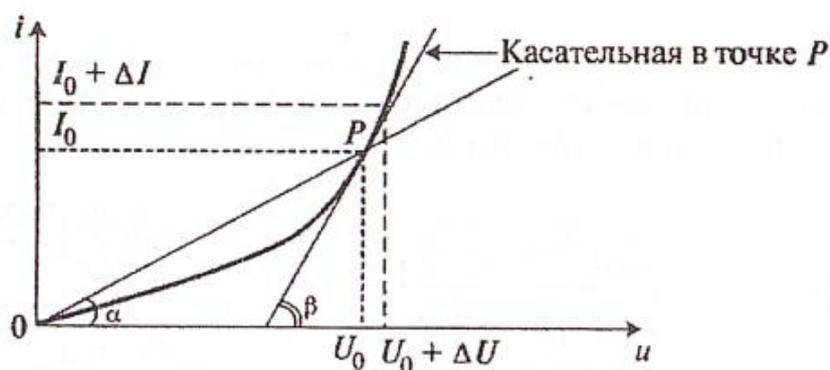


Рис. 5. К определению рабочей точки ВАХ

Нелинейные элементы со спадающим участком ВАХ (например, туннельный диод, неоновая лампа и др.) называют **негатронами**, т. к. они способны на этом участке отбирать электрическую энергию, т. е. генерировать и усиливать электрические сигналы.

Чем больше разница между  $R$  и  $R_d$ , тем больше нелинейность ВАХ (нелинейные свойства НЭ). Параметр «крутизна ВАХ»  $S = 1/R_d$  широко используется при анализе работы радиоламп, транзисторов и других НЭ.

## Графические методы анализа нелинейных цепей

Последовательное или параллельное соединение нескольких НЭ удобно анализировать с помощью обобщенной ВАХ нелинейной цепи, полученной графическим объединением ВАХ всех НЭ. При этом учет влияния источников сводится к смещению обобщенной ВАХ по оси абсцисс (для источника напряжения) или по оси ординат (для источника тока).

На рис. 6 приведен пример последовательного соединения линейного и двух нелинейных элементов.

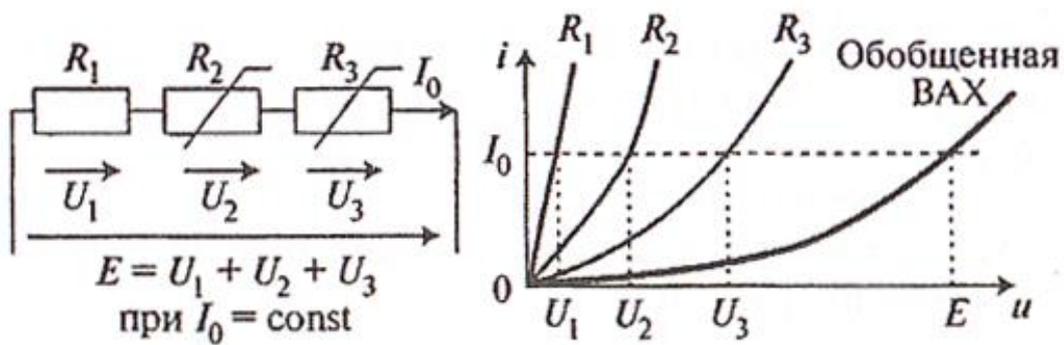


Рис. 6. Последовательное соединение линейного и нелинейного элементов

Иногда целесообразно применять метод опрокинутой ВАХ (рис. 7). Он удобен для определения рабочей точки на ВАХ НЭ при изменении величины  $R$ .

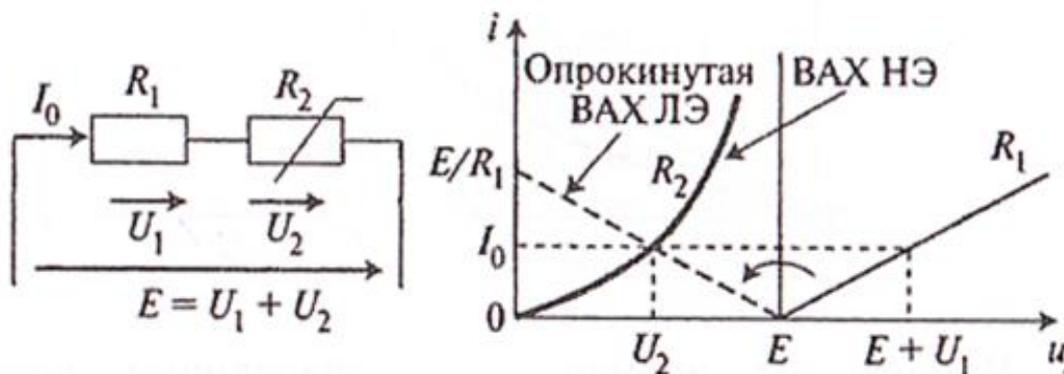


Рис. 7. Общий вид опрокинутой ВАХ

На рис. 8 приведен пример параллельного соединения линейного и двух нелинейных элементов.

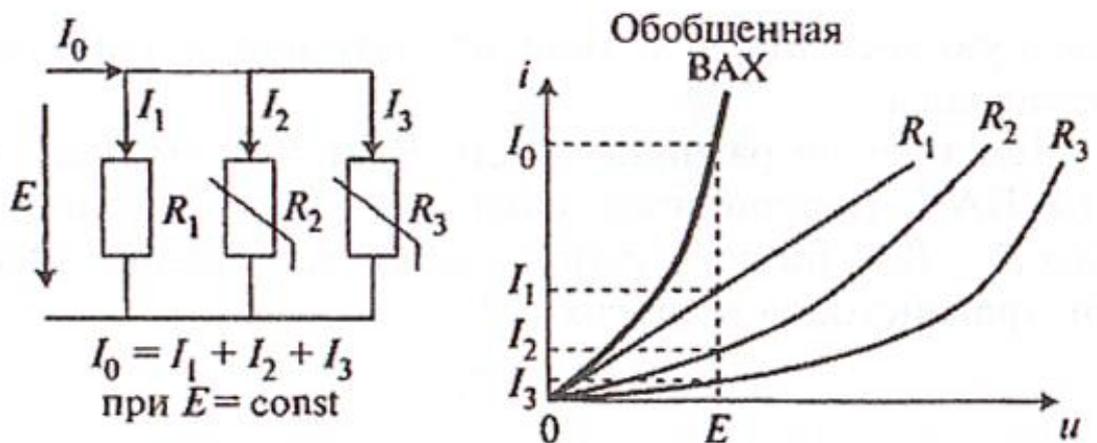


Рис. 8. Параллельное соединение линейного и нелинейного элементов

При *смешанном* (параллельном и последовательном) соединении НЭ задача построения обобщенной ВАХ решается последовательно: сначала строится ВАХ для параллельно соединенных НЭ, а затем – для последовательно соединенных НЭ (рис. 9).

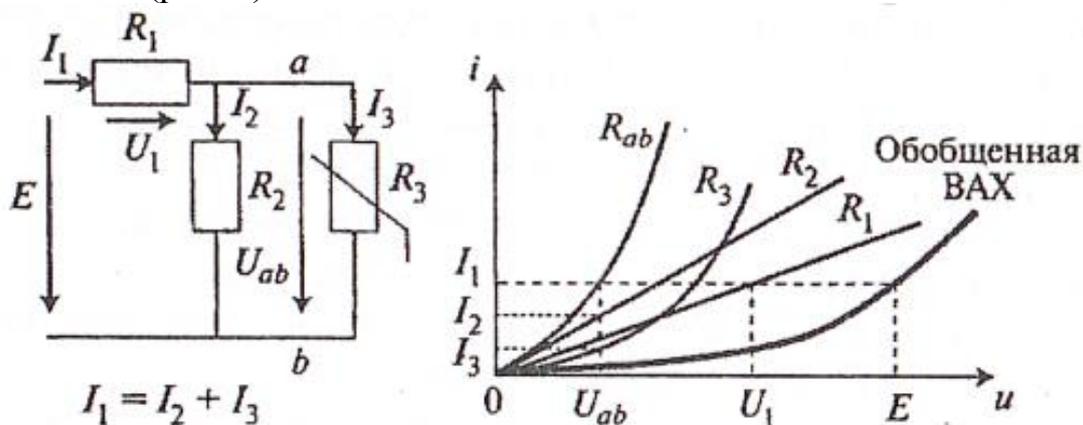


Рис. 9. Смешанное соединение линейных и нелинейных элементов

### Методы снятия ВАХ

Две принципиальные схемы для снятия вольт-амперных характеристик на постоянном токе изображены на рис. 10а и 10б.

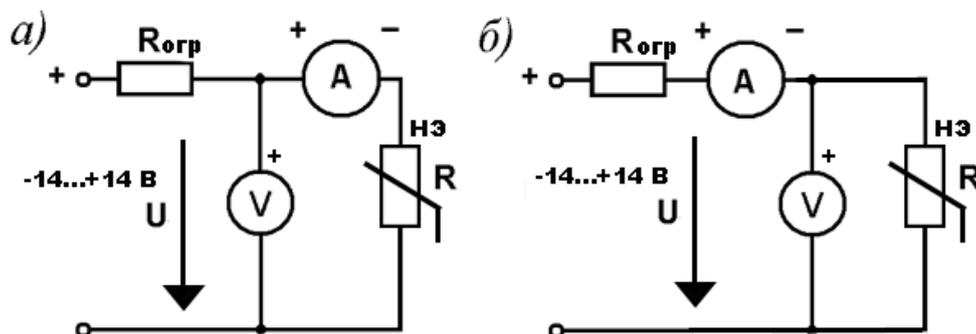


Рис. 10. Схемы измерения ВАХ

В них используется регулируемый источник постоянного напряжения, а резистор  $R$ . Схема (а) называется *схемой измерения с погрешностью по напряжению*. Она используется в том случае, когда сопротивление испытуемого элемента велико по сравнению с сопротивлением амперметра. Тогда показание вольтметра близко к напряжению на элементе, хотя фактически он измеряет сумму напряжений на данном элементе и амперметре.

Вторая схема (б) называется *схемой измерения с погрешностью по току*. Здесь амперметр фактически измеряет сумму токов в данном элементе и вольтметре. Эта схема используется, если сопротивление испытуемого элемента мало по сравнению с сопротивлением вольтметра. Тогда ток вольтметра гораздо меньше тока в испытуемом элементе и им можно пренебречь.

В этих схемах резистор  $R$  служит для ограничения тока в цепи при малых сопротивлениях исследуемых элементов.

В данной работе по схеме (а) снимаются вольт-амперные характеристики лампы накаливания, прямая ветвь характеристики стабилитрона и обратная ветвь характеристики полупроводникового диода. По схеме (б) снимаются обратная ветвь характеристики стабилитрона, прямая ветвь характеристики полупроводникового диода и характеристики р-п-р-транзистора.

Полупроводниковый прибор р-п-р-транзистор имеет три вывода: эмиттер (э), коллектор (к) и база (б). Если между базой и эмиттером прикладывать небольшое напряжение, то можно управлять значительным током, протекающим от коллектора к эмиттеру. Таким образом, транзистор имеет управляемую вольт-амперную характеристику. Принципиальная схема для снятия вольт-амперных характеристик транзистора и их вид при различных токах базы показаны на рис. 11.

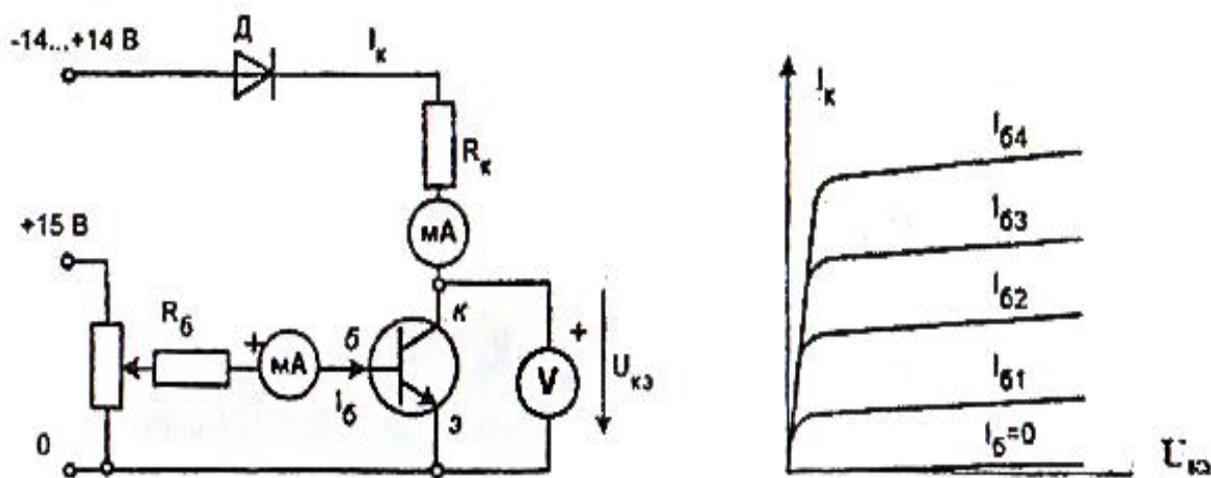


Рис. 11. Схема измерения ВАХ транзистора

### Экспериментальная часть

**Задание.** Снять экспериментально и построить графики вольт-амперных характеристик лампы накаливания, стабилитрона, полупроводникового диода, р-п-р-транзистора при трёх значениях тока базы.

### Порядок выполнения работы

1. Соберите цепь (рис. 10а) для снятия вольт-амперной характеристики лампы накаливания. Монтажная схема изображена на рис. 12. Обратите внимание, что вольтметр и амперметр в этой схеме своими положительными клеммами подключены к точке «А».

2. Изменяя ток в цепи, как показано в табл. 1, запишите в табл. 1 соответствующие значения напряжения на лампе и постройте график вольт-амперной характеристики лампы накаливания на рис. 13.

