

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Двоеглазов Семен Иванович  
Должность: Директор  
Дата подписания: 30.06.2025 15:34:07  
Уникальный программный ключ:  
2cc3f5fd1c09cc1a69668dd98bc3717111a1a535

1



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
**Старооскольский филиал**  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
**«Российский государственный геологоразведочный университет имени  
Серго Орджоникидзе»  
(СОФ МГРИ)**

Кафедра «Прикладной геологии технологии поисков и разведки месторождений  
полезных ископаемых».

Огорельцев А. И.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ

для студентов, обучающихся по специальностям:

21.05.02 «Прикладная геология»

21.05.03 «Технология геологической разведки»

21.05.04 «Горное дело»

Старый Оскол, 2022

УДК 621.3.01.

**Составитель:** старший преподаватель А.И. Огорельцев

**Рецензент:** кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшей математики и информатики» СТИ НИТУ МИСиС О.А. Верзилина

Электротехника и электроника: Методические указания по выполнению лабораторных работ. для студентов, обучающихся по специальностям: 21.05.02 «Прикладная геология», 21.05.03 «Технология геологической разведки», 21.05.04 «Горное дело»/ сост.: А.И. Огорельцев – Старый Оскол: СОФ МГРИ, 2022 г.- 144 с.

В методических указаниях в соответствии с учебной программой описаны состав и отдельные компоненты типового лабораторного оборудования, используемого в курсах «Электротехника и электроника». Представлены общие сведения и руководства по выполнению базовых экспериментов. Предназначаются для студентов, обучающихся по специальностям: 21.05.02 «Прикладная геология», 21.05.03 «Технология геологической разведки», 21.05.04 «Горное дело» изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

Утверждено и рекомендовано к изданию Ученым советом СОФ МГРИ (протокол №9 от 28.06.2022 г.).

© СОФ МГРИ  
© А.И. Огорельцев

## Содержание

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Введение.....</b>                                               | <b>4</b>   |
| <b>Ознакомление с комплектом лабораторного оборудования....</b>    | <b>8</b>   |
| <b>Лабораторная работа № 1.....</b>                                | <b>24</b>  |
| <i>Исследование и расчёт электрических цепей постоянного тока.</i> |            |
| <b>Лабораторная работа № 2.....</b>                                | <b>37</b>  |
| <i>Исследование электрических цепей переменного тока.</i>          |            |
| <b>Лабораторная работа № 3.....</b>                                | <b>51</b>  |
| <i>Исследование трёхфазных электрических цепей.</i>                |            |
| <b>Лабораторная работа № 4.....</b>                                | <b>74</b>  |
| <i>Исследование и расчёт неразветвлённых магнитных цепей.</i>      |            |
| <b>Лабораторная работа № 5.....</b>                                | <b>88</b>  |
| <i>Исследование и расчёт полупроводниковых выпрямителей.</i>       |            |
| <b>Лабораторная работа № 6.....</b>                                | <b>107</b> |
| <i>Исследование работы электронных устройств.</i>                  |            |
| <b>Лабораторная работа № 7.....</b>                                | <b>135</b> |
| <i>Исследование работы однофазного трансформатора.</i>             |            |
| <b>Литература.....</b>                                             | <b>139</b> |

## Введение

В комплект типового лабораторного оборудования «Электротехника и электроника» ГалСен\* ЭОЭ4М-С-К входят компоненты, предназначенные для проведения лабораторного практикума по разделам линейные электрические цепи постоянного и переменного тока, нелинейные электрические и магнитные цепи, основы электроники.

Таковыми компонентами являются:

- однофазный источник питания,
- блок генераторов напряжений с наборным полем;
- набор миниблоков;
- блок мультиметров;
- ваттметр;
- USB осциллограф и ноутбук
- соединительные провода и перемычки, питающие кабели.

В первой главе данного руководства описано устройство этих составных частей, даны рекомендации по их использованию и приведены некоторые технические характеристики. В последующих главах описаны базовые эксперименты.

Описание каждого эксперимента содержит общие сведения и экспериментальную часть.

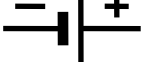
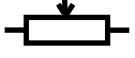
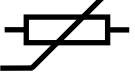
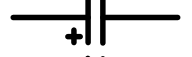
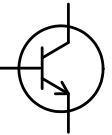
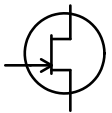
Раздел «Общие сведения» содержит краткое введение в теорию соответствующего эксперимента. Для более глубокого изучения теоретического материала учащемуся следует обратиться к учебникам и компьютерным программам тестирования для проверки усвоения теории и оценки готовности к лабораторно–практическим занятиям.

В разделе «Экспериментальная часть» сформулированы конкретные задачи эксперимента, представлены схемы электрических цепей, таблицы и графики для регистрации и представления экспериментальных данных.

Настоящее руководство предназначено для быстрого освоения комплекса преподавателями кафедр и разработки ими необходимых материалов для проведения лабораторного практикума в соответствии с рабочими планами и традициями кафедр. На первом этапе внедрения рассматриваемых комплектов типового лабораторного оборудования в учебный процесс данное руководство или его отдельные фрагменты могут непосредственно использоваться студентами при выполнении лабораторных работ.

Условные обозначения основных элементов электрических цепей приведены в табл. В.1. В табл. В.2 представлены базовые электрические величины и их единицы измерения.

Таблица В.1

| Наименование элемента                                                                                                                                                                                                                                  | Условное обозначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Наименование элемента                                                                                                          | Условное обозначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Источники электрической энергии:</b><br><br>источник напряжения (ЭДС) постоянного тока (идеальный)<br><br>источник постоянного тока (идеальный)<br><br>гальванический элемент или аккумулятор<br><br>источник напряжения (ЭДС) синусоидального тока | <br><br><br><br><br><br> | <b>Проводники электрической цепи:</b><br><br>одиночный<br><br>пересекающиеся, несоединенные<br><br>пересекающиеся, соединенные | <br><br><br><br>                                                                                                    |
| <b>Резисторы:</b><br><br>Постоянный линейный<br><br>Переменный линейный<br><br>Нелинейный                                                                                                                                                              | <br><br><br><br>                                                                                    | <b>Выключатели:</b><br><br>однополюсные<br><br>двухполюсные                                                                    | <br><br>                                                                                                                                                                                           |
| <b>Индуктивности:</b><br><br>Линейная<br><br>С разомкнутым магнитопроводом<br><br>С магнитопроводом                                                                                                                                                    | <br><br><br><br>                                                                                    | <b>Конденсаторы</b><br><br>Общее обозначение<br><br>Полярный (электролитический)<br>Нелинейный                                 | <br><br><br><br>                                                                                              |
| <b>Трансформатор</b>                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Диоды и тиристоры:</b><br>Выпрямительный диод<br><br>Стабилитрон<br><br>Диодный тиристор<br><br>Триодный тиристор           | <br><br><br><br><br><br> |
| <b>Транзисторы:</b><br><br>Биполярный<br><br>Униполярный (полевой)                                                                                                                                                                                     | <br><br>                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

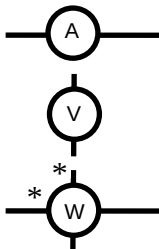
|                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                                                                 |                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Лампы накаливания:</b><br><br>осветительная <br><br>сигнальная  |  | <b>Измерительные приборы:</b><br><br>амперметр<br><br>вольтметр<br><br>ваттметр |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|

Таблица В.2

| Величина       | Обозначение | Единица измерения | Другие используемые величины |
|----------------|-------------|-------------------|------------------------------|
| Заряд          | Q           | 1 К = 1 Кулон     | мК                           |
| Ток            | I           | 1 А = 1 Ампер     | мА, мкА                      |
| Напряжение/ЭДС | U/E         | 1 В = 1 Вольт     | мВ, кВ                       |
| Сопротивление  | R           | 1 Ом              | кОм, МОм                     |
| Проводимость   | G           | 1 См = 1 Сименс   |                              |
| Индуктивность  | L           | 1 Гн = 1 Генри    | мГн, мкГн                    |
| Ёмкость        | C           | 1 Ф = 1 Фарада    | мкФ, нФ, пФ                  |

## **Ознакомление с комплектом типового лабораторного оборудования**

### ***Общие сведения***

#### **Компоновка оборудования**

Все единицы оборудования (блоки) имеют стандартные размеры, что позволяет устанавливать их в настольную раму с контейнером. Расположение блоков в раме жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. При необходимости на стол устанавливается осциллограф (USB-приставка или электронный) и ноутбук.