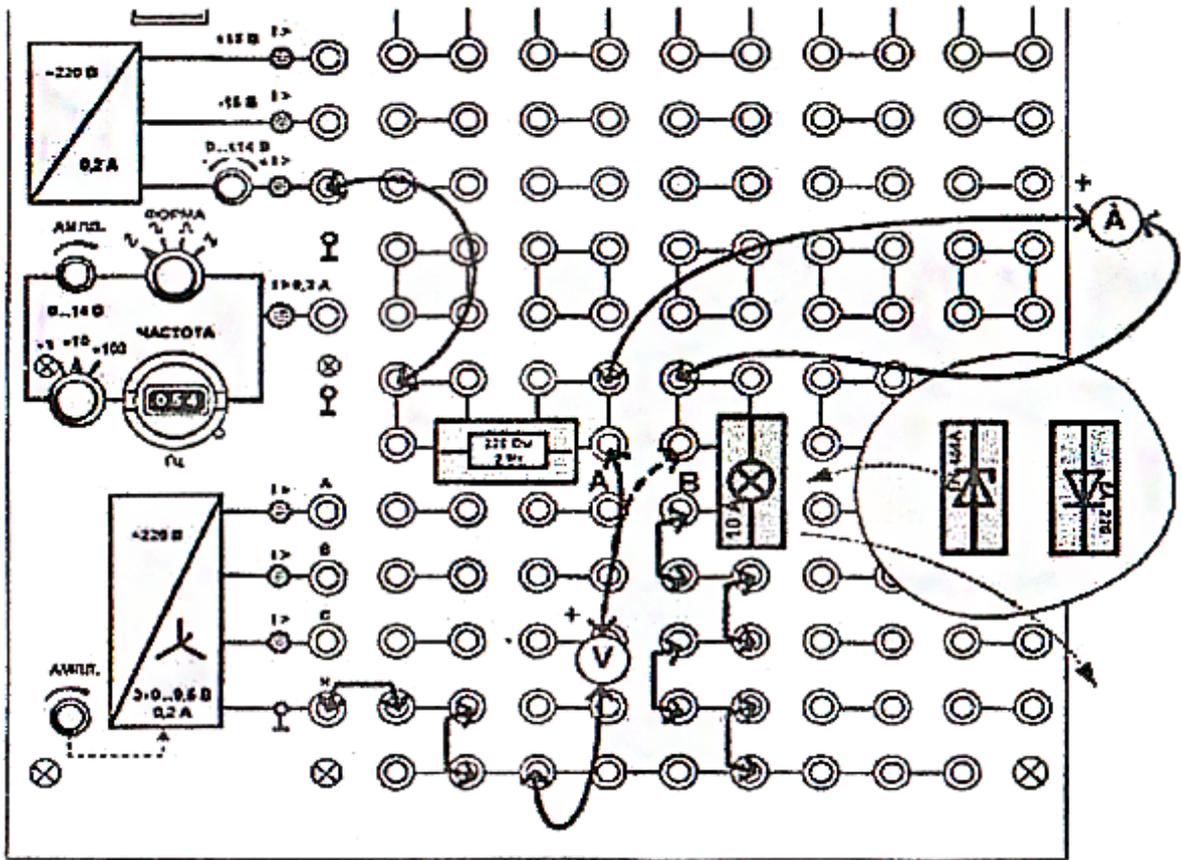


Рис. 12. Монтажная схема установки

Таблица 1

$I, \text{ mA}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$U, \text{ B}$									

3. Замените лампу накаливания стабилитроном, соблюдая полярность, показанную на рис. 12, и снимите его вольт-амперную характеристику, устанавливая либо напряжения, либо токи, указанные в табл. 2. Для увеличения точности при отрицательных напряжениях и токах вольтметр должен быть подключён к точке «В», а при положительных – к точке «А». График вольт-амперной характеристики стабилитрона постройте на рис. 13.

Таблица 2

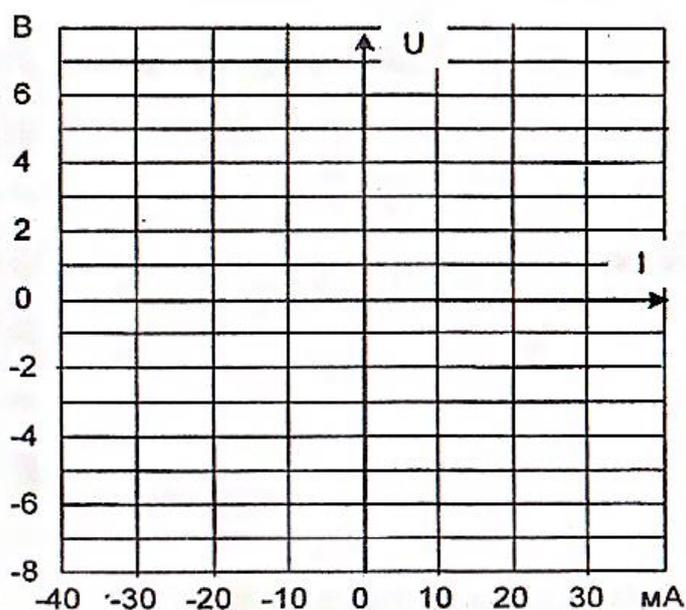
$I, \text{ mA}$	-40	-20	0					4	10	20	40
$U, \text{ B}$				1	2	3	4				

4. Замените стабилитрон диодом и, устанавливая токи или напряжения, указанные в табл. 3, снимите его вольт-амперную характеристику. В этом опыте, наоборот, при отрицательных напряжениях и токах вольтметр должен быть

подключён к точке «А», а при положительных – к точке «В». График вольт-амперной характеристики диода постройте на том же рис. 13.

**Таблица 3**

$I, \text{мА}$						2	10	20	30	40
$U, \text{В}$	-8	-6	-4	-2	0					



**Рис. 13.** Рекомендация для построения ВАХ

5. Для снятия вольт-амперных характеристик транзистора соберите цепь по принципиальной схеме (рис. 11). Монтажная схема показана на рис. 14.

6. Установите максимальное напряжение на выходе регулируемого источника и отрегулируйте потенциометром ток базы так, чтобы ток коллектора составлял 8...12 мА. Запишите это первое значение тока базы в табл. 4.

**Таблица 4**

$I_{\text{б1}} \dots, \text{мА}$	$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	1	2	4	6	8	10	12
	$I_{\text{к}}, \text{мА}$							
$I_{\text{б2}} \dots, \text{мА}$	$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	1	1,5	2	4	6	8	10
	$I_{\text{к}}, \text{мА}$							
$I_{\text{б3}} \dots, \text{мА}$	$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	1	1,5	2	2,5	3	4	6
	$I_{\text{к}}, \text{мА}$							

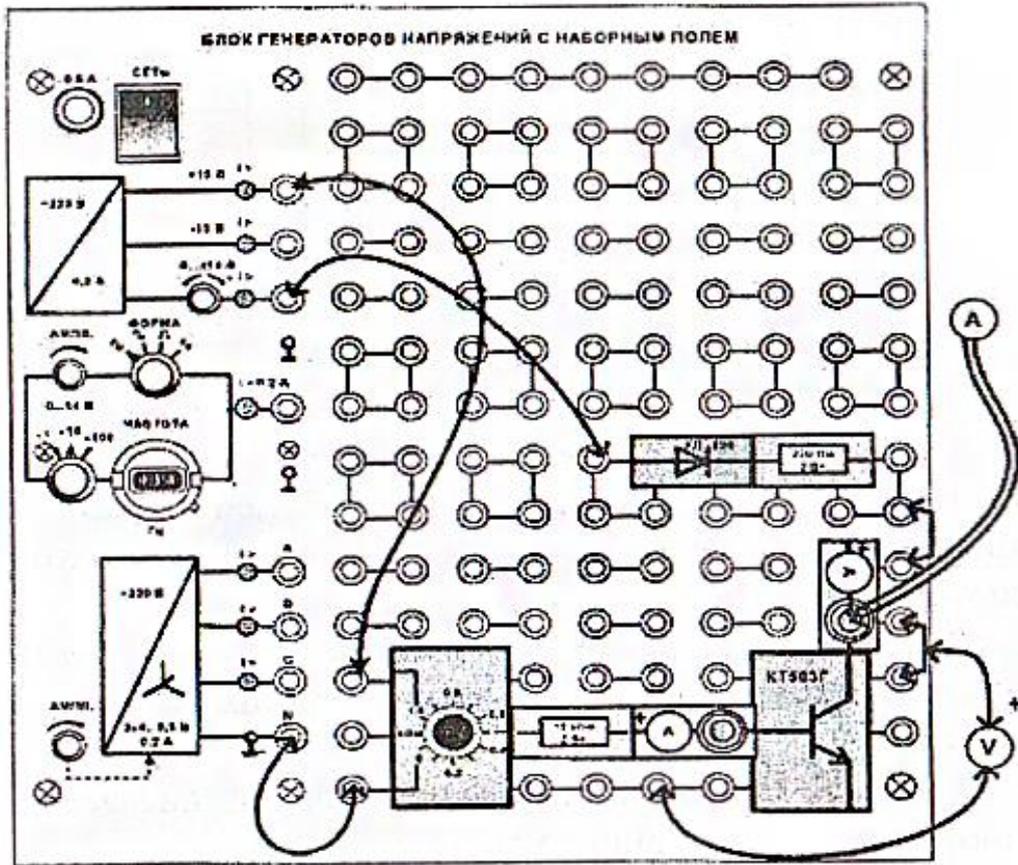


Рис. 14. Монтажная схема для измерения ВАХ транзистора

7. Уменьшая напряжение, подаваемое на коллектор, снимите вольт-амперную характеристику и постройте её график на рис. 15.

8. Снова установите максимальное напряжение на коллекторе и отрегулируйте ток базы так, чтобы ток коллектора составлял 20...25 мА. Запишите новое значение тока базы, снимите и постройте новую вольт-амперную характеристику.

9. Ещё раз установите максимальное напряжение на коллекторе и отрегулируйте ток базы так, чтобы теперь ток коллектора составлял 35...40 мА. Снимите и постройте третью вольт-амперную характеристику.

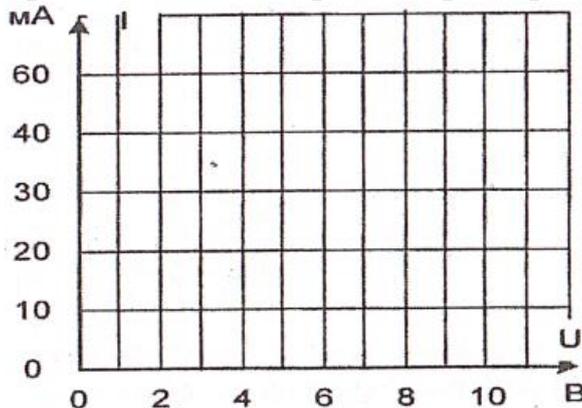


Рис. 15. Рекомендация для построения ВАХ транзистора

### Контрольные вопросы

1. Какие элементы электрической цепи называются нелинейными? Приведите примеры нелинейных элементов и вид их вольт-амперной характеристики.
2. Приведите примеры технических задач, которые позволяют решать нелинейные элементы. В каких устройствах они используются?
3. Дайте определение статистического и дифференциального сопротивления нелинейного элемента.
4. Как построить результирующую вольтамперную характеристику (ВАХ) части цепи, содержащей последовательно или параллельно соединенные нелинейные элементы с известными ВАХ?
5. Объясните вид вольт-амперной характеристики полупроводникового диода в случае прямого и обратного смещения.
6. Объясните принцип работы полупроводникового стабилитрона, вид вольт-амперной характеристики и схему включения стабилитрона.
7. Опишите принцип работы полупроводникового транзистора и схемы его включения.

### Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0
2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0
3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В. И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. – 498 с.
4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.
5. Бобровников Л. З. Радиотехника и электроника: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Недра, 1980. § 9.
6. Основы радиоэлектроники: учебное пособие / под ред. Г. Д. Петрухина. – М.: Изд-во МАИ, 1993. § 3.1-3.3.
7. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000.

## Лабораторная работа № 6 «Исследование двухкаскадного транзисторного усилителя»

**Цель работы:** исследование принципов работы и характеристик двухкаскадного транзисторного усилителя, включая анализ его схемы, параметров усиления, амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), влияния отрицательной обратной связи на стабильность и искажения, а также изучение роли эмиттерных повторителей в качестве буферных каскадов. В ходе эксперимента будут измерены основные параметры, такие как коэффициент усиления по напряжению, входное и выходное сопротивления, и оценены области применения в аналоговой электронике для усиления сигналов без значительных потерь.

### Общие сведения

Любой усилитель содержит источник питания (как правило, источник постоянного напряжения), управляемый нелинейный элемент, обладающий семейством вольт-амперных характеристик (например, транзистор, электронная лампа или операционный усилитель), и нагрузочный элемент (резистор, трансформатор и т. д.).

Усиление электрических сигналов осуществляется за счет энергии источника питания, а собственно усилитель играет роль управляющего элемента, который регулирует энергию, поступающую от источника питания к нагрузке. При этом сам усилитель также потребляет от источника небольшое количество энергии на своё функционирование.

Основными параметрами усилителя являются:

1. **Коэффициенты усиления** по напряжению, току и мощности, которые представляют собой отношение выходной величины к соответствующей входной:

- Коэффициент усиления по напряжению:  $K_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$
- Коэффициент усиления по току:  $K_I = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}}$
- Коэффициент усиления по мощности:  $K_P = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$

2. **Амплитудная характеристика**  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ , представляющая собой зависимость выходного напряжения от входного при постоянной частоте сигнала. Эта характеристика показывает, как усилитель реагирует на изменения амплитуды входного сигнала, и идеально должна быть линейной для минимизации искажений.

3. **Амплитудно-частотная характеристика**  $K(f)$ , представляющая собой зависимость коэффициента усиления (обычно по напряжению) от частоты входного сигнала при неизменной амплитуде синусоидального входного сигнала. Она иллюстрирует полосу пропускания усилителя и его способность усиливать сигналы на разных частотах.

Для увеличения коэффициента усиления и улучшения характеристик усилителя используют многокаскадные усилители с трансформаторной, гальванической или активно-ёмкостной связью между каскадами. Коэффициент уси-

ления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots$

Для изменения коэффициента усиления, улучшения других характеристик (в частности, уменьшения зависимости от температуры характеристик транзисторного усилителя) или придания усилителю каких-либо особых свойств используют **обратные связи** (например, отрицательную обратную связь для стабилизации работы и снижения искажений). Это позволяет оптимизировать работу усилителя в различных условиях эксплуатации. **Обратная связь (ОС)** – это воздействие части выходного сигнала на вход усилителя. Если эта часть выходного сигнала складывается с входным сигналом, то такая связь называется положительной; если вычитается из входного сигнала – отрицательной.

Различают три основные схемы усилительных каскадов на биполярных транзисторах: **с общим эмиттером (ОЭ)**, **с общим коллектором (ОК)** и **с общей базой (ОБ)**. В первой схеме эмиттер транзистора является общей точкой для напряжений входного и выходного сигналов. Во второй схеме такой общей точкой является коллектор, а в третьей – база.

**Схема с общим эмиттером** обеспечивает наибольший коэффициент усиления по мощности, но она обладает большим выходным сопротивлением, что не позволяет использовать её для нагрузки с малым сопротивлением.

**Схема с общим коллектором** (эмиттерный повторитель) имеет большой коэффициент усиления по току, а по напряжению он близок к единице. Эта схема обладает низким выходным сопротивлением и большим входным сопротивлением. Поэтому она часто используется в качестве выходного каскада.

**Схема с общей базой** имеет большой коэффициент усиления по напряжению, тогда как коэффициент усиления по току близок к единице.

Вид амплитудной характеристики транзисторного усилителя изображён на рис. 1а. Характеристика близка к линейной только на рабочем участке *bc*. На нём форма выходного сигнала почти повторяет форму входного сигнала. На начальном нелинейном участке *ab* уровень собственных шумов и утечек усилителя соизмерим с входным сигналом. На конечном участке *cd* также имеют место нелинейные искажения из-за насыщения транзистора.

Вид амплитудно-частотной характеристики представлен на рис. 1б. Эта характеристика изображается обычно в логарифмическом масштабе по оси абсцисс, т. е. по оси  $f$  откладывается не сама частота, а десятичный логарифм частоты. Это позволяет на одном рисунке отобразить всю характеристику при большом диапазоне изменения частоты. Уменьшение коэффициента усиления на нижних частотах объясняется влиянием разделительных конденсаторов, сопротивление которых увеличивается при понижении частоты. На верхних частотах коэффициент усиления уменьшается вследствие шунтирующего действия паразитных ёмкостей.

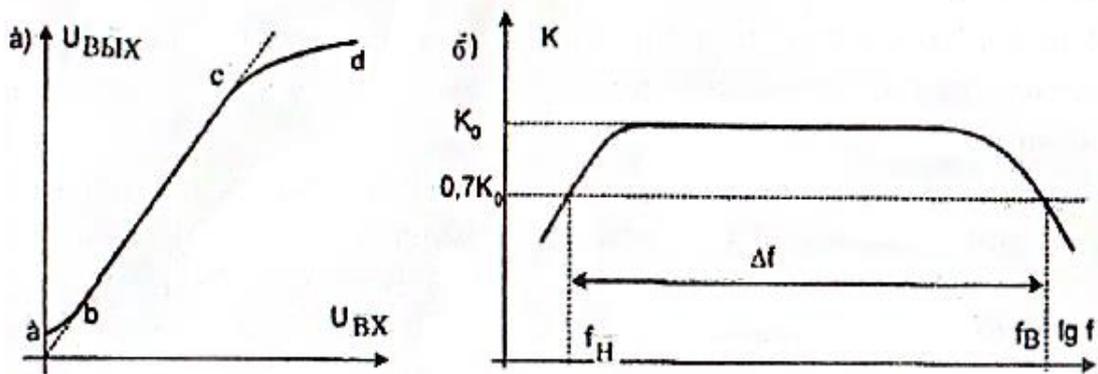


Рис. 1. Общий вид амплитудной характеристики усилителя

На рис. 1б показано:  $f_H$  – нижняя граничная частота, ниже которой напряжение на выходе снижается более чем в 2 раза;  $f_B$  – верхняя граничная частота, выше которой напряжение также снижается более чем в 2 раза;  $\Delta f$  – рабочий диапазон частот или полоса пропускания усилителя.

Принципиальная схема исследуемой установки изображена на рис. 2.

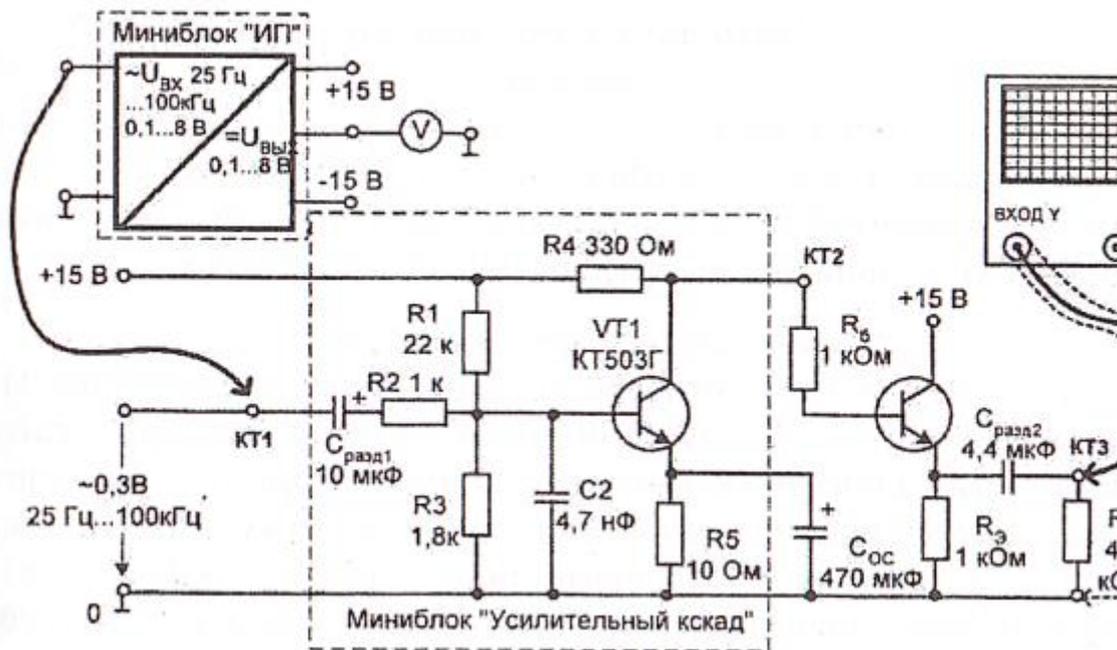


Рис. 2. Принципиальная схема транзисторного усилителя

Двухкаскадный усилитель состоит из мини-блока «Усилительный каскад с общим эмиттером» и эмиттерного повторителя, собранного на транзисторе. Разделительный конденсатор  $C_{разд1}$ , встроенный в мини-блок на входе усилителя, позволяет избежать влияния сопротивления источника сигналов на положение точки покоя транзистора, которая задаётся делителем  $R_1, R_3$ . Сопротивле-

ние на входе  $R_2$  служит для ограничения входного тока и вместе с шунтирующим конденсатором  $C_2$  для подавления высокочастотных самовозбуждений. Резистор  $R_5$  образует отрицательную обратную связь для уменьшения коэффициента усиления и повышения температурной стабильности усилителя. Конденсатор  $C_{ос}$ , устанавливаемый снаружи мини-блока, позволяет исключить отрицательную обратную связь для переменного напряжения и тем самым увеличить коэффициент усиления. При этом отрицательная обратная связь сохраняется для постоянного и низкочастотного сигналов. Разделительный конденсатор  $C_{разд}$  на выходе второго каскада усилителя служит для выделения переменного сигнала на нагрузке  $R_H$ .

Для наблюдения формы входного и выходного сигналов в схему включён осциллограф, по которому можно заметить искажения выходного сигнала при слишком большом уровне сигнала на входе.

Для измерения входного и выходного напряжений служит измерительный блок «Измерительный преобразователь» («ИП»). Постоянное напряжение на его выходе равно действующему значению синусоидального напряжения на входе. Непосредственное измерение синусоидального напряжения мультиметром в данной работе невозможно, т. к. его частотный диапазон ограничен от 40 до 100 Гц. К этому мини-блоку необходимо подвести питание + и – 15 В, а также подсоединить к нему общую точку источника (0).

В ходе работы входной зажим Измерительного преобразователя подключается к контрольным точкам  $KT1, KT2, KT3$ , а вольтметр постоянного напряжения всегда остаётся подключённым к выходным зажимам Измерительного преобразователя. Необходимо своевременно переключить пределы измерения мультиметра в соответствии с уровнем измеряемого напряжения.

### Экспериментальная часть

**Задание.** Снять экспериментально основные параметры и характеристики двухкаскадного транзисторного усилителя (коэффициент усиления и амплитудно-частотная характеристика), исследовать влияние на них отрицательной обратной связи.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 2) и монтажной схеме (рис. 3). **При сборке схемы не перепутайте полярность электролитических конденсаторов!** Переведите переключатель рода сигналов генератора напряжений в положение «~» (синусоида) и установите любую частоту от 1 до 10 кГц (переключатель диапазонов – в положении « $\times 10$ », в окошке счётчика – любое число от 100 до 999).

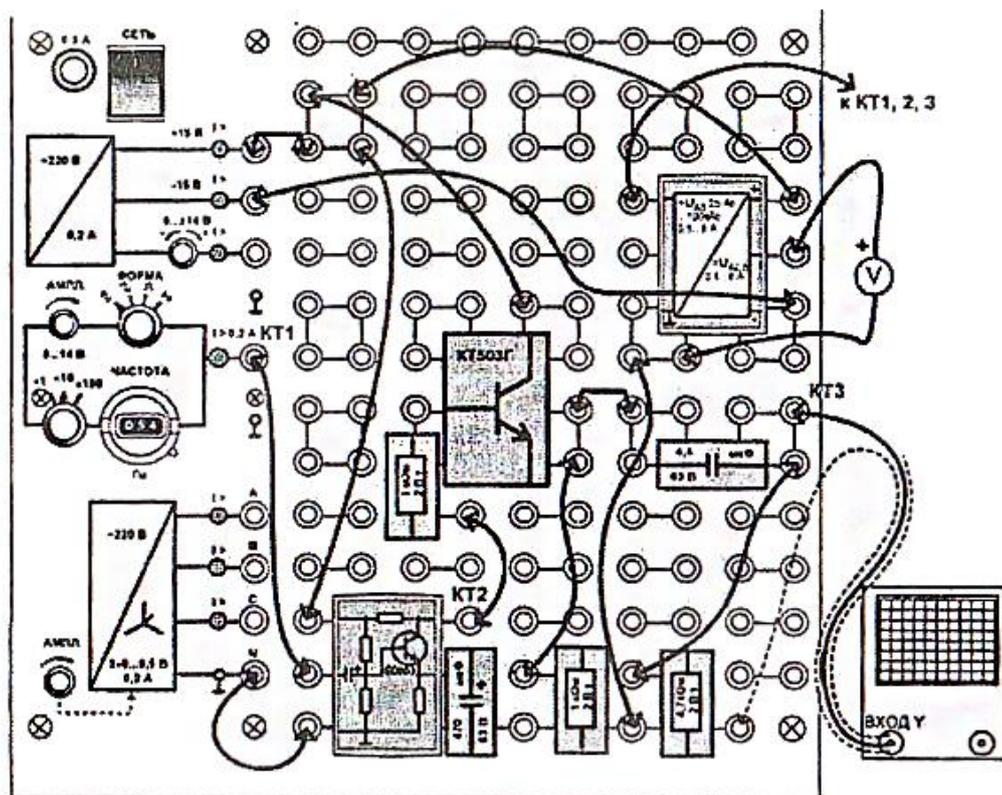


Рис. 3. Монтажная схема установки

2. Включите осциллограф, установите автоматическую развёртку и выведите луч на среднюю линию экрана.

3. Включите генератор напряжений и, регулируя ручкой «Амплитуда», входное напряжение (в контрольной точке КТ1), убедитесь по осциллографу, что как при слишком малом, так и при слишком большом уровне входного сигнала на выходе появляются искажения синусоиды. Для этого необходимо также отрегулировать длительность развёртки осциллографа и уровень синхронизации так, чтобы на экране было изображение одного-двух периодов сигнала.

4. Оставьте регулятор «Амплитуда» в положении, соответствующем максимальному уровню неискажённого выходного сигнала. Измерьте напряжения в контрольных точках КТ1, КТ2 и КТ3 и запишите их в табл. 1 в столбец «Без ОС» (без обратной связи).

5. Выньте из гнезд наборного поля конденсатор  $C_{oc} = 470 \text{ мкФ}$  и снова измерьте и запишите в столбец «С ОС» (с обратной связью) напряжения в контрольных точках.

Таблица 1

Режим работы		Без ОС	С ОС
$U, В$	КТ1		
	КТ2		
	КТ3		
$K_1$			

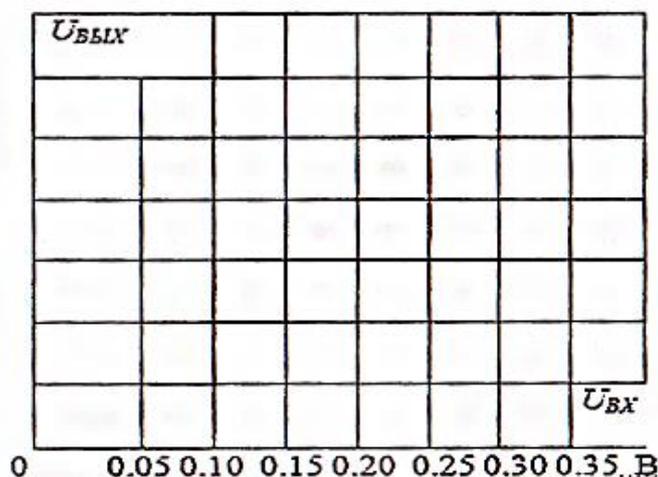
$K_2$		
$K_1 * K_2$		
$K$		

6. Вычислите коэффициенты усиления каждого из двух каскадов, их произведение и общий коэффициент усиления. Убедитесь, что  $K = K_1 \times K_2$ .

7. Для снятия амплитудной характеристики усилителя изменяйте регулятором «Амплитуда» напряжение от 0 до значения, при котором выходное напряжение становится явно искажённым, и записывайте в табл. 2 напряжения на входе (КТ1) и на выходе (КТ3) с обратной связью и без неё.

**Таблица 2**

$U_{ВХ}, В$								
$U_{ВЫХ}, В$ (без ОС)								
$U_{ВЫХ}, В$ (с ОС)								



**Рис. 4.** Рекомендация к построению графика амплитудной характеристики

8. На рис. 4 постройте графики амплитудной характеристики с ОС и без ОС.

9. Для снятия частотной характеристики установите входной сигнал, соответствующий максимальному уровню неискажённого выходного сигнала в цепи без обратной связи (т. е. с конденсатором  $C_{oc}$ ). Запишите это значение в левый столбец табл. 3. Оно не должно изменяться до конца опыта, тем не менее, время от времени проверяйте, а при необходимости и подправляйте его поворотом ручки «Амплитуда». Сделайте это обязательно после перехода на множитель частоты 100, т. к. при этом множителе диапазон регулирования амплитуды выходного сигнала уменьшается.

10. Теперь переведите переключатель диапазонов частот в положение 1 и вращайте ручку счётчика влево до упора. Запишите в табл. 3 первое значение частоты (обычно 20...30 Гц), а также входного и выходного напряжений без обратной связи и с ней.

11. Вращая ручку счётчика вправо, последовательно устанавливайте значения частоты от 0,05 до 1 кГц, указанные в табл. 3, и записывайте выходные напряжения с обратной связью и без неё. После достижения частоты 1 кГц переключите множитель в положение «×10» и, вращая ручку счётчика влево, установите значение в окошке 200, что соответствует частоте 2 кГц. Аналогично после достижения частоты 10 кГц переведите множитель в положение 100, установите в окошке число 200, подрегулируйте уровень входного сигнала и продолжайте опыт до 100 кГц.

12. Вычислите коэффициенты усиления и на рис. 5 постройте графики частотных характеристик с обратной связью и без неё.

Таблица 3

$U_{вх}, В$	$f, кГц$	$U_{вых}, В$ (без ОС)	$U_{вых}, В$ (с ОС)	$K$ без ОС	$K$ с ОС
	0,05				
	0,10				
	0,20				
	0,50				
	1,0				
	2,0				
	5,0				
	10				
	20				
	50				
	100				

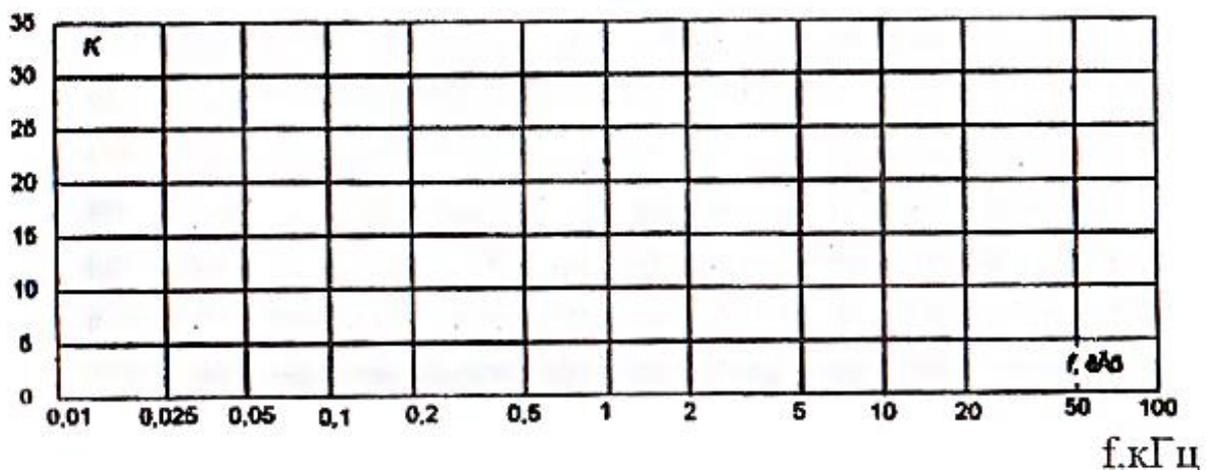


Рис. 5. Рекомендация к построению частотной характеристики усилителя

### **Контрольные вопросы**

1. Назначение и классификация электронных усилителей.
2. Структурная схема включения усилителя в цепь усиления электрического сигнала и условное обозначение усилителей на схемах.
3. Важнейшие параметры и характеристики усилителя.
4. Приведите типовую схему усилителя на биполярном транзисторе, включённого по схеме с общим эмиттером, и обоснуйте назначение его элементов.
5. Что понимается под обратной связью в усилителях и какая обратная связь называется положительной или отрицательной?
6. Какими свойствами отличаются три основные схемы усилительных каскадов на биполярных транзисторах (с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) и с общей базой (ОБ))?
7. Какой вид имеют амплитудная и амплитудно-частотная характеристики транзисторного усилителя? Как объяснить их ход и как исследовать экспериментально?