Питание на стенд подаётся от трёхпроводной однофазной сети (с защитным проводником) через однофазный источник питания. В нём смонтированы устройство защитного отключения при нарушении изоляции, автомат для защиты от сверхтоков. На нём имеются розетки и разъёмы для подключения всех остальных блоков и осциллографа.

В выдвижном ящике хранятся набор миниблоков, соединительные провода, перемычки и шнуры питания, методические материалы. Ящик имеет встроенный замок.

#### **Блок генераторов напряжений с наборным полем**

Блок генераторов напряжения с наборным полем (БГННП) предназначен для формирования однофазных сигналов различной формы, регулируемых по амплитуде и частоте, формирования трёхфазного напряжения и постоянных напряжений для питания исследуемых схем. БГННП содержит наборное поле для сборки электрических схем с использованием набора миниблоков.

Синусоидальное, прямоугольное или импульсное напряжения на выходе генератора задается переключателем «ФОРМА». Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах от 0 до 12 В. Диапазон регулирования частоты генератора напряжений специальной формы - от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра.

Генератор постоянных напряжений для получения стабилизированных напряжений +15В – 15В и регулируемого напряжения

от 0 до 13 В. Все генераторы имеют общую точку « $\perp$ ».

Общий вид блока генераторов напряжений показан на рис. 1.2. В левой части расположены органы управления источников питания, в правой – гнезда для подключения исследуемых элементов электрической цепи (миниблоков). В нижней части показан фрагмент электрической цепи, собранной на наборном поле.

Все источники напряжений включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 0,5 А.

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений имеют

общую точку « $\perp$ », не соединённую с заземлённым корпусом блока. Источники защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Наборная панель, расположенная справа от генератора напряжений служит для расположения на ней миниблоков в соответствии со схемой данного опыта.

Гнезда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнезда панели. Остальные соединения выполняются проводами и перемычками. Так на фрагменте цепи, показанной на рис.1.2, напряжение от фазы С трёхфазного источника подводится с помощью перемычки к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно.

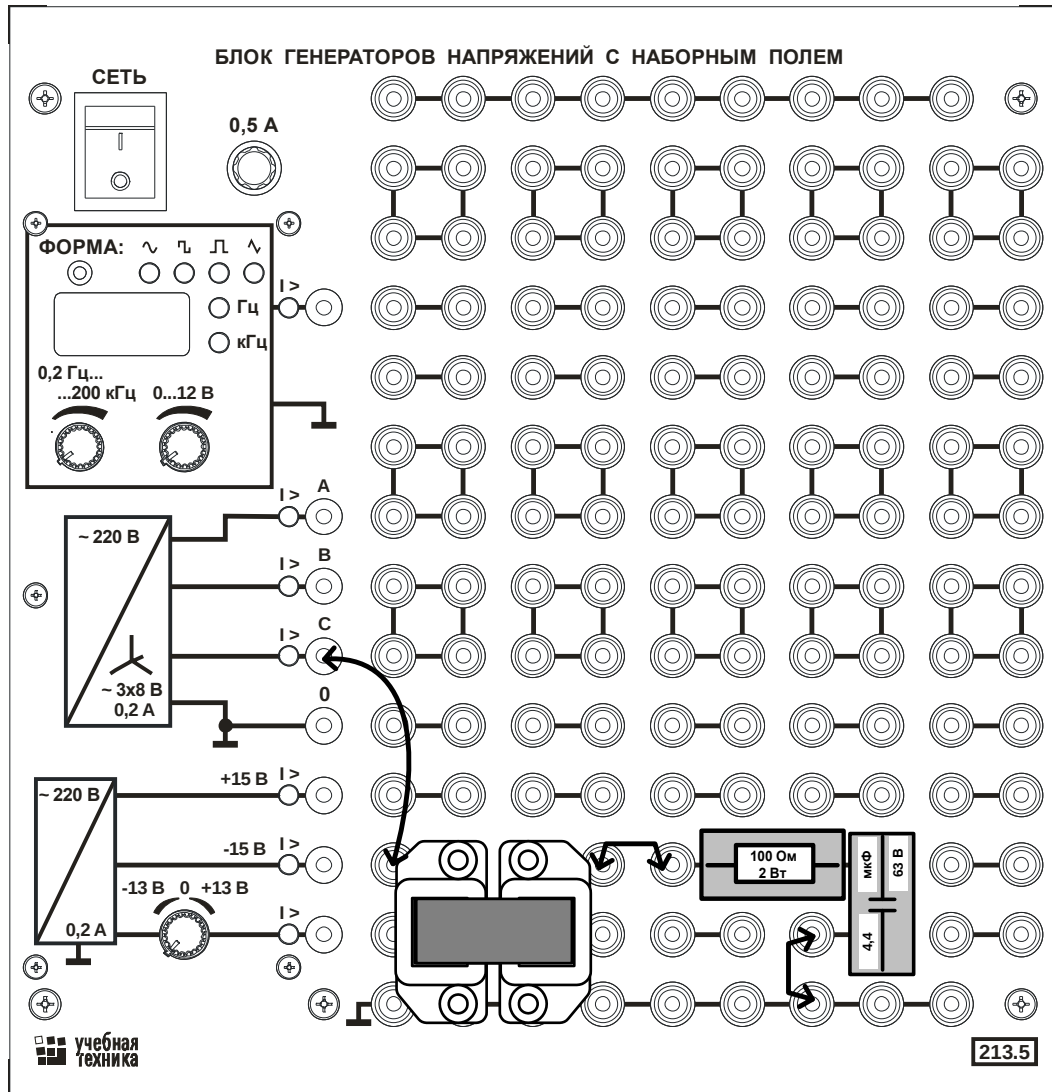


Рис.1.1. Общий вид блока генераторов напряжений.

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

### Набор миниблоков

Миниблоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые миниблоки содержат несколько элементов, соединённых между собой или более сложные функциональные

блоки. На этикетках миниблоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Миниблоки хранятся в специальном контейнере. Общий вид контейнера с миниблоками представлен на рис. 1.2.

В табл. 1.1 приведены характеристики одноэлементных миниблоков, а ниже дано описание более сложных миниблоков.

Таблица 1.1

| Наименование и характеристики       | Кол. | Наименование и характеристики                 | Кол. |
|-------------------------------------|------|-----------------------------------------------|------|
| 1. Резисторы МЛТ, 2 Вт, $\pm 5\%$ : |      | 2. Конденсаторы К-73-9, К73-17<br>63...100 В: |      |
| 2,2                                 | 1    | 0,01 мкФ                                      | 1    |
| 4,7                                 | 1    | 0,1 мкФ                                       | 1    |
| 10 Ом                               | 1    | 0,22 мкФ                                      | 1    |
| 22 Ом                               | 1    | 0,47 мкФ                                      | 2    |
| 33 Ом                               | 1    | 1 мкФ                                         | 2    |
| 47 Ом                               | 1    | 4,4 мкФ (2 по 2,2 мкФ)                        | 1    |
| 100 Ом                              | 2    | SR-63 В, 10 мкФ                               | 1    |
| 150 Ом                              | 1    | SR-63 В, 100 мкФ                              | 1    |
| 220 Ом                              | 1    | SR-35 В, 470 мкФ                              | 1    |
| 330 Ом                              | 1    | 3. Потенциометр СП4-2М 1 кОм                  | 1    |
| 470 Ом                              | 2    | 4. Лампа сигнальная СМН-10 55                 | 1    |
| 1 кОм                               | 3    | 5. Стабилитрон КС456А, 5,6 В                  | 1    |
| 2,2 кОм                             | 1    | 6. Светодиод АЛ 307 Б                         | 1    |
| 4,7 кОм                             | 1    | 7. Диоды КД 226 (1N5408) 1А, 100 В            | 6    |
| 10 кОм                              | 2    | 8. Микропереключатель (тумблер)               | 1    |
| 22 кОм                              | 1    | 10. Индуктивности:                            |      |
| 47 кОм                              | 1    | 33 мГн, 50 мА (09Р333J)                       | 2    |
|                                     |      | 100 мГн, 50 мА (3 шт. 09Р333J)                | 1    |
|                                     | 1    | 14. Транзистор биполярный                     |      |
|                                     | 1    | КТ503Г (вывод базы справа)                    | 1    |
|                                     | 1    | 17. Транзистор биполярный                     |      |
|                                     | 2    | КТ503Г (вывод базы слева)                     | 1    |

9. Миниблоки «Амперметр» (6 шт.) позволяют подключать амперметр (мультиметр) в различные ветви исследуемой электрической цепи без разборки схемы. Эти миниблоки устанавливаются в наборную панель в тех местах схемы, где требуется измерять токи. В крышку миниблока встроено гнездо коаксиального разъёмного соединителя, а к амперметру подсоединяется кабель с соответствующими штырями.

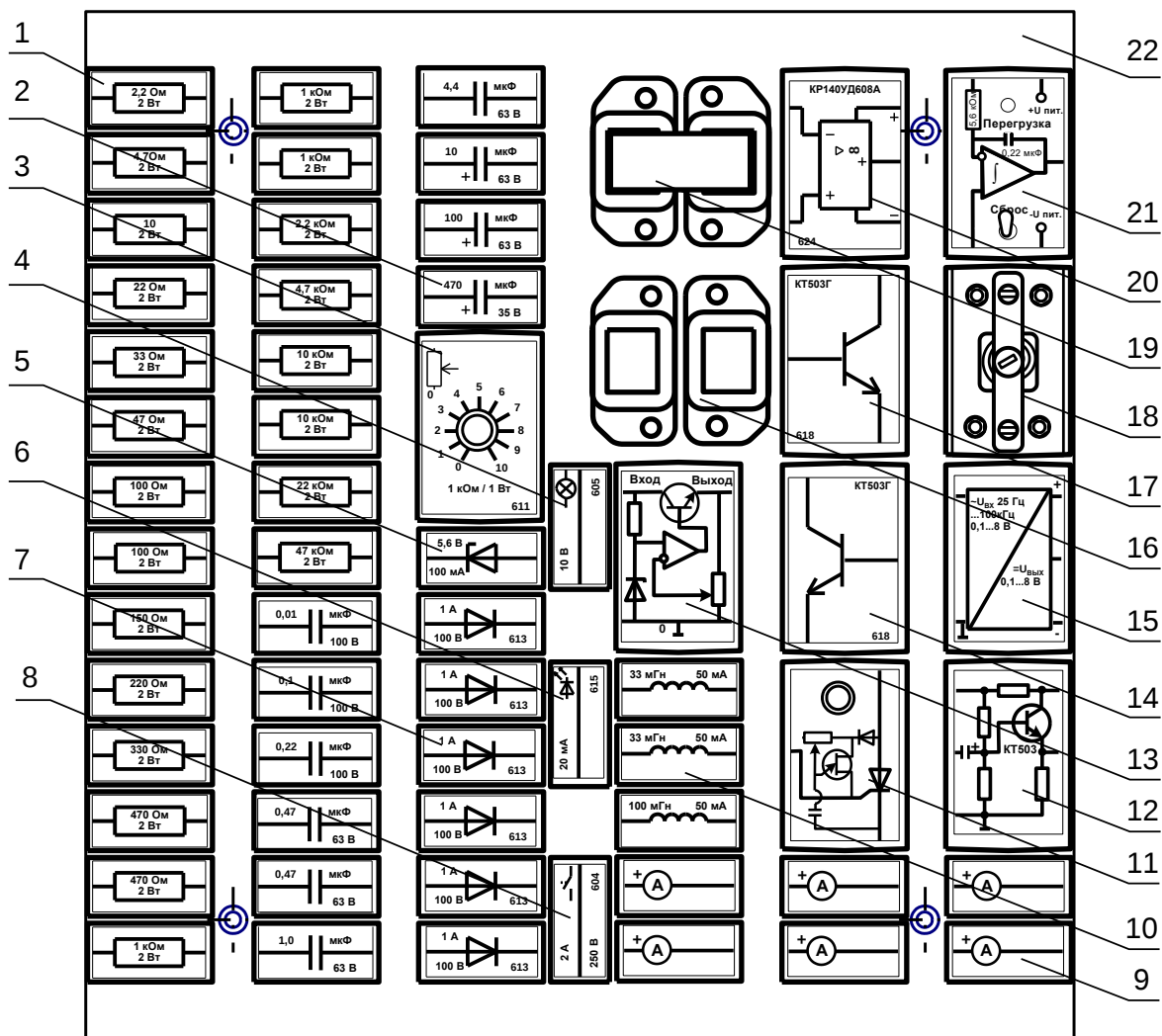


Рис. 1.2. Общий вид контейнера с миниблоками.

11. Миниблок «**Фазовое управление тиристора**» содержит маломощный тиристор КУ101 и генератор импульсов (рис. 1.3). Генератор импульсов выполнен на однопереходном транзисторе VT1. При подаче полуволны напряжения на анод запертого тиристора конденсатор C1 заряжается через сопротивления R<sub>1</sub> и R<sub>3</sub>. Когда напряжение на конденсаторе достигает значения 0,7...0,8 от напряжения стабилизации стабилитрона, транзистор открывается и конденсатор разряжается по цепи эмиттер – база – управляющий электрод – катод тиристора. Тиристор отпирается, создает цепь для протекания тока через нагрузку и одновременно шунтирует генератор импульсов. Скорость заряда конденсатора и, следовательно, задержка подачи отпирающего импульса по отношению к моменту подачи положительного напряжения на анод тиристора регулируется потенциометром R<sub>3</sub>. Вывод X2 служит только для наблюдения импульсов управления с помощью осциллографа.