### **Литература**

1. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий: учебное пособие / А. С. Глинченко, Н. М. Егоров, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 352 с. – ISBN 5-94074-416-8
2. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы: учебное пособие / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 9-е изд. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 480 с.
3. Кахозеф. Проектирование и изготовление электронной аппаратуры. – М.: Мир, 1986. – 387 с.
4. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.

## Лабораторная работа № 7 «Изучение работы RS-триггера, мультивибратора и одновибратора»

**Цель работы:** изучение принципов работы и характеристик основных импульсных устройств на базе транзисторов: RS-триггера (как основы для логических элементов и запоминающих устройств), мультивибратора (автоколебательного генератора прямоугольных импульсов) и одновибратора (реле времени для формирования одиночных импульсов заданной длительности).

### Общие сведения

#### Введение

В данной лабораторной работе рассматриваются основные типы импульсных устройств на базе транзисторов: RS-триггер, мультивибратор и одновибратор. Эти схемы широко используются в цифровой электронике для генерации, обработки и хранения сигналов. Они иллюстрируют принципы работы логических элементов, автогенераторов и реле времени, основанных на положительной и отрицательной обратной связи.

**RS-триггер.** Триггер представляет собой электронную схему, имеющую два устойчивых состояния. Каждому состоянию соответствует логическое значение:  $Q = 1$ , если на выходе высокое напряжение, и  $Q = 0$ , если на выходе низкое напряжение. Переход из одного состояния в другое осуществляется под действием специальных запускающих импульсов. Триггеры относятся к логическим элементам и могут выполнять роли элементарного автомата, реле, порогового устройства или запоминающего устройства. На их базе строятся генераторы импульсов, реле времени и другие устройства.

Практически все триггеры строятся на основе RS-триггера (от англ. Reset-Set – сброс-установка), который имеет два входа:

- S (Set – установка, переводит триггер в состояние  $Q = 1$ );
- R (Reset – сброс, переводит триггер в состояние  $Q = 0$ ).

Триггер также имеет два выхода:

- $Q$  – прямой выход;
- $Q^-$  – инверсный выход (противоположный  $Q$ ).

Схема простейшего RS-триггера показана на рис. 1.

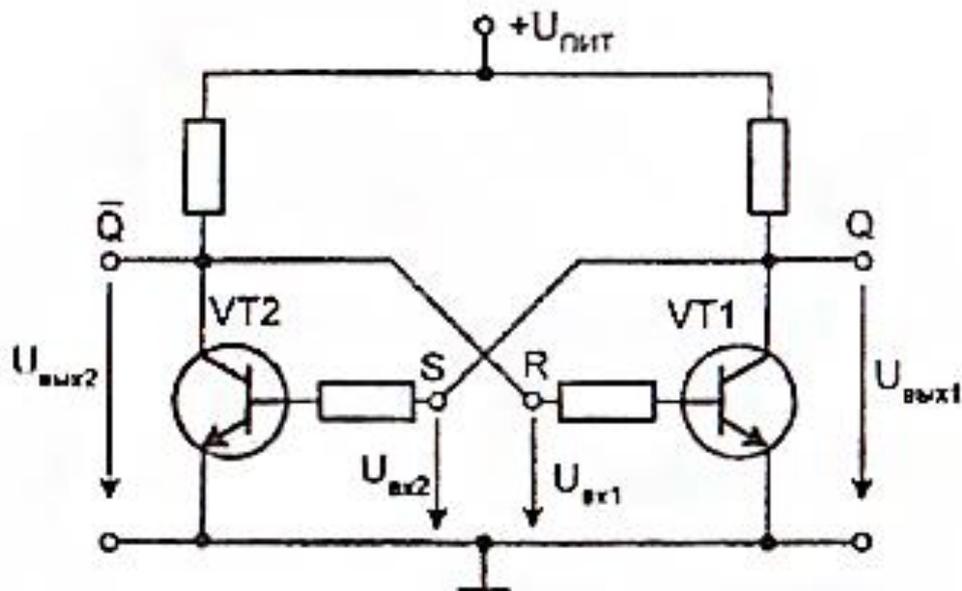


Рис. 1. Схема триггера

Он состоит из двух транзисторных усилителей, охваченных положительной обратной связью по напряжению. При включении питания один транзистор (например,  $VT1$ ) оказывается закрытым, а второй ( $VT2$ ) – открытым. Выходное напряжение  $U_{\text{вых1}}$  подаётся на базу транзистора  $VT2$ , удерживая его в открытом состоянии. Логические величины:  $Q = 1$  (высокое напряжение на выходе 1),  $Q^- = 0$  (низкое напряжение на выходе 2).

Для переключения триггера в другое состояние необходимо подать положительный запускающий импульс на базу закрытого транзистора  $VT1$  ( $U_{\text{вх1}}$ ). Это открывает  $VT1$ , напряжение  $U_{\text{вых2}}$  становится низким (близким к нулю), что подаётся на базу  $VT2$  и закрывает его. Появляется высокое напряжение  $U_{\text{вых1}}$ , которое подаётся на базу  $VT1$ , удерживая его открытым даже после исчезновения запускающего импульса. Логические величины:  $Q = 0$ ,  $Q^- = 1$ .

В данной схеме одновременная подача импульсов на оба входа может привести к неопределённости (переключение или сохранение состояния). Для устранения этого и добавления новых функций (например, установка и сброс по одному входу) используются модификации: JK-, T-и D-триггеры.

**Мультивибратор.** Если в RS-триггере резистивные обратные связи заменить резистивно-ёмкостными (добавить конденсаторы), схема становится автоколебательной и переключается между состояниями с определённой частотой. Такой генератор называется *мультивибратором*. Он генерирует прямоугольные импульсы и применяется в устройствах тайминга, генераторах сигналов и в качестве тактовых генераторов в цифровых системах. Характеристики мультивибратора включают частоту колебаний, определяемую постоянными времени RC-цепей, и скважность импульсов.

**Одновибратор (реле времени).** Если только одну резистивную обратную связь заменить ёмкостной, схема после подачи запускающего импульса переходит во второе состояние только на ограниченное время, а затем автоматически возвращается в исходное. Такой элемент называется *одновибратором или реле времени (моновибратором)*. Он используется для формирования одиночных импульсов заданной длительности, в системах задержки сигналов и в устройствах управления. Ключевые параметры: время задержки (определяется RC-цепью) и амплитуда выходного импульса.

Эти устройства демонстрируют применение положительной обратной связи для создания бистабильных и астабильных систем, что является основой для более сложных цифровых схем.

### Экспериментальная часть

**Задание.** Пронаблюдать за переключением RS-триггера при подаче сигналов на его входы. Экспериментально определить частоту переключений мультивибратора и исследовать влияние на неё величины ёмкостей в обратных связях. Исследовать влияние ёмкости обратной связи на длительность выходного импульса мультивибратора.

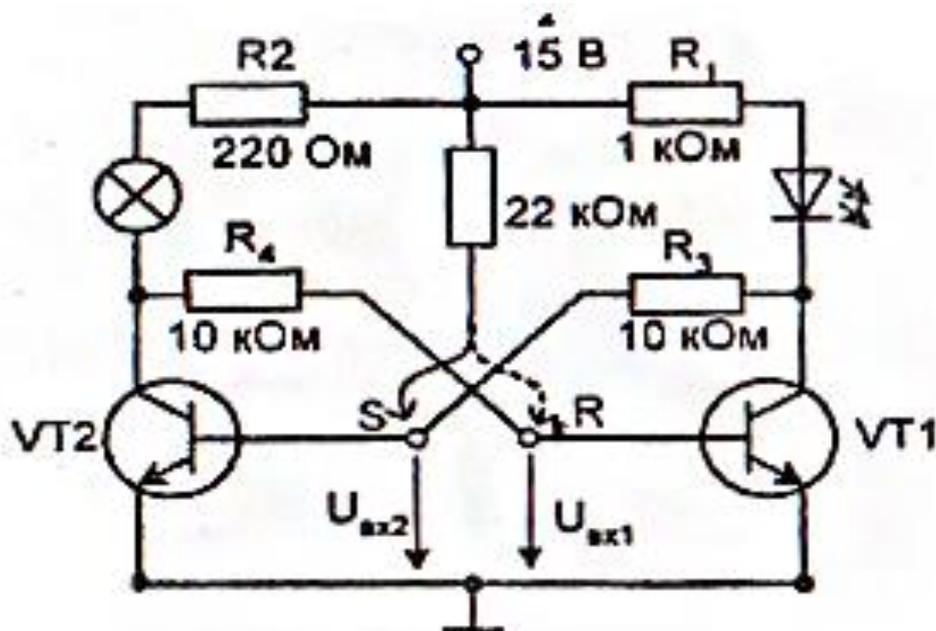


Рис. 2. Схема мультивибратора

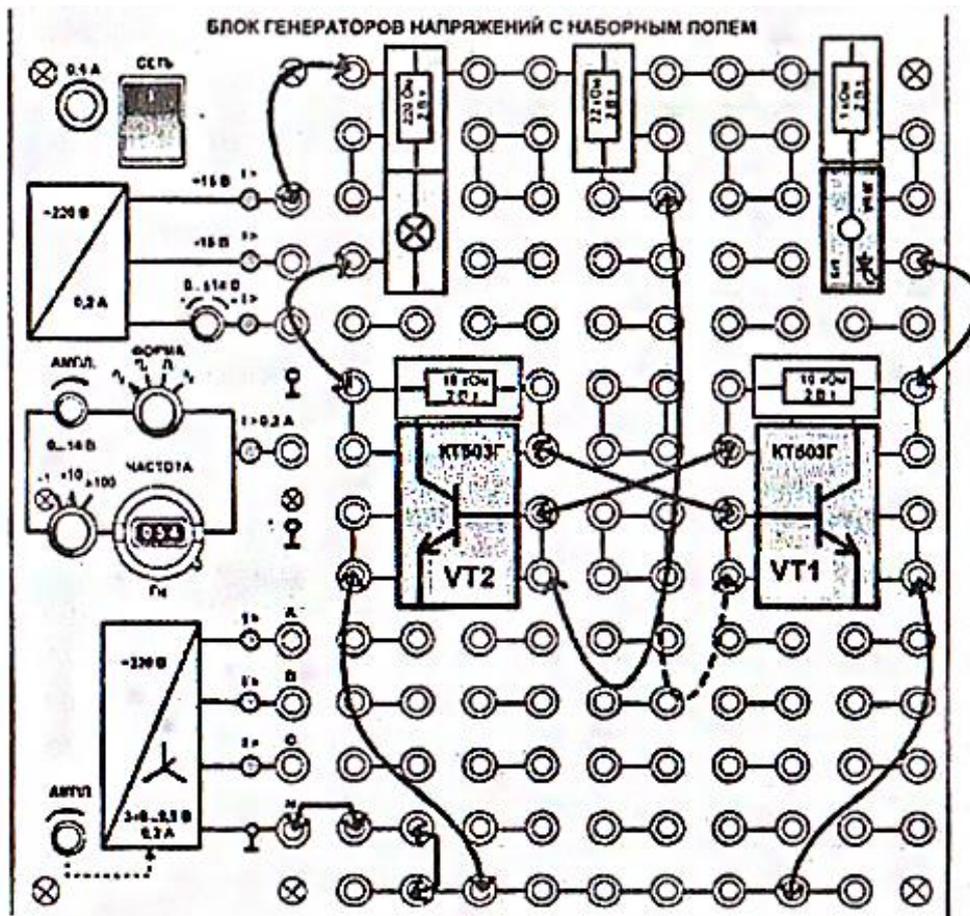


Рис. 3. Схема экспериментального макета установки

### Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите цепь RS-триггера. Принципиальная схема показана на рис. 2, монтажная – на рис. 3. В схему включены светодиоды для индикации состояния транзисторов: светодиод HL1 для индикации открытого состояния транзистора VT1 и сигнальная лампа HL2 для индикации открытого состояния VT2.

2. Включите генератор напряжений и по свечению лампы или светодиода убедитесь, что один транзистор открылся, а другой остался закрытым.

3. Подайте напряжение через сопротивление 22 кОм на базу закрытого транзистора и убедитесь, что он открылся, а другой транзистор закрылся. Убедитесь, что состояние триггера не изменяется и после снятия управляющего напряжения с базы открытого транзистора, и при повторной подаче импульса напряжения на открытый транзистор.

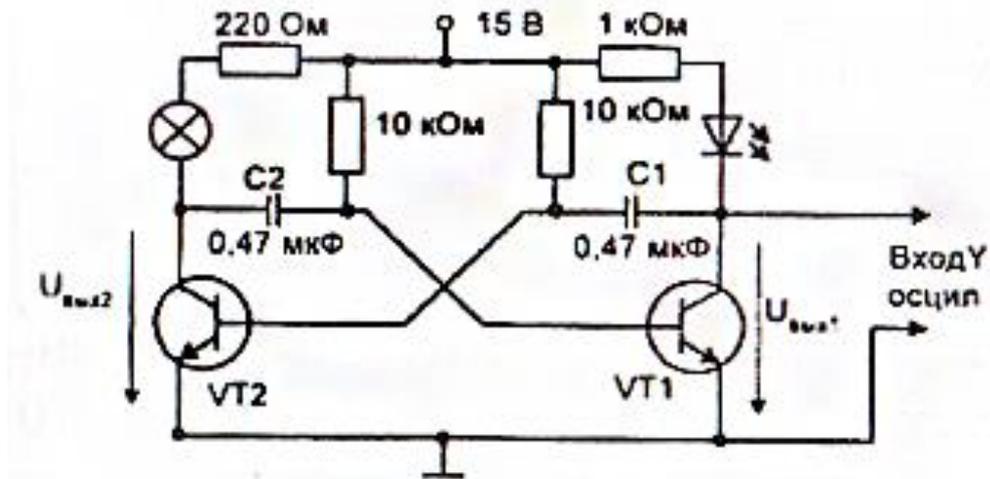


Рис. 4. Схема мультивибратора

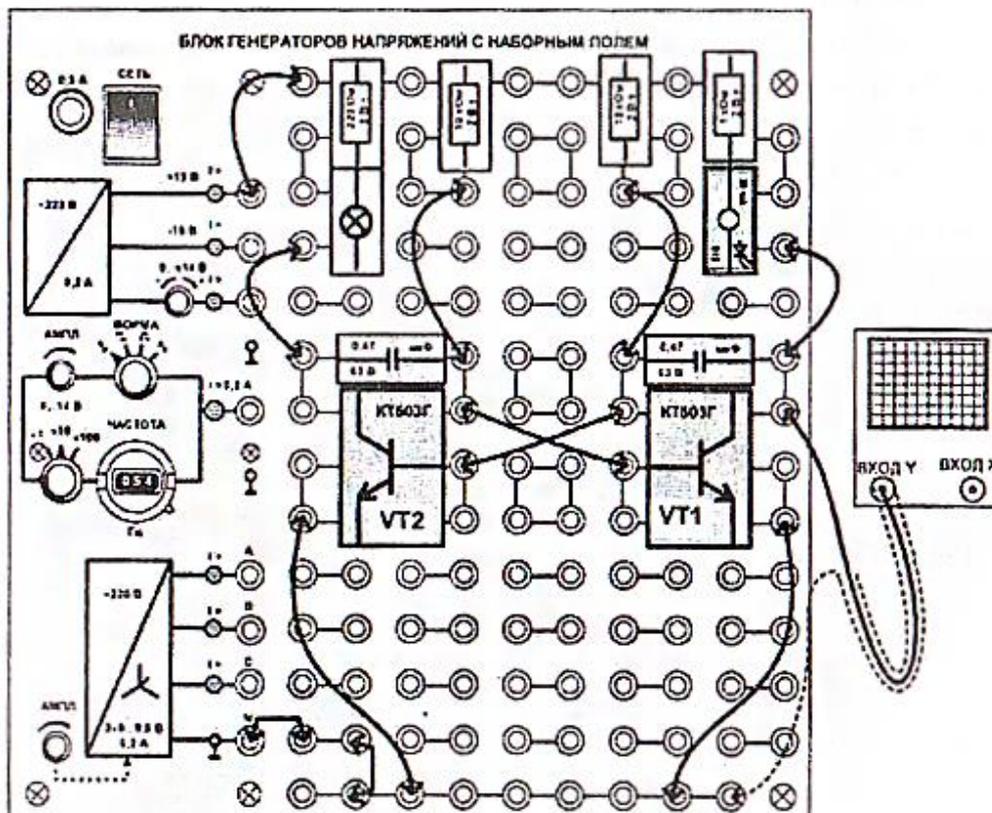


Рис. 5. Монтажная схема сборки мультивибратора

4. Убедитесь, что состояние триггера изменяется только после подачи импульса напряжения на другой вход, т. е. на базу закрытого транзистора.
5. Соберите схему мультивибратора (рис. 4 и 5).
6. Включите питание, настройте осциллограф, определите параметры и запишите в табл. 1:

- Период колебаний  $T = \dots$  мс;
- Время наличия сигнала на первом выходе  $(U_{\text{вых1}})T1_1 = \dots$  мс;
- Время отсутствия сигнала на первом выходе  $T0_1 = \dots$  мс;
- Время наличия сигнала на втором выходе  $(U_{\text{вых2}})T1_2 = \dots$  мс;
- Время отсутствия сигнала на втором выходе  $T0_2 = \dots$  мс;

7. Замените конденсатор  $C2 = 0,47$  мкФ на  $C2' = 1$  мкФ и запишите в таблицу 1 новые значения тех же отрезков времени. Сделайте выводы.

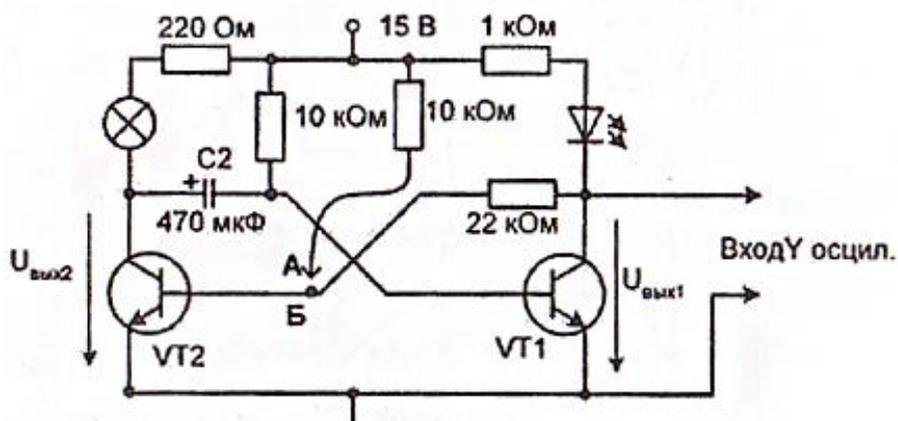
**Таблица 1**

	T, мс	T1 <sub>1</sub> , мс	T0 <sub>1</sub> , мс	T1 <sub>2</sub> , мс	T0 <sub>2</sub> , мс
C1 = C2 = 0,47 мкФ					
C1 = 0,47 мкФ C2 = 0,47 мкФ					

8. Замените конденсатор C1 на электролитический конденсатор 100 мкФ («+» – к коллектору транзистора!) и C2 на 470 мкФ («+» – также к коллектору транзистора!) и наблюдайте за переключением мультивибратора по миганию светодиода или сигнальной лампочки.

9. Соберите теперь схему ждущего одновибратора (рис. 6 и 7). Включите питание и убедитесь, что светодиод включился, а лампочка не включилась.

10. Кратковременно коснитесь наконечником провода А гнезда, соединённого с базой транзистора VT2, и убедитесь, что светодиод погас, а сигнальная лампочка включилась. Через некоторое время схема вернётся в первоначальное состояние.



**Рис. 6.** Схема ждущего одновибратора

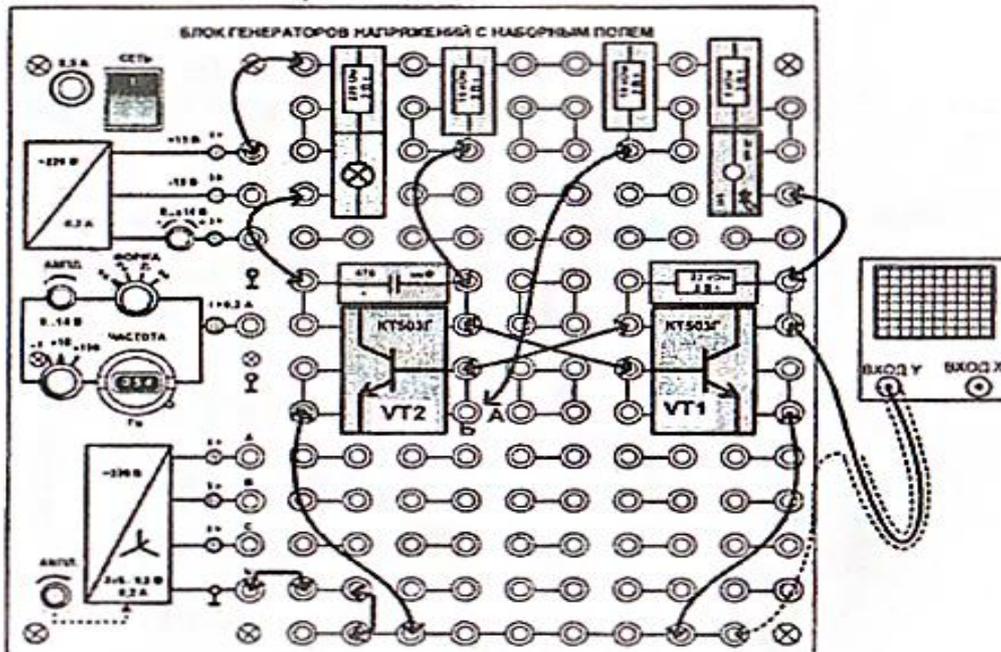


Рис. 7. Монтажная схема сборки одновибратора

### Контрольные вопросы

1. Какое электронное устройство называется триггером? Какие функции могут выполнять триггеры?
2. Объясните принцип работы RS-триггера. Какими свойствами обладают мультивибратор и одновибратор?
3. Как проводится индикация открытого или закрытого состояния транзисторов в цепи RS-триггера? Как можно изменить состояние триггера?
4. Чем конструктивно отличаются схемы мультивибратора и ждущего одновибратора?
5. Как влияет величина ёмкости обратной связи на длительность выходного импульса мультивибратора?

### Литература

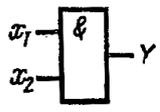
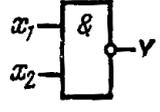
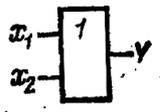
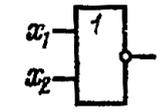
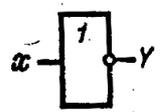
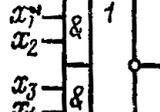
1. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий : учебное пособие / А. С. Глинченко, Н. М. Егоров, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 352 с. – ISBN 5-94074-416-8
2. Манаев В.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
3. Основы электроники, радиотехники и связи : учебное пособие для вузов / А. Д. Гуменюк, В. И. Журавлев, Ю. Ю. Мартюшев и др.; под ред. Г. Д. Петрухина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 480 с.

## Лабораторная работа № 8 «Исследование основных логических элементов на транзисторах»

**Цель работы:** ознакомиться с принципом действия и устройством логических элементов, выполняющих операции НЕ (NOT), ИЛИ (OR), И (AND), а также их инвертированных версий (ИЛИ/НЕ – NOR и И/НЕ – NAND).

### Общие сведения

Схемы элементов, выполняющих некоторые логические операции в двоичной системе исчисления, показаны на рис. 1, где каждый транзистор работает как ключ. Поэтому каждый логический элемент в зависимости от состояния входных сигналов может находиться в двух состояниях: открытом (сигнал проходит) или закрытом (сигнал блокируется). Это аналогично работе выключателя: транзистор открывается под действием напряжения, позволяя току течь, и закрывается, когда напряжения нет.

Логическая операция	Обозначение логического элемента	Таблица истинности		Логическая операция	Обозначение логического элемента	Таблица истинности	
И		$x_1$ $x_2$	$Y$	И–НЕ		$x_1$ $x_2$	$Y$
		1 1	1			1 1	0
ИЛИ		$x_1$ $x_2$	$Y$	ИЛИ–НЕ		$x_1$ $x_2$	$Y$
		1 1	1			1 1	0
		0 1	1			0 1	0
		1 0	1			1 0	0
0 0	0	0 0	1				
НЕ		$x$	$Y$	И–ИЛИ–НЕ		$x_1 x_2$ $x_3 x_4$	$Y$
		1	0			1 1	0
		0	1			0 1	0
						1 0	0
						0 0	1

**Рис. 1.** Таблицы состояний простейших логических элементов

Условимся считать более положительный уровень потенциала на входе или на выходе логического элемента состоянием "1" (единица), а более отрицательный уровень – состоянием "0" (нуль). При этом изменение уровня вовсе не предполагает изменение знака потенциала или входного/выходного напряжения. Например, выходное напряжение коллектор-эмиттер ключа обратной проводимости всегда положительное. Кроме того, входные и выходные напряжения

каждого логического элемента должны иметь одинаковую полярность, чтобы обеспечить возможность совместной их работы в одной логической системе.

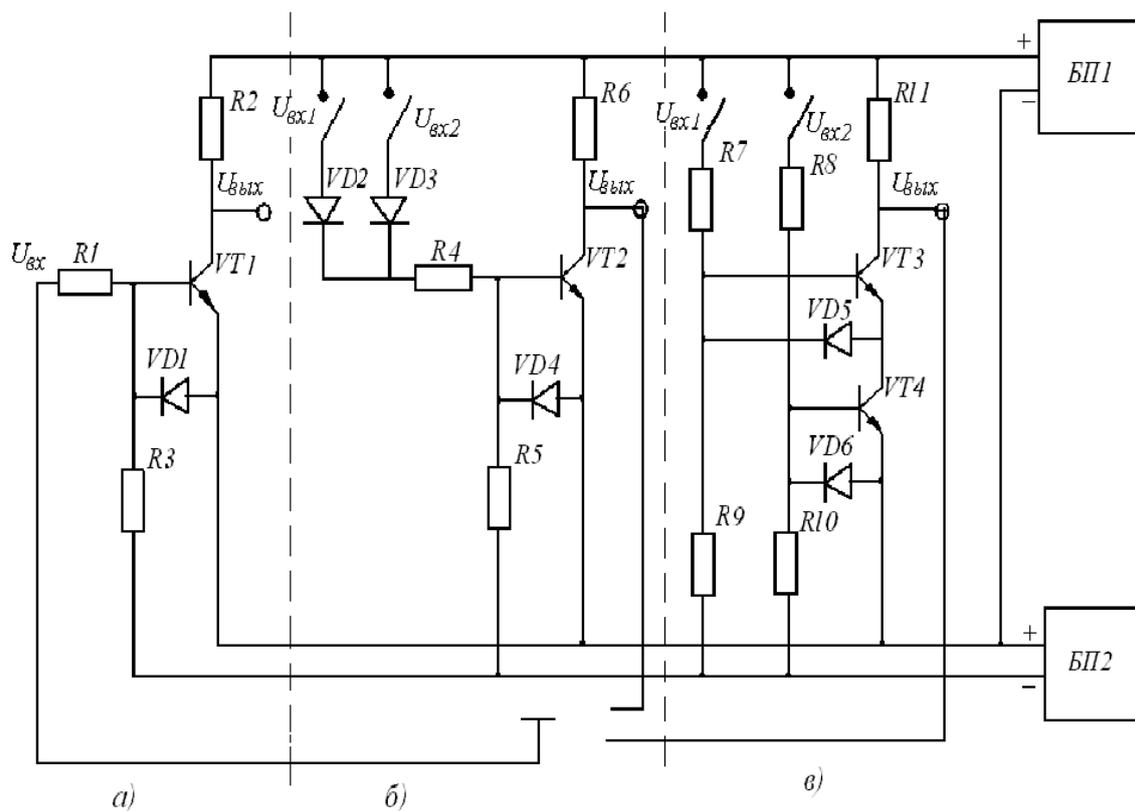
Прежде чем рассмотреть принцип действия операций и их выполнения логическими элементами, остановимся на записи состояний простейших логических элементов. Соответствие условных состояний на входе и выходе логического элемента НЕ иллюстрируется таблицей истинности, показанной на рис. 1 (первый столбец – состояния на входе, второй – на выходе). Из таблицы следует, что при отсутствии сигнала на входе (0) на выходе есть сигнал (1), и наоборот. Это называется *инверсией*: элемент НЕ просто меняет состояние входа на противоположное.

Работа логического элемента суммирования ИЛИ отражена в таблице истинности на рис. 1. Сигнал на выходе (1) появляется тогда, когда есть сигнал на первом входе (1), или на втором входе (1), или на обоих входах (1). Другими словами, ИЛИ – это "логическое сложение": выход равен 1, если хотя бы один вход равен 1.

Элемент логического умножения И также характеризуется таблицей истинности на рис. 1. Сигнал на выходе (1) есть только тогда, когда есть сигнал на первом и втором входах одновременно (оба 1). Это "логическое умножение": выход 1 только при одновременном наличии 1 на всех входах.

Рассмотрим логический элемент, показанный на рис. 2а. В исходном состоянии, когда нет входного сигнала, транзистор Т1 закрыт током от источника БП 2 через резистор R3; на выходе элемента положительное напряжение, равно  $E_k$ . Поэтому при состоянии на входе "0", на выходе – "1", при подаче положительного входного напряжения транзистор Т1 откроется. Отсюда, когда на входе состояние "1", на выходе – "0". следовательно, этот элемент выполняет логическую операцию НЕ.

Элемент, показанный на рис. 2б, работает следующим образом. В исходном состоянии, когда нет ни одного входного сигнала, транзистор Т2 закрыт и на выходе элемента положительное напряжение, равно  $E_k$ . Поэтому при состоянии "0" на обоих входах и выходе состояние "1". С появлением положительного напряжения на первом, на втором или на обоих входах транзистор открывается, и выходное напряжение падает до нуля. Следовательно, состояние "1" на любом входе или на обоих входах соответствует состоянию "0" на выходе. Таким образом, этот элемент имеет состояние, противоположные состояниям элемента ИЛИ, т. е. он реализует логическую операцию. В вычислительной технике эта операция носит название *функции Пирса*.