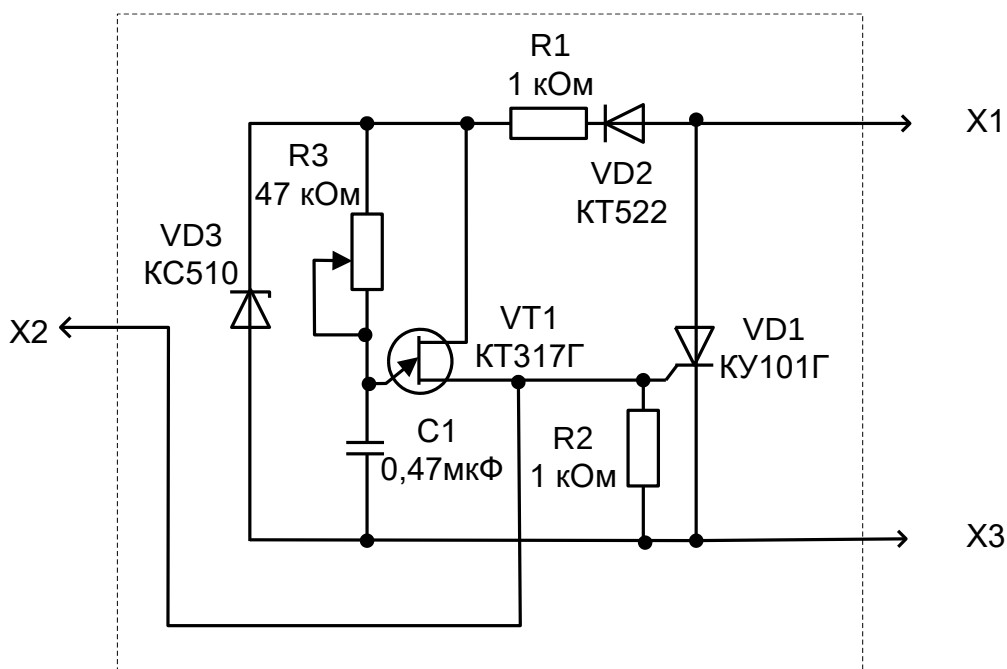


Рис.1.3. Схема блока фазового управления тиристора.

12. Миниблок «**Усиительный каскад с общим эмиттером**» служит для исследования однокаскадных и двухкаскадных транзисторных усилителей. Его схема изображена на рис. 1.4. Конденсатор C1 является разделительным, а конденсатор C2 служит для уменьшения верхней границы полосы пропускания.

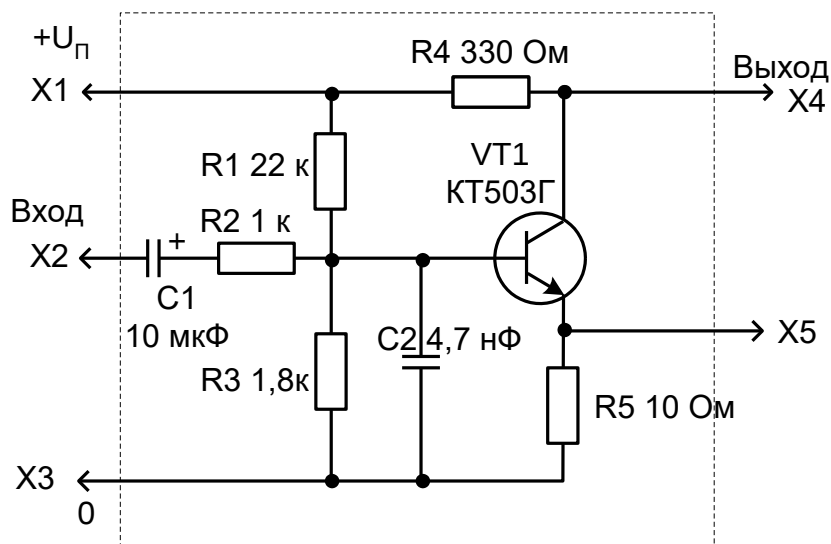


Рис. 1.4. Схема блока усилительного каскада с общим эмиттером.

13. Миниблок «**Стабилизатор напряжения**» (рис.1.5) представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования выходного напряжения и состоит из регулирующего элемента, совмещённого с усилителем (VT1), (DD1), сравнивающего устройства (DD1) и источника

опорного напряжения (VD2). Для задания величины выходного напряжения служит потенциометр R2.

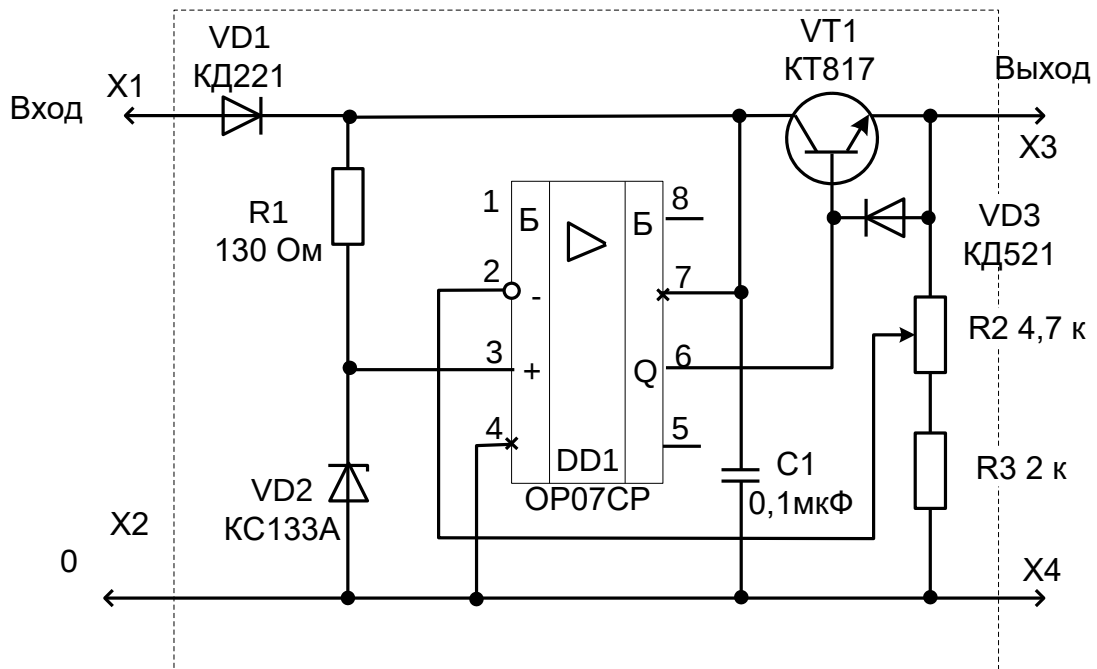


Рис.1.5. Схема блока стабилизатора напряжения.

15. Миниблок **«Измерительный преобразователь»** служит для измерения высокочастотных сигналов, например, при снятии частотных характеристик электрических цепей. Необходимость в этом миниблоке обусловлена тем, что диапазон частот мультиметров, входящих в комплект стенда, составляет от 40 до 400 Гц. Он представляет собой выпрямитель на вход которого подаётся синусоидальное измеряемое напряжение, а к выходу подключается мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения. Выпрямитель выполнен на операционном усилителе и его коэффициент передачи подобран так, что величина постоянного выходного напряжения равна действующему значению переменного входного напряжения.

17 и 19. Миниблок **«Трансформатор»**. Трансформатор выполнен на разъёмном U-образном сердечнике из листовой электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На сердечнике установлены катушки 900 и 300 витков, и имеются две сменные катушки 300 и 100 витков. Катушки легко переставляются в ходе лабораторной работы. Номинальные параметры трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

| W   | U <sub>н</sub> , В | I <sub>н</sub> , мА | R, Ом | S <sub>н</sub> , ВА |
|-----|--------------------|---------------------|-------|---------------------|
| 100 | 2,33               | 600                 | 0,9   | 1,4                 |
| 300 | 7                  | 200                 | 4,8   | 1,4                 |
| 900 | 21                 | 66,7                | 37    | 1,4                 |

18. Миниблок **«Магнитная цепь»** (рис.1.6) представляет собой трансформатор с регулируемым зазором в магнитопроводе. Магнитопровод выполнен из двух Ш-образных ферритовых сердечников марки М2000НМ. На среднем стержне магнитопровода расположены две одинаковые обмотки (намагничивающая и измерительная) по 200 витков каждая. Зазор может регулироваться винтом, один оборот которого изменяет зазор на 0,5мм (шаг резьбы 0.5 мм). Для устранения перекоса сердечника рекомендуется в левый и правый зазоры вставить немагнитные прокладки (например, полоски бумаги) и осторожно от руки затянуть винт. Так, например, толщина бумаги «Снегурочка» для офисной техники 0,1 мм, толщина газетной бумаги - 0.05...0,06 мм.

***Будьте осторожны: большое усилие при затягивании винта может привести к разлому печатной платы, на которой смонтирована вся конструкция!***

Необходимые для расчёта размеры сердечника и кривая намагничивания феррита М2000НМ приведены в описании экспериментов с этим миниблоком.

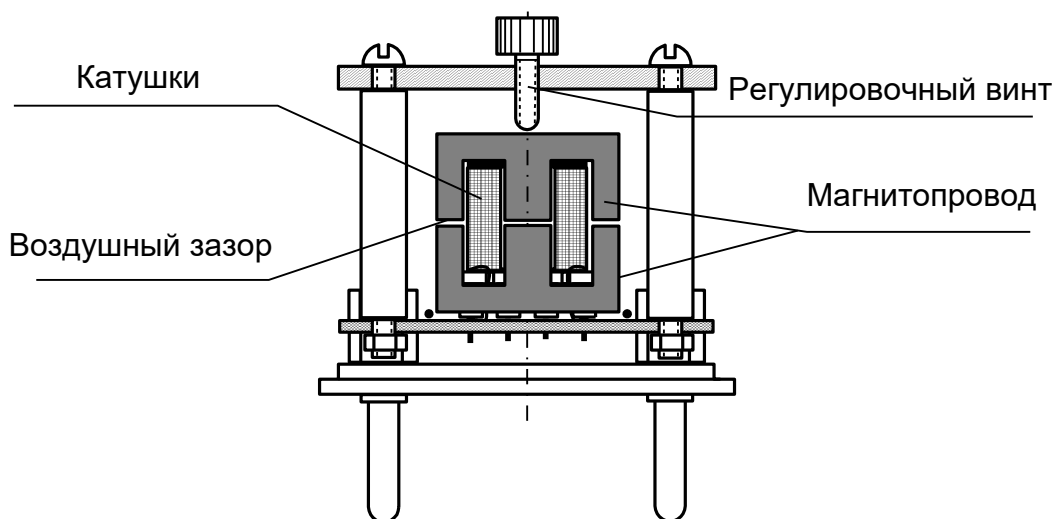


Рис. 1.6. Общий вид трансформатора

20. Миниблок **«Операционный усилитель»** содержит операционный усилитель КР140УД или импортный аналог 608, подстроечный резистор

для балансировки и диоды, защищающие микросхему от подачи обратного напряжения питания.

21. Миниблок «*Интегратор*» предназначен для интегрирования входного сигнала  $u_{вх}(t)$  или  $i_{вх}(t)$  по времени:

$$u_{\text{blx}} = \frac{1}{R_{\text{ex}}C} \int u_{\text{ex}}(t) dt = \frac{1}{C} \int i_{\text{ex}}(t) dt.$$

Параметры  $R_{\text{вх}}$  и  $C$  указаны на упрощенной принципиальной схеме интегратора (рис.1.7).

Интегратор имеет два режима работы. При разомкнутом состоянии выключателя «Сброс» (нижнее положение тумблера на миниблоке) происходит интегрирование входного сигнала. Напряжение на выходе в этом режиме медленно изменяется даже при отсутствии входного сигнала, поскольку всегда есть внутренние утечки схемы и помехи. Этот режим используется для интегрирования кратковременных одиночных импульсов тока или напряжения. Перед началом интегрирования необходимо «обнулить» интегратор включив на 2...3 с выключатель «Сброс».

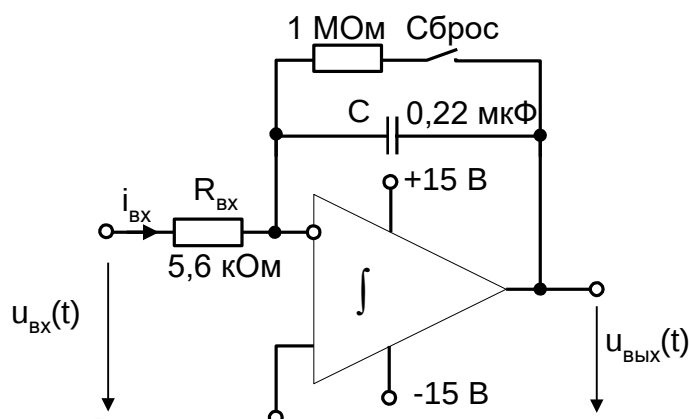


Рис. 1.7. Принципиальная схема интегратора.

При включённом выключателе «Сброс» (верхнее положение тумблера на миниблоке) медленно изменяющаяся составляющая входного сигнала не интегрируется. Этот режим используется для возвращения интегратора в нулевое положение и для интегрирования периодических быстро протекающих процессов, например, при снятии петли гистерезиса.

Напряжение на выходе интегратора не может быть больше напряжения питания, поэтому, когда оно приближается к напряжению питания +15 В или -15 В, включается светодиод «Перегрузка».

## Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 1.8. В нём установлены 2 серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводится в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