**Рис. 2.** Схема логических элементов

Элемент, показанный на рис. 2в, когда нет входных сигналов, имеет на выходе напряжение  $E_k$ . Если поступает положительное напряжение на один из входов, открывается один транзистор (Т3 или Т4), а другой остается закрытым. Поэтому при состоянии "0" на обоих входах или когда на одном входе состояние "0", а на другом "1", на выходе состояние "1". Выходное напряжение будет равно нулю только в том случае, когда открыты одновременно оба транзистора, т. е. когда на первом и втором входах положительные напряжения. Следовательно, когда на первом и втором входах состояние "1", тогда на выходе состояние "0". Таким образом, этот элемент имеет состояния, противоположные элементу И, т. е. он реализует логическую операцию И/НЕ. Эта операция носит название функции Шеффера.

Чтобы на элементах **ИЛИ /НЕ** и **И/ НЕ** выполнить операции **ИЛИ** и **И**, надо к их выходам подключить элемент, реализующий операцию **НЕ**.

#### **Оборудование и аппаратура**

- Вольтметр постоянного тока с пределом 15 В (М330 или прибор Ц4311).
- Стабилизатор напряжения постоянного тока с выходным напряжением 12 В при нагрузке 100 мА (Б5–7)
- Транзисторы Т1–Т4 (МП37Б)
- Полупроводниковые диоды Д1–Д6 (Д9Ж)

- Резисторы
- Тумблеры П2 – П5 (ТВ-2-1)
- Галетный переключатель П1 на три положения

### Порядок выполнения работы

1. Подключить к исследуемым логическим элементам (см. рис. 2) стабилизаторы напряжения, установив на каждом из них напряжение 12 В. Разомкнуть переключатели П2 – П5, а переключатель П1 оставить в любом положении.

2. Составить таблицы состояний (табл. 1, 2) элементов ИЛИ/НЕ и И/НЕ, анализируя их работу по схемам показанным на рис.1.

**Таблица 1.** Состояния элемента ИЛИ/НЕ, полученные аналитически

$U_{вх1}$	$U_{вх2}$	$U_{вых}$
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

**Таблица 2.** Состояния элемента И/НЕ, полученные аналитически

$U_{вх1}$	$U_{вх2}$	$U_{вых}$
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

3. Составить экспериментальные таблицы состояний элементов ИЛИ/НЕ и И/НЕ (табл. 3, 4) и сравнить их с табл. 1, 2.

Условные состояния "0" и "1" на входе элементов определяется соответственно разомкнутым и замкнутым положением тумблера, а на выходе соответствует малому напряжению на открытом и большому напряжению на закрытом транзисторе. В графу "напряжение" заносят значения напряжения в вольтах на входах и выходах элементов в соответствующем состоянии, измеренные вольтметром.

**Таблица 3.** состояние элемента ИЛИ/НЕ, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
Усл. сост.	Напряжение В	Усл. сост.	Напряжение В	Усл. сост.	Напряжение В

**Таблица 4.** состояние элемента И/НЕ, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
Усл. сост.	Напряжение, В	Усл. сост.	Напряжение, В	Усл. сост.	Напряжение, В

4. Составить экспериментальные таблицы состояния элементов ИЛИ и И (табл. 5, 6)

**Таблица 5.** состояние элемента ИЛИ, полученные экспериментально

$U_{вх1}$		$U_{вх2}$		$U_{вых}$	
Усл. сост.	Напряжение, В	Усл. сост.	Напряжение, В	Усл. сост.	Напряжение В

Для определения состояний элемента ИЛИ подключить к выходу схемы ИЛИ/НЕ переключателем П1 элемент НЕ а элемента И – переключателем П1 поставить в другое положение. Выходные напряжения контролировать и измерять на элементе НЕ вольтметром.

**Таблица 6.** состояние элемента И, полученные экспериментально

		$U_{вх}$		$U_{вых}$	
Усл. сост.	Напряжение, В	Усл. сост.	Напряжение, В	Усл. сост.	Напряжение В

5. Сравнить состояния элементов ИЛИ и НЕ, записанные в табл. 5 и 6, с состояниями, приведенными в таблицах на рис. 2.

6. Составить таблицу возможных условных состояний для элемента НЕ/НЕ.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследованных элементов с указанием их номинальных данных.
4. Таблицы 1–6 состояний исследованных элементов.

### Контрольные вопросы

1. Какому требованию должны отвечать логические элементы, работающие в одной логической системе?
2. Когда появляется сигнал на выходе элемента И: когда на каком-нибудь входе есть сигнал или когда есть сигнал на всех входах?
3. Какое состояние должно быть на входе элемента НЕ, когда выходное состояние "О": "1" или "О"?

### Литература

1. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В. И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 498 с
2. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий : учебное пособие / А. С. Глинченко, Н. М. Егоров, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 352 с. – ISBN 5-94074-416-8
3. Манаев, Е. И. Основы радиоэлектроники / Е. И. Манаев. – Москва : Радио, 1985.
4. Ефимчик, М. К. Основы радиоэлектроники / М. К. Ефимчик. – Москва : Радио, 1985.

## Блок виртуальных работ

### Лабораторная работа № 1 «Исследование идеальных элементов электрической цепи»

#### Цель работы

1. Приобрести навыки в области моделирования и анализа электрических схем с помощью виртуальной онлайн лаборатории.
2. Ознакомиться с моделями оборудования и измерительных приборов, применяемых в реальных электротехнических лабораториях.
3. Приобрести навыки чтения принципиальных электрических схем.

#### Содержание работы

1. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока, содержащую резистор.
2. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока, содержащую катушку индуктивности.
3. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока, содержащую конденсатор.

#### Порядок выполнения работы

- 1) Собрать в виртуальной лаборатории *Circuit Simulator*, с помощью изученных методов, схему электрической цепи синусоидального тока для исследования резистивного, индуктивного и емкостного элементов (рис. 1).

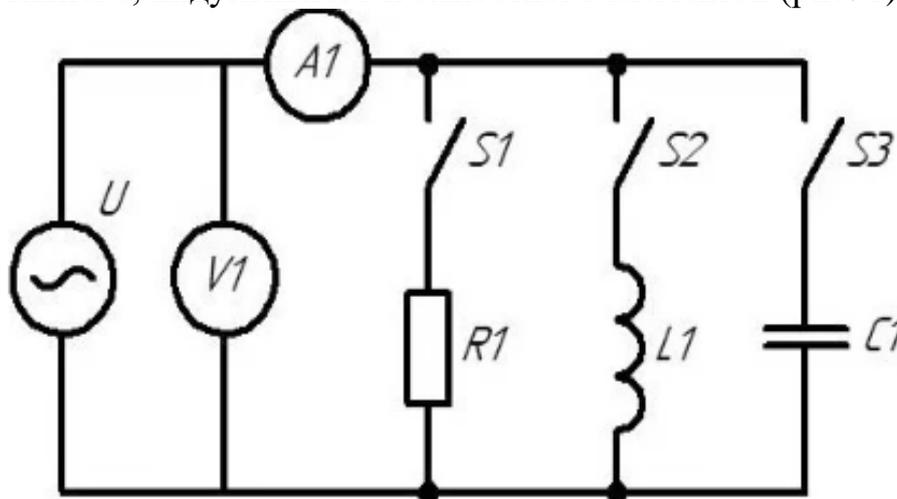


Рис. 1. Схема электрических цепей

В результате должна получиться схема, похожая на ту, которая приведена на рисунке 2.

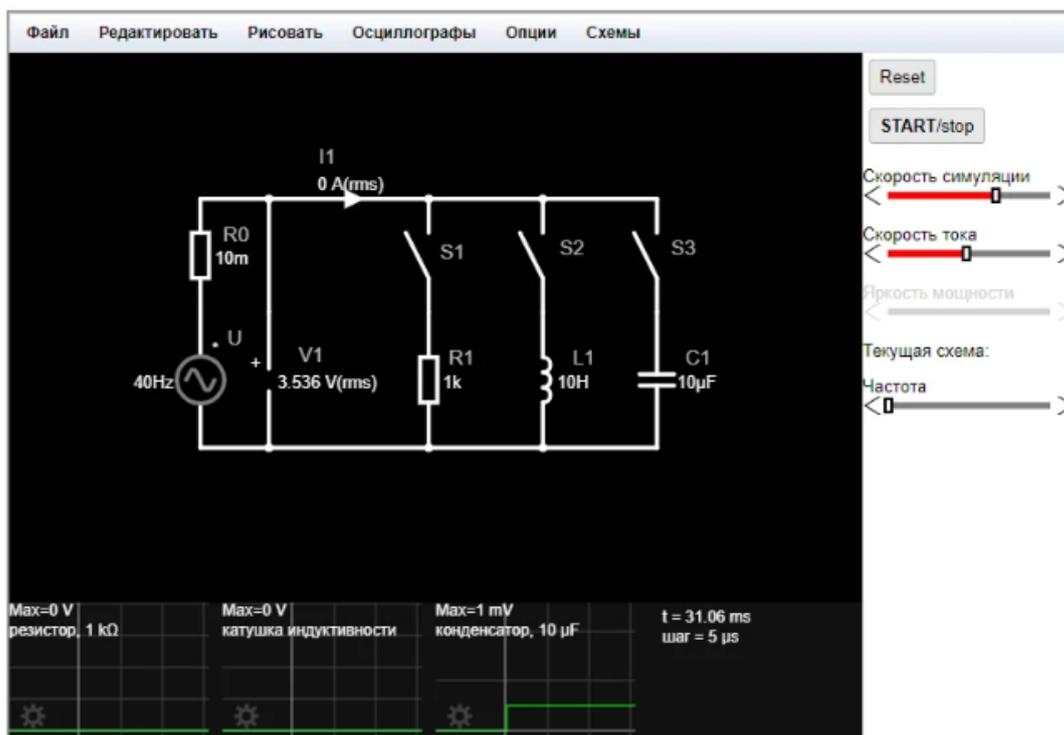


Рис. 2. Вид интерфейса с собранной схемой

Ваша схема может отличаться от нее, т.к. важны электрические соединения, а не внешний вид схемы. Но правилами хорошего составления схем считаются следующие:

- а) вход схемы или источник питания расположен слева, а выход или потребители справа;
- б) проводники изгибаются под прямым углом;
- в) схема скомпонована так, чтобы она занимала наименьшее возможное место и была удобна для чтения;
- г) все элементы имеют позиционные обозначения, нумерация которых расставлена слева – направо, сверху – вниз.

Особенностью схемы 2 является наличие внутреннего сопротивления источника R0. Это сопротивление нужно для моделирования конденсатора. Без R0 иногда в схеме будет происходить короткое замыкание, и программа будет выдавать ошибку.

Кроме того, на рисунке 2 для удобства работы и анализа данных добавлен ползунок изменения частоты источника, а также выведены осциллограммы напряжений на резисторе, катушке индуктивности и конденсаторе.

2) Установить параметры источника переменного напряжения и элементов схемы согласно Вашего варианта.

**Обратите внимание** на то, что нужно задать действующее значение напряжения источника, а в программе задается амплитудное. Для получения амплитудного значения напряжения нужно действующее напряжение (оно дано в таблице 2) разделить на корень квадратный из двух. Например, если дано напряжение источника  $U = 200 \text{ В}$ , то амплитудное значение составит

$U_{max} = 200 / 0,707 = 282 \text{ В}$  и именно это значение нужно ставить в настройки источника. Если параметры заданы верно, то вольтметр, подключенный параллельно источнику, покажет значение близкое к действующему. В нашем примере – близкое к 200 В.

3) Настроить вольтметр на измерение среднеквадратичного напряжения, а амперметр – на измерение среднеквадратичного тока.

4) "Запустить" схему, нажав кнопку "START/stop", если она не была нажата. В "нажатом" состоянии (при запущенной симуляции схемы) эта кнопка окрашена в серый цвет, а в "отпущенном" состоянии (при остановленной симуляции схемы) – в красный.

5) Зарисовать в отчет таблицу 1.

**Таблица 1**

Цепь	Экспериментальные данные		Расчётные данные					
	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$\cos\varphi$	$Z, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$X, \text{Ом}$	$P, \text{Вт}$	$Q, \text{Вар}$
R								
L								
C								

6) Замкнуть выключатель S1. При этом к источнику будет подключен только резистор – это будет режим работы цепи "R".

7) Измерить напряжение и ток в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R" таблицы 1. Обратите внимание, что напряжение нужно записывать в вольтах, а ток в амперах. Показания приборов могут быть представлены с учетом кратных и дольных приставок единиц основной величины. Не забывайте переводить их!

8) Разомкнуть выключатель S1 и замкнуть выключатель S2. При этом к источнику будет подключена только катушка индуктивности – это будет режим работы цепи "L".

9) Измерить напряжение и ток в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "L" таблицы 1.

10) Разомкнуть выключатель S2 и замкнуть выключатель S3. При этом к источнику будет подключен только конденсатор – это будет режим работы цепи "C".

11) Измерить напряжение и ток в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "C" таблицы 1.

12) Вычислить параметры электрической цепи и записать их таблицу 1.

Для расчета параметров применяются следующие формулы:

- индуктивное сопротивление (1);
- емкостное сопротивление (2);

- полное сопротивление (3);
- коэффициент мощности (4);
- активная мощность (5);
- реактивная индуктивную мощность (6);
- реактивная емкостная мощность (7).

$$x_L = 2\pi fL \quad (1)$$

$$x_C = 1/(2\pi fC) \quad (2)$$

$$Z = U/I \quad (3)$$

$$\cos\varphi = R/Z \quad (4)$$

$$P = I_R^2 * R \quad (5)$$

$$Q_L = I_L^2 * x_L \quad (6)$$

$$Q_C = I_C^2 * x_C \quad (7)$$

13) На основании полученных результатов построить в масштабе на миллиметровой бумаге векторные диаграммы токов и напряжений для каждого опыта.

14) Начертить схемы замещения реальных элементов. Объяснить причину не идеальности реальных элементов.

### Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы, происходящие в электрических цепях, отображают схемы замещения реальных элементов?
2. Каковы углы сдвига фаз между напряжением и током на реальных элементах?
3. Какие энергетические процессы характеризуют активная и реактивная мощности?

### Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0
2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0
3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В.И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 498 с.
4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей: учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

## Лабораторная работа № 2 «Исследование электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении R-, L- и C-элементов»

### Цели работы

1. Проверить на практике выполнение законов Ома и Кирхгофа в неразветвленной цепи синусоидального тока.
2. Ознакомиться с явлением резонанса напряжений.
3. Приобрести навыки построения векторных диаграмм токов и напряжений.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать в виртуальной лаборатории Circuit Simulator, с помощью изученных методов, схему электрической цепи синусоидального тока для исследования последовательной R, L, C – цепи (рис. 1). В результате должна получиться схема, похожая на ту, которая приведена на рисунке 2. Ваша схема может отличаться от нее, т. к. важны электрические соединения, а не внешний вид схемы.

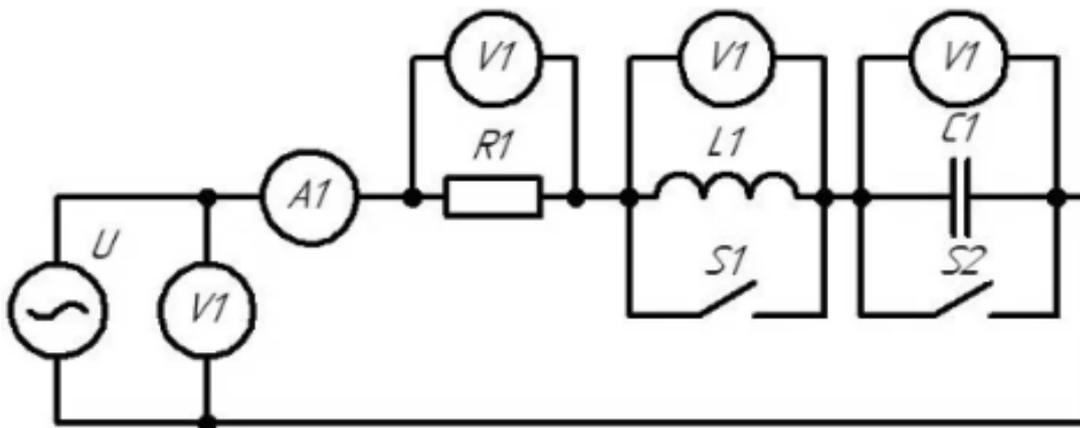


Рис. 1. Схема электрических цепей синусоидального тока

На рисунке 2 для удобства работы и анализа данных добавлен ползунок изменения частоты источника, а также выведены осциллограммы напряжений на резисторе, катушке индуктивности и конденсаторе.