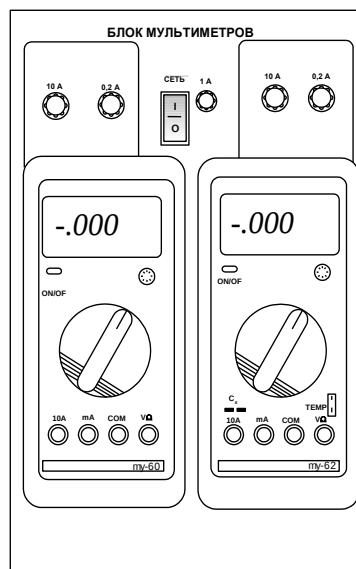


Рис. 1.8. Общий вид блока

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

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

может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

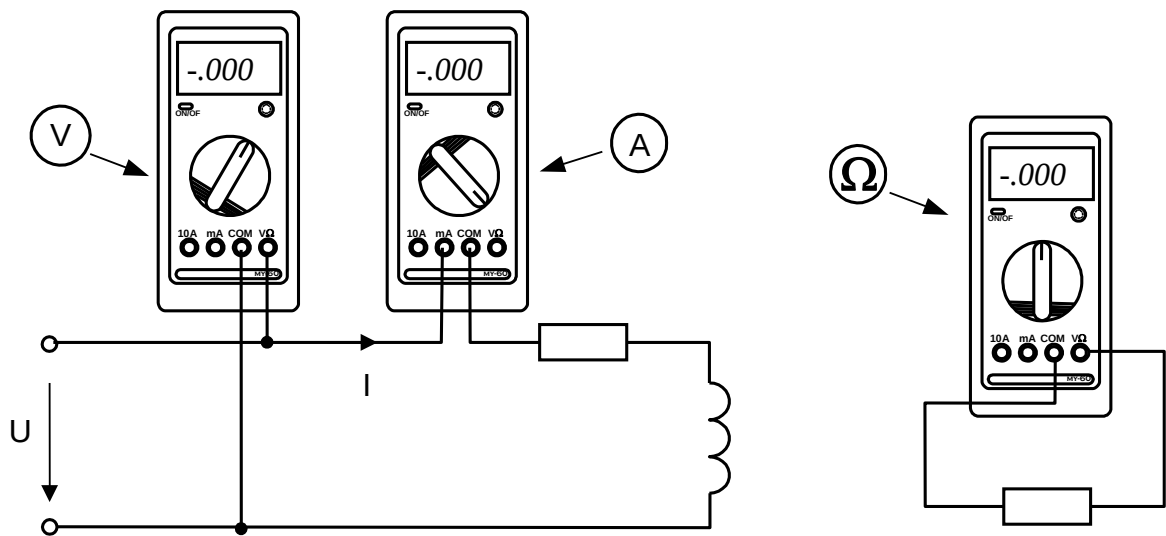


Рис. 1.9. Схемы подключений мультиметров.

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

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

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 1.9.

## Ваттметр

Общий вид ваттметра изображён на рис. 1.10.

Его принцип действия основан на перемножении мгновенных значений тока и напряжения и отображении среднего значения этого произведения на дисплее прибора в цифровом виде.

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

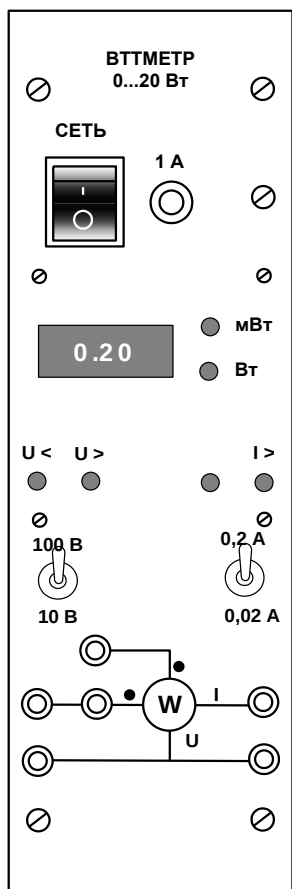


Рис. 1.10. Общий вид ваттметра.

Справа от окошка цифровых индикаторов включаются автоматически светодиоды

сигнализации размерности **Вт** или **мВт**.

## USB осциллограф и ноутбук

В данный комплект типового лабораторного оборудования входит ноутбук общего применения. В описанных в Руководстве экспериментах ноутбук совместно с USB приставкой используется в качестве осциллографа, хотя не исключены и другие его применения. Придерживайтесь следующего порядка его использования при выполнении экспериментов.

- Подключите сетевой блок питания к компьютеру (ноутбуку) и к розетке ~220 В.

- Включите выключатели на лицевой панели однофазного источника питания.
- Включите компьютер, дождитесь загрузки Windows, запустите программу DSO 2090 USB, необходимое для выполнения экспериментов. В конкретной лаборатории может быть установлен и иной порядок загрузки Windows (с вводом паролей и т. п.).
- По окончании работы закройте все запущенные программы и выключите компьютер, например, следующей последовательностью нажатия кнопок и выбора пунктов меню: «ПУСК» → «Завершение работы» → «Завершение работы» → «ОК».

Возможна и несколько иная последовательность в зависимости от настройки компьютера и установленной версии Windows.

При достаточном заряде возможно питание ноутбука и от встроенной батареи, но необходимо помнить, что даже при полностью заряженной батарее, время автономной работы большинства ноутбуков не превышает 1,5...2 часов.

Стенд укомплектован USB осциллографом DSO2090 или аналогичным. Перед первым использованием осциллографа необходимо установить на компьютер его драйвер и программное обеспечение. Установка программного обеспечения осциллографа и драйвера устройства подробно описана в «Руководстве по эксплуатации цифрового USB осциллографа DSO -2090» (файл DSO2090-manual.pdf на диске с программным обеспечением типового комплекта оборудования). При установке программы и драйверов на ноутбук без привода компакт дисков необходимо содержимое компакт диска из комплекта осциллографа перенести на жесткий диск ноутбука, например, использовать компьютер с приводом компакт дисков и накопитель USB flash.

Порядок работы с осциллографом подробно описан в упомянутом выше Руководстве. Здесь перечислены только основные действия при выполнении базовых экспериментов.

1. Ознакомьтесь и строго следуйте рекомендациям по безопасному использованию осциллографа, изложенным в «Руководстве по эксплуатации цифрового USB осциллографа DSO -2090» (файл DSO2090-manual.pdf на диске с программным обеспечением типового комплекта оборудования).
2. Подключение осциллографа и запуск программного обеспечения.

### **Исходное состояние:**

- блок осциллографа отключен от испытываемых установок – на входах осциллографа CH1 и CH2 нет напряжения;
- кабель USB подключен к осциллографу и к компьютеру (ноутбуку). При подключении к работающему компьютеру кабель USB подключите сначала к осциллографу, а затем – к компьютеру;

- запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows .

или выберите пункт меню «ПУСК» → «Все программы» → «DSO -2090 USB» → «DSO -2090 USB» (для Windows XP).

Подробно работа программы описана в «Руководстве по эксплуатации цифрового USB осциллографа DSO -2090».

### **3. Работа с осциллографом.**

- убедитесь, что отключены источники питания всех блоков испытываемой цепи. Допустимость подачи напряжения на некоторые блоки может быть указана в руководстве по выполнению экспериментов.
- подключите щупы осциллографа к исследуемой цепи строго в соответствии с указаниями руководства по выполнению эксперимента. При использовании щупов с делителями напряжения установите переключатель делителя напряжения (x1-x10) в соответствии с требованиями руководства. Превышение допустимого напряжения на входе может вывести осциллограф (и компьютер) из строя.
- после проверки правильности сборки испытываемой цепи и подключения осциллографа включите питание экспериментальной установки и выполните необходимые измерения.
- по окончании эксперимента отключите питание испытываемой цепи и компьютера.

## ***Экспериментальная часть***

### **Задание**

Проверить работоспособность блока генераторов напряжений, измерительных приборов и USB осциллографа.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме рис.1.11, включив в нее для начала резистор  $R = 100\text{ Ом}$ . Осциллограф пока не подсоединяйте и не включайте. Подайте на вход питание от нерегулируемого источника постоянного напряжения  $+15\text{ В}$ , и убедитесь, что напряжение равно  $15 \pm 0,5\text{ В}$ , а ток примерно равен  $150\text{ мА}$ .
- **Переключите мультиметр для измерения тока  $2\text{ А}$** , замените резистор  $100\text{ Ом}$  на  $47$  или  $33\text{ Ом}$ , убедитесь, что через некоторое время срабатывает защита и включается сигнализация перегрузки.