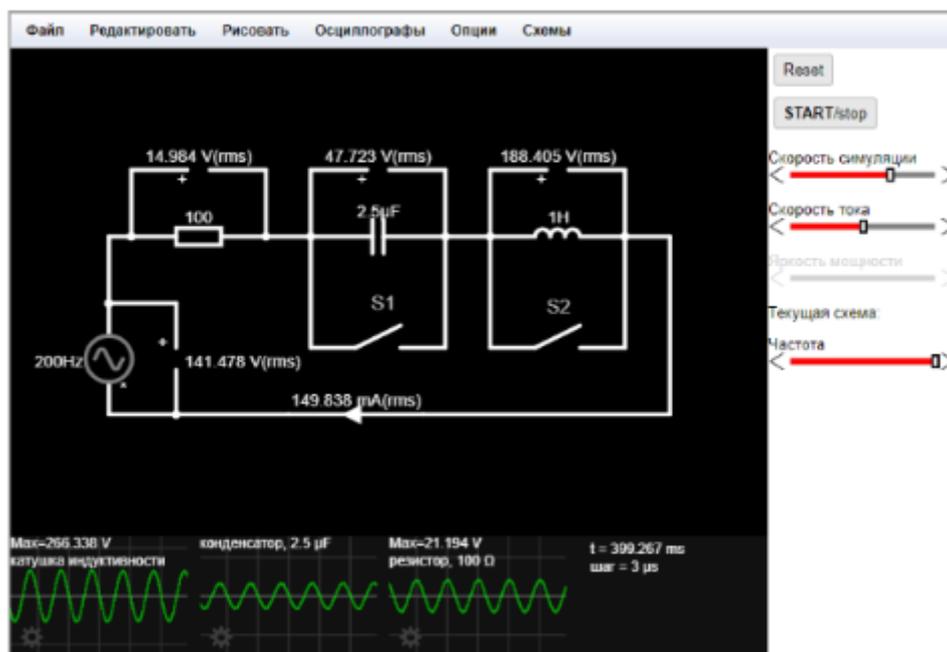


Рис. 2. Вид интерфейса с собранной схемой

2. Установить параметры источника переменного напряжения и элементов схемы согласно Вашего варианта.

**Обратите внимание** на то, что нужно задать действующее значение напряжения источника, а в программе задается амплитудное. Для получения амплитудное значения напряжения нужно действующее напряжение (оно дано в таблице 2) разделить на корень квадратный из двух. Например, если дано напряжение источника  $U = 200$  В, то амплитудное значение составит  $U_{max} = 200 / 0,707 = 282$  В и именно это значение нужно ставить в настройки источника. Если параметры заданы верно, то вольтметр, подключенный параллельно источнику, покажет значение близкое к действующему. В нашем примере – близкое к 200 В.

3. Настроить вольтметр на измерение среднеквадратичного напряжения, а амперметр – на измерение среднеквадратичного тока.

4. "Запустить" схему, нажав кнопку "START/stop", если она не была нажата. В "нажатом" состоянии (при запущенной симуляции схемы) эта кнопка окрашена в серый цвет, а в "отпущенном" состоянии (при остановленной симуляции схемы) – в красный.

5. Зарисовать в отчет таблицу 1.

**Таблица 1**

Цепь	$U, В$	$I, А$	$U_R, В$	$U_L, В$	$U_C, В$
R, C					
R, L					
R, L, C					
Резонанс напряжений					

6. Настроим схему на режим последовательного соединения RC элементов. Для этого нужно разомкнуть выключатель S1 и замкнуть выключатель S2. При этом ток будет обходить катушку индуктивности через замкнутый выключатель S2 и катушка не будет участвовать в работе схемы.

7. Измерить ток и напряжения в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R, C" таблицы 4. Обратите внимание, что напряжение нужно записывать в вольтах, а ток в амперах. Показания приборов могут быть представлены с учетом кратных и дольных приставок единиц основной величины. Не забывайте переводить их!

8. Настроим схему на режим последовательного соединения RL элементов. Для этого нужно замкнуть выключатель S1 и разомкнуть выключатель S2. При этом ток будет обходить конденсатор через замкнутый выключатель S1 и конденсатор не будет участвовать в работе схемы.

9. Измерить ток и напряжения в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R, L" таблицы 1.

10. Настроим схему на режим последовательного соединения RLC элементов. Для этого нужно разомкнуть оба выключателя S1 и S2. При этом ток будет проходить по всем элементам схемы.

11. Измерить ток и напряжения в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R, L, C" таблицы 1.

12. Настроим схему на режим резонанса. Так как резонанс напряжений может возникнуть только в последовательной RLC цепи, то нам нужно задействовать все элементы схемы. Для этого нужно разомкнуть оба выключателя S1 и S2. Для того чтобы в полученной цепи возник резонанс воспользуемся регулировкой частоты переменного напряжения. Определим для заданных значений индуктивности и емкости резонансную частоту по формуле (1)

$$f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

Обратите внимание, что в эту формулу индуктивность катушки L нужно подставлять в генри (Г), а емкость конденсатора C в фарадах (Ф). В этом случае ответ  $f_o$  получим в герцах (Гц).

Значение  $f_o$  установим в источнике через его свойства или воспользовавшись ползунком "Частота" в правой части рабочего экрана.

13. Измерить ток и напряжения в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "резонанс напряжений" таблицы 1.

14. Вычислить параметры электрической цепи и записать их таблицу 2. Для расчета параметров применяются следующие формулы:

- индуктивное сопротивление (2);
- емкостное сопротивление (3);
- полное сопротивление (4);
- активная мощность (5);
- реактивная индуктивную мощность (6);
- реактивная емкостная мощность (7);
- полная мощность (8);
- коэффициент мощности (9).

$$x_L = 2\pi fL \quad (2)$$

$$x_C = 1/(2\pi fC) \quad (3)$$

$$Z = U/I \quad (4)$$

$$P = I_R^2 * R \quad (5)$$

$$Q_L = I_L^2 * x_L \quad (6)$$

$$Q_C = I_C^2 * x_C \quad (7)$$

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (8)$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{S} \quad (9)$$

**Таблица 2**

Цепь	Z, Ом	R, Ом	$x_L$ , Ом	$x_C$ , Ом	$\cos\varphi$	P, Вт	Q, ВАр	S, ВА
R, C								
R, L								
R, L, C								
Резонанс напряжений								

15. На основании полученных результатов построить в масштабе на миллиметровой бумаге векторные диаграммы токов и напряжений для каждого опыта. Убедиться в выполнении 2-го закона Кирхгофа.

16. На основании четвертого опыта убедиться в выполнении условия резонанса напряжений:  $X_L = X_C$ .

### Контрольные вопросы

1. Почему для получения величины общего напряжения при последовательном соединении резистора и реактивных сопротивлений необходимо векторное сложение активного и реактивного напряжений?

2. Каковы необходимые и достаточные условия возникновения резонанса напряжений в цепях переменного тока?

3. При каком условии и почему напряжение на индуктивности и емкости при резонансе больше напряжения, приложенного к цепи? Какую величину имеет коэффициент мощности при резонансе напряжений?

### Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0

2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0

3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В. И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 498 с.

4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

## Лабораторная работа № 3 «Исследование электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении R-, L- и C-элементов»

### Цели работы

1. Убедиться в том, что 1-й закон Кирхгофа в цепи синусоидального тока при параллельном соединении R-, L- и C-элементов соблюдается только в векторной или комплексной формах.
2. Исследовать явление резонанса токов.
3. Закрепить навыки в построении векторных диаграмм токов и напряжений.

### Содержание работы

1. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока при параллельном соединении R- и L-элементов.
2. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока при параллельном соединении R- и C-элементов.
3. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока при параллельном соединении R-, L- и C-элементов.
4. Исследовать электрическую цепь синусоидального тока в условиях резонанса токов.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать в виртуальной лаборатории Circuit Simulator, с помощью изученных методов, схему электрической цепи синусоидального тока для исследования параллельной R, L, C – цепи (рисунок 1). В результате должна получиться схема, похожая на ту, которая приведена на рисунке 2. Ваша схема может отличаться от нее, т. к. важны электрические соединения, а не внешний вид схемы.

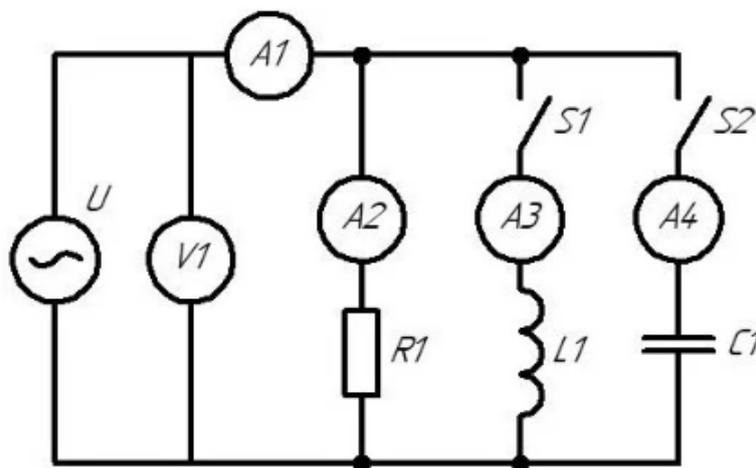


Рис. 1. Схемы электрических цепей переменного тока

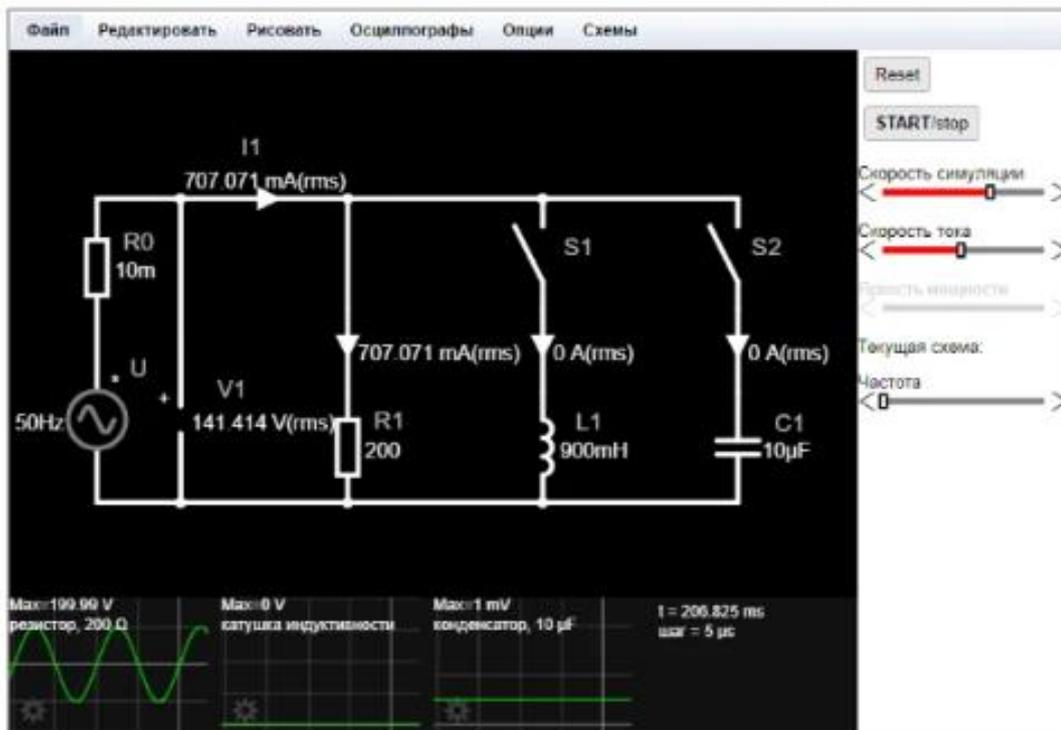


Рис. 2. Вид интерфейса с собранной схемой

Особенностью схемы 2 является наличие внутреннего сопротивления источника R0. Это сопротивление нужно для моделирования конденсатора. Без R0 иногда в схеме будет происходить короткое замыкание и программа будет выдавать ошибку.

На рисунке 2 для удобства работы и анализа данных добавлен ползунок изменения частоты источника, а также выведены осциллограммы напряжений на резисторе, катушке индуктивности и конденсаторе.

2. Установить параметры источника переменного напряжения и элементов схемы согласно Вашего варианта.

**Обратите внимание** на то, что нужно задать действующее значение напряжения источника, а в программе задается амплитудное. Для получения амплитудное значения напряжения нужно действующее напряжение (оно дано в таблице 2) разделить на корень квадратный из двух. Например, если дано напряжение источника  $U = 200 \text{ В}$ , то амплитудное значение составит  $U_{\text{max}} = 200 / 0,707 = 282 \text{ В}$  и именно это значение нужно ставить в настройки источника. Если параметры заданы верно, то вольтметр, подключенный параллельно источнику, покажет значение близкое к действующему. В нашем примере – близкое к 200 В.

3. Настроить вольтметр на измерение среднеквадратичного напряжения, а амперметр – на измерение среднеквадратичного тока.

4. "Запустить" схему, нажав кнопку "START/stop", если она не была нажата. В "нажатом" состоянии (при запущенной симуляции схемы) эта кнопка

окрашена в серый цвет, а в "отпущенном" состоянии (при остановленной симуляции схемы) – в красный.

5. Зарисовать в отчет таблицу 1.

**Таблица 1**

Цепь	$U, В$	$I, А$	$I_R, А$	$I_L, А$	$I_C, А$
R, C					
R, L					
R, L, C					
Резонанс напряжений					

6. Настроим схему на режим параллельного соединения RC элементов. Для этого нужно разомкнуть выключатель S1 и замкнуть выключатель S2. При этом ток не будет проходить по катушке индуктивности и она не будет участвовать в работе схемы.

7. Измерить напряжение и токи в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R, C" таблицы 6. Обратите внимание, что напряжение нужно записывать в вольтах, а ток в амперах. Показания приборов могут быть представлены с учетом кратных и дольных приставок единиц основной величины. Не забывайте переводить их!

8. Настроим схему на режим параллельного соединения RL элементов. Для этого нужно замкнуть выключатель S1 и разомкнуть выключатель S2. При этом ток не будет проходить по конденсатору и он не будет участвовать в работе схемы.

9. Измерить напряжение и ток в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R, L" таблицы 1.

10. Настроим схему на режим параллельного соединения RLC элементов. Для этого нужно замкнуть оба выключателя S1 и S2. При этом ток будет проходить по всем элементам схемы.

11. Измерить напряжение и ток в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "R, L, C" таблицы 1.

12. Настроим схему на режим резонанса. Так как резонанс напряжений может возникнуть только в параллельной RLC цепи, то нам нужно задействовать все элементы схемы. Для этого нужно замкнуть оба выключателя S1 и S2. Для того чтобы в полученной цепи возник резонанс воспользуемся регулировкой частоты переменного напряжения. Определим для заданных значений индуктивности и емкости резонансную частоту по формуле (1)

$$f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

Обратите внимание, что в эту формулу индуктивность катушки L нужно подставлять в генри (Г), а емкость конденсатора C в фарадах (Ф). В этом случае ответ  $f_o$  получим в герцах (Гц).

Значение  $f_0$  установим в источнике через его свойства или воспользовавшись ползунком "Частота" в правой части рабочего экрана.

• Измерить напряжение и ток в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием цепи "резонанс токов" таблицы 1. Вычислить параметры электрической цепи и записать их таблицу 1. Для расчета параметров применяются следующие формулы:

- полная проводимость (2);
- коэффициент мощности (3);
- реактивная проводимость (4);
- активный ток всей цепи (5);
- реактивный ток всей цепи (6);
- полная мощность (7);
- реактивная мощность (8).

$$y = I/U \quad (2)$$

$$\cos\varphi = \frac{g}{y} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{y^2 - g^2} \quad (4)$$

$$I_a = I * \cos\varphi \quad (5)$$

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} \quad (6)$$

$$S = U * I \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

**Таблица 2**

Цепь	$y, \text{См}$	$g, \text{См}$	$b, \text{См}$	$I_a, \text{А}$	$I_p, \text{А}$	$\cos\varphi$	$Q, \text{ВАр}$	$S, \text{ВА}$
R,C								
R,L								
R,L,C								
Резонанс напряжений								

13. Построить на комплексной плоскости в масштабе треугольник проводимостей для третьего опыта.

14. Построить на комплексной плоскости в масштабе векторные диаграммы напряжения и токов для всех опытов.

15. Сделать выводы о соответствии векторных диаграмм первому закону Кирхгофа.

### Контрольные вопросы

1. Каково необходимое условие для возникновения резонанса токов в однофазных цепях переменного тока?

2. Каков характер нагрузки, если при параллельном соединении R-, L-, C-элементов соблюдается условие  $b_L < b_C$ ?

3. Что является общим параметром цепи при параллельном соединении ветвей?

### Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0

2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0

3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В.И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 498 с.

4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей: учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

## Лабораторная работа № 4 «Исследование трехфазной цепи переменного тока при соединении электроприемников по схеме «звезда»»

### Цели работы

1. Ознакомиться с режимом работы трехфазного приемника, соединенного по схеме «звезда».
2. Определить соотношение между линейными и фазными параметрами цепи при различных режимах работы трехфазного приемника.
3. Изучить некоторые аварийные режимы в трехфазной цепи переменного тока при соединении приемника по схеме «звезда».

### Порядок выполнения работы

1. Собрать в виртуальной лаборатории Circuit Simulator, с помощью изученных методов, схему трехфазной электрической цепи переменного тока согласно рисунку 1. В результате должна получиться схема, похожая на ту, которая приведена на рисунке 2. Ваша схема может отличаться от нее, т.к. важны электрические соединения, а не внешний вид схемы.

2. Установить параметры источников переменного напряжения и элементов схемы согласно Вашего варианта. Для начала установите одинаковые сопротивления всех резисторов, которые будут равны сопротивлению  $R$ , заданному для Вашего варианта.

На рисунке 2 для удобства настройки режима работы схемы добавлены три ползунка, которые изменяют сопротивления фазных резисторов  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_C$ . Пределы изменения сопротивлений резисторов рекомендуется установить от 200 Ом до 2,5 кОм, но Вы можете подобрать их удобными для своего варианта.

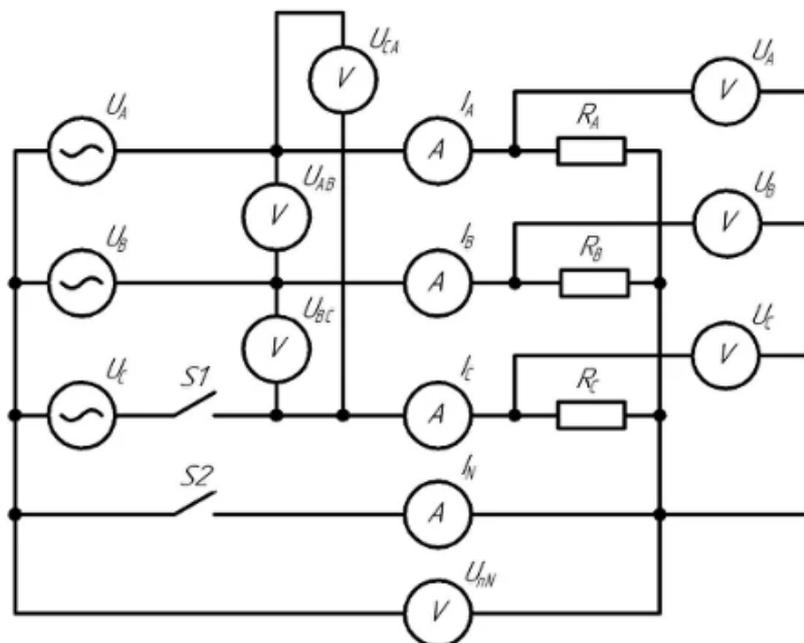


Рис. 1. Схема настраиваемых электрических цепей

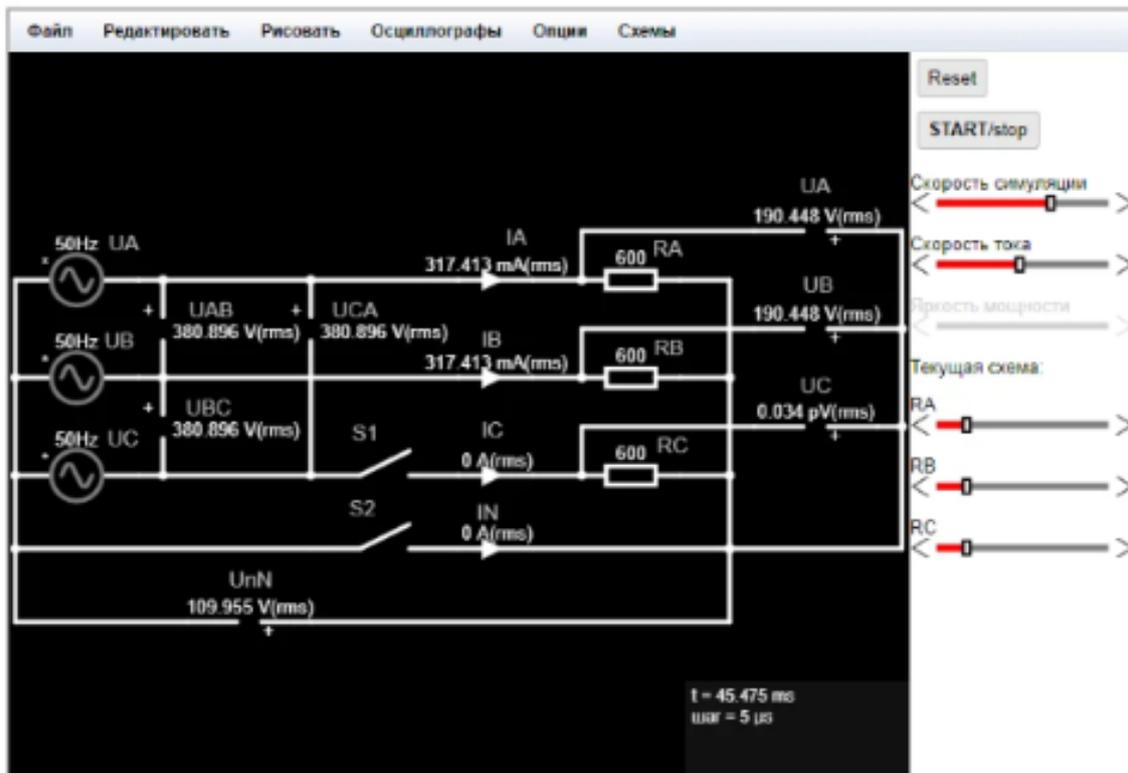


Рис. 2. Общий вид интерфейса с собранными схемами

**Обратите внимание** на то, что нужно задать действующее значение напряжения источника, а в программе задается амплитудное. Для получения амплитудное значения напряжения нужно действующее напряжение (оно дано в таблице 2) разделить на корень квадратный из двух. Например, если дано напряжение источника  $U = 220 \text{ В}$ , то **амплитудное значение** составит  $U_{\max} = 220 / 0,707 = 311 \text{ В}$  и именно это значение нужно ставить в настройке источника. Если параметры заданы верно, то фазные вольтметры в режиме "звезда с нейтралью" покажут значения близкое к действующему. В нашем примере – близкое к 220 В.

**Фазы напряжений** источников нужно установить для фазы А –  $0^\circ$ , для фазы В –  $120^\circ$ , для фазы С –  $240^\circ$ .

**Частоту переменного напряжения** источников для всех вариантов нужно установить равную 50 Гц.

3. Настроить вольтметры на измерение среднеквадратичного напряжения, а амперметры – на измерение среднеквадратичного тока.

4. "Запустить" схему, нажав кнопку "START/stop", если она не была нажата. В "нажатом" состоянии (при запущенной симуляции схемы) эта кнопка окрашена в серый цвет, а в "отпущенном" состоянии (при остановленной симуляции схемы) – в красный.

5. Зарисовать в отчет таблицу 1.

**Таблица 1**

Режим	$U_{AB, B}$	$U_{BC, B}$	$U_{CA, B}$	$U_{A, B}$	$U_{B, B}$	$U_{C, B}$	$I_{A, A}$	$I_{B, A}$	$I_{C, A}$	$U_{\text{л}} / U_{\Phi}$
Симметричный с N										
Симметричный без N										
Несимметричный с N										
Несимметричный без N										
Обрыв линейного провода										

**Пояснение.** Название первых 4-х режимов состоит из двух частей.

Первая – это нагрузка симметричная или несимметричная. При **симметричной** нагрузке сопротивления всех фаз равны, т. е.  $R_A = R_B = R_C = R$ . При **несимметричной** нагрузке сопротивления фаз не равны, т. е.  $R_A \neq R_B \neq R_C$ . Для практического применения в лабораторной работе примем  $R_A = R/2$ ;  $R_B = R$ ;  $R_C = 1,5 \cdot R$ .

Вторая – это работа схемы с нейтралью (с N) или без нейтрали (без N). За включение нейтрали отвечает выключатель S2. Если S2 замкнут, то схема работает *с N*. Если S2 разомкнут, то схема работает *без N*. При этом S1 всегда (кроме последнего режима) замкнут.

6. Зная принцип названия режимов настроим схему на режим симметричной нагрузки с нейтралью. Для этого нужно замкнуть выключатели S1, S2 и выставить одинаковые сопротивления  $R_A = R_B = R_C = R$ .

7. Измерить напряжения и токи в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием режима "Симметричный с N" таблицы 8. Обратите внимание, что напряжение нужно записывать в вольтах, а ток в амперах. Показания приборов могут быть представлены с учетом кратных и дольных приставок единиц основной величины. Не забывайте переводить их!

8. Настроим схему на режим симметричной нагрузки без нейтрали. Чтобы перейти к этому режиму нужно разомкнуть выключатель S2. Остальные настройки остаются теми же.

9. Измерить напряжения и токи в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием режима "Симметричный без N" таблицы 8.

10. Настроим схему на режим несимметричной нагрузки с нейтралью. Чтобы перейти к этому режиму нужно замкнуть выключатель S2. Сопротивления резисторов выставить следующими:  $R_A = R/2$ ;  $R_B = R$ ;  $R_C = 1,5 \cdot R$ .

11. Измерить напряжения и токи в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием режима "Несимметричный с N" таблицы 1.

12. Настроим схему на режим несимметричной нагрузки без нейтрали. Чтобы перейти к этому режиму нужно разомкнуть выключатель S2. Остальные настройки остаются теми же.

13. Измерить напряжения и токи в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием режима "Несимметричный без N" таблицы 1.

14. Настроим схему на режим обрыва линейного провода. Чтобы перейти к этому режиму нужно замкнуть выключатель S2, разомкнуть S1. Сопротивления резисторов выставить одинаковыми  $R_A = R_B = R_C = R$ .

15. Измерить напряжения и токи в этом режиме и записать их значения в строку с наименованием режима "Обрыв линейного провода" таблицы 1.

16. Для всех опытов проверить выполнение равенства (1), для чего вычислить соотношение  $U_{AB}/U_A$  и записать его в таблицу 1. Сделать вывод с том, в каких режимах работы трехфазной цепи выполняется равенство (1), а в каких нет.  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$  (1)

17. Построить в масштабе на миллиметровой бумаге векторную диаграмму токов и напряжений для всех опытов, по которым определить величину тока в нейтральном проводе, выраженную через масштаб векторной диаграммы.

18. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для четвертого опыта. Определить через построение значение напряжения между нейтральными точками  $U_{nN}$ .

19. По результатам четвертого опыта проанализировать перераспределение фазных напряжений.

20. Сделать заключение о работе нагрузки в режиме обрыва линейного провода, анализируя результаты последнего опыта.

### Контрольные вопросы

1. Что значит симметричная и несимметричная нагрузка в трехфазных цепях?

2. Каковы соотношения между величинами токов и напряжений, если нагрузка симметрична?

3. Что понимается под явлением «смещение нейтрали» в трехфазных четырехпроводных цепях?

4. Каким образом находится ток в нейтральном проводе четырехпроводной трехфазной цепи, если нагрузка симметрична?

5. В каких случаях можно использовать трехфазную трехпроводную цепь?

## Литература

1. Мощенский, Ю. В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы : учебное пособие для вузов / Ю. В. Мощенский, А. С. Нечаев. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 216 с. – ISBN 978-5-507-49264-0
2. Смирнов, Ю. А. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 560 с. – ISBN 978-5-8114-1369-0
3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В. И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 498 с.
4. Никулин, В. И. Теория электрических цепей: учебное пособие / В. И. Никулин. – Москва : ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. – 240 с.

## Содержание

Введение .....	3
<i>Блок экспериментальных работ</i> .....	5
Лабораторная работа № 1 «Изучение принципа работы осциллографа» .....	5
Лабораторная работа № 2 «Исследование полупроводникового диода» .....	20
Лабораторная работа № 3 «Изучение работы однофазного выпрямителя» .....	29
Лабораторная работа № 4 «Изучение основных свойств избирательных цепей (фильтров)» .....	41
Лабораторная работа № 5 «Снятие вольт-амперных характеристик нелинейных элементов на постоянном токе» .....	48
Лабораторная работа № 6 «Исследование двухкаскадного транзисторного усилителя» .....	58
Лабораторная работа № 7 «Изучение работы RS-триггера, мультивибратора и одновибратора» .....	66
Лабораторная работа № 8 «Исследование основных логических элементов на транзисторах» .....	73
<i>Блок виртуальных работ</i> .....	79
Лабораторная работа № 1 «Исследование идеальных элементов электрической цепи» .....	79
Лабораторная работа № 2 «Исследование электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении R-, L- и C-элементов» .....	83
Лабораторная работа № 3 «Исследование электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении R-, L- и C-элементов» .....	88
Лабораторная работа № 4 «Исследование трехфазной цепи переменного тока при соединении электроприемников по схеме «звезда» .....	93

Назир Ашурбекович Ашурбеков  
Мадина Закарьяевна Закарьяева

Физический практикум по радиофизике и электронике

Учебно-методическое пособие

Компьютерная верстка Искандерова Г.А.

Подписано в печать 07.11.2025.

Усл. п. л. 12,4.

Тираж 50 экз.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Уч.-изд. л. 3,6.

Заказ №

---

Издательство ДГУ  
г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 59е