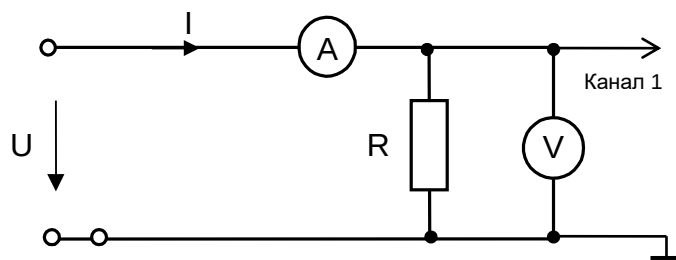


Рис. 1.11. Схема измерений резистора.

- Повторите этот опыт с другим нерегулируемым источником напряжения  $-15\text{ В}$  и с регулируемым источником при максимальном напряжении на его выходе.
- Установите в схему резистор  $47\text{ Ом}$ , переключите мультиметры для измерения синусоидальных сигналов и подключите к схеме генератор напряжений специальной формы.
- Включите компьютер и подсоедините осциллограф. При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение  $\times 1$ . Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные штыри из комплекта аксессуаров.
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку. Включите ноутбук и активизируйте программу осциллографа. (Ярлык  DSO-2090USB на рабочем столе).
- Установите на дисплее по первому каналу (CH1) осциллографа множитель  $\times 1$  и чувствительность  $5\text{ Вдел}$ .
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания.

- Включите выключатель «СЕТЬ» блока генераторов напряжений.
- Установите синусоидальный сигнал на выходе и убедитесь, что частота и амплитуда напряжения регулируются (по осциллографу). На частоте 1000 Гц (или какойнибудь другой) убедитесь, что переключается форма сигнала. **Внимание! Мультиметры не измеряют несинусоидальные токи и напряжения!**
- Замените резистор 47 Ом на 22 Ом и убедитесь, что срабатывает защита и сигнализация перегрузки.
- Снова включите в схему резистор 100 Ом, и, подключая к ней напряжения  $U_{AO}$ ,  $U_{BO}$ ,  $U_{CO}$ ,  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  трёхфазного источника, убедитесь, что фазные напряжения регулируются в пределах от 0 до 8 В, а линейные в  $\sqrt{3}$  раз больше. Замените резистор 100 Ом на 22 Ом и проверьте работу защиты каждой фазы.
- Закройте окно виртуального осциллографа, нажав на кнопку Х.
- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».
- Разберите цепь

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Цель работы

Измерение сопротивлений, токов, напряжений и мощности в цепи постоянного тока.

Исследование цепи постоянного тока с последовательным, параллельным и смешанным соединением резисторов.

### 1. Измерение сопротивлений, токов, напряжений и мощности в цепи постоянного тока

#### *Общие сведения*

**Электрической цепью** называют совокупность соединенных друг с другом элементов, по которым может протекать **электрический ток**.

Для протекания тока необходимы **источники** электрической энергии – источники напряжения (ЭДС) или тока. Электрическая цепь содержит также устройства, в которых энергия электрического тока преобразуется в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и т.д.). Эти устройства называются **нагрузками**.

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

Электрический ток есть направленное (упорядоченное) движение **носителей зарядов**. В проводниках носителями отрицательных зарядов являются электроны, в жидкостях (электролитах) носители положительных и отрицательных зарядов – ионы. В полупроводниках носителями отрицательных зарядов являются электроны, носителями положительных зарядов – дырки. Дырка представляет собой вакантное место в атоме полупроводника, незанятое электроном.

Ток, неизменный во времени, называют **постоянным**. Он обозначается символом  $I$ . Количественно ток равен заряду  $q$ , который пересекает сечение проводника за единицу времени  $t$  (1 секунду):

$$I = q / t.$$

Для поддержания электрического тока требуется обеспечивать разделение носителей отрицательных и положительных зарядов, что и происходит в источниках.

Способность источника совершать работу по разделению зарядов характеризуется электродвижущей силой (ЭДС), которая обозначается символом  $E$ .

Когда источник подключен к цепи, возникает направленное движение зарядов под действием сил притяжения разноименных и отталкивания одноименных зарядов, т. е. электрический ток. Вне источника положительные носители заряда движутся от его положительного зажима (полюса) к отрицательному зажиму (полюсу). Направление движения отрицательных зарядов противоположно движению положительных зарядов. Работа, совершаемая при движении зарядов по элементам электрической цепи, характеризуется напряжением, которое обозначается символом  $U$ .

Напряжение и ток на участке цепи постоянного тока связаны законом Ома:

$$U = RI \text{ или } I = U/R,$$

где  $R$  – коэффициент пропорциональности между током и напряжением, называемый сопротивлением.

Мощность преобразования электрической энергии в другие виды энергии выражается через ток и напряжение (закон Джоуля-Ленца):

$$P = UI = RI^2 = U^2/R.$$

Изображение электрической цепи с помощью условных обозначений называют *схемой* электрической цепи (рис. 2.1).

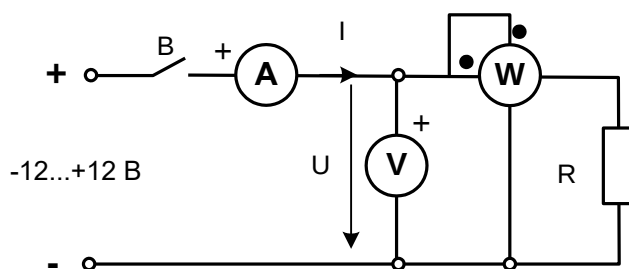


Рис. 2.1. Схема электрической цепи.

На расчётных схемах (т.е. на схемах, предназначенных для расчёта электрической цепи) показывают стрелками направления токов и напряжений. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов, а за направление напряжения – направление от положительного полюса источника к отрицательному. Когда истинные направления неизвестны, на схеме показывают условные (или предполагаемые) положительные направления.

## Экспериментальная часть

### Задание

Ознакомиться с измерениями токов, напряжений и сопротивлений с помощью мультиметра, с измерением мощности с помощью ваттметра, экспериментально убедиться в выполнении закона Ома и закона Джоуля-Ленца в электрической цепи постоянного тока.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Включите блок мультиметров, установите на одном из них переключатель в положение измерения сопротивлений ( $\Omega$ ), подключите к мультиметру с помощью соединительных проводов любое сопротивление из набора миниблоков, выберите ближайший превышающий измеряемое сопротивление предел измерения и запишите показание мультиметра  $R_{\text{изм}}$  и номинальное сопротивление, указанное на этикетке миниблока:

$$R_{\text{изм}} = \dots\dots\dots \text{Ом}; \quad R_{\text{ном}} = \dots\dots\dots \text{Ом}.$$

- Вычислите относительное отклонение измеряемого сопротивления от номинального значения в % (относительную погрешность):

$$\Delta R\% = \frac{R_{\text{изм}} - R_{\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} \times 100\% = \dots\dots\dots$$

- Соберите цепь в соответствии с принципиальной схемой (рис.2.1) и монтажной схемой (рис. 2.2), установив в наборную панель сопротивление  $R_{\text{ном}}=100\dots1000 \text{ Ом}$ . Запишите значение сопротивления в табл.2.1.
- Убедитесь, что при включении выключателя «В» в цепи появляется ток, а при выключении – исчезает.
- Устанавливая регулятором напряжения, указанные в табл. 2.1 значения, запишите в таблицу показания приборов. **Не забывайте следить за сигнальными светодиодами ваттметра! При включении светодиода  $I >$  или  $U >$  переводите соответствующий переключатель на больший предел. При включении светодиода  $I <$  или  $U <$  переключайте его на меньший предел. Следите также за светодиодами, указывающими размерность измеряемой мощности: Вт или мВт.**
- Вычислите значения мощности  $P = UI$  и сопротивления  $R = U/I$  и запишите результаты в столбцы таблицы «Вычисленные значения». Сравните результаты измерений и вычислений и сделайте выводы.

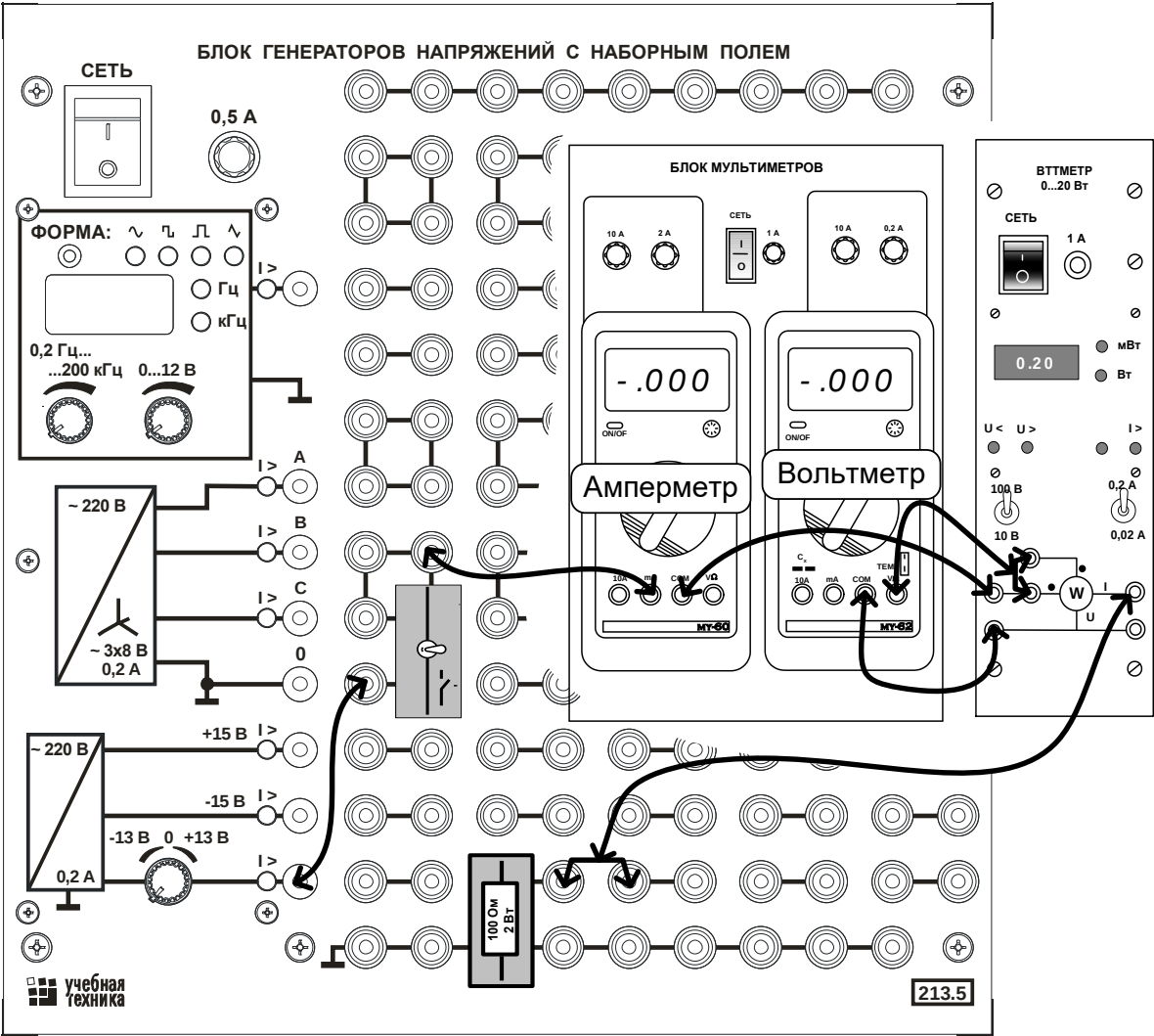


Рис.2.2. Монтажная схема.

Таблица 2.1

| $R_{НОМ}, \text{ Ом}$ | Измеренные значения |                 |                 | Вычисленные значения |                 |
|-----------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|                       | $U, \text{ В}$      | $I, \text{ мА}$ | $P, \text{ Вт}$ | $P, \text{ Вт}$      | $R, \text{ Ом}$ |
|                       | -5                  |                 |                 |                      |                 |
|                       | 4                   |                 |                 |                      |                 |
|                       | 6                   |                 |                 |                      |                 |
|                       | 8                   |                 |                 |                      |                 |
|                       | 12                  |                 |                 |                      |                 |

## 2. Цепь постоянного тока с последовательным соединением резисторов

### Общие сведения

Если резисторы или любые другие нагрузки соединены последовательно (рис. 2.3), по ним проходит один и тот же ток. Величина тока определяется приложенным напряжением  $U$  и Эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{ЭКВ}}$ :

$$I = U / R_{\text{ЭКВ}},$$

где  $R_{\text{ЭКВ}} = \Sigma R = R_1 + R_2 + R_3$ .

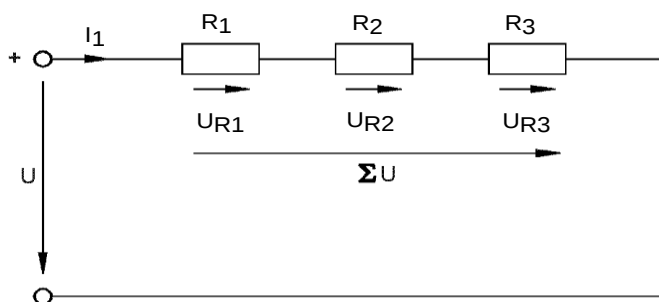


Рис. 2.3. Схема последовательного соединения резисторов.

На каждый отдельный резистор при этом приходится некоторое частичное напряжение. Сумма частичных напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа равна полному приложенному напряжению:

$$I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 = U.$$

### Экспериментальная часть

#### Задание

Измеряя токи и напряжения, убедиться, что ток одинаков в любой точке последовательной цепи и что сумма напряжений на трёх резисторах равна напряжению, приложенному ко всей цепи. Сравнить результаты измерения с расчётом.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно монтажной схеме (рис. 2.4.). Последовательно с резисторами 47, 100 и 220 Ом включите специальные миниблоки для подключения амперметра.
- С помощью двухжильного кабеля со штекером поочередно подключайте к этим миниблокам мультиметр в режиме измерения тока и измеряйте ток вдоль всей последовательной цепи. Убедитесь, что ток имеет одно и то же значение и запишите его в табл. 2.2.

- Затем измерьте напряжения на каждом резисторе, а также полное напряжение на входе цепи. Все измеренные величины занесите в табл. 2.2.
- Рассчитайте эквивалентное сопротивление цепи, ток и падение напряжения на каждом резисторе. Результаты занесите в табл. 2.2 и сравните с измеренными значениями.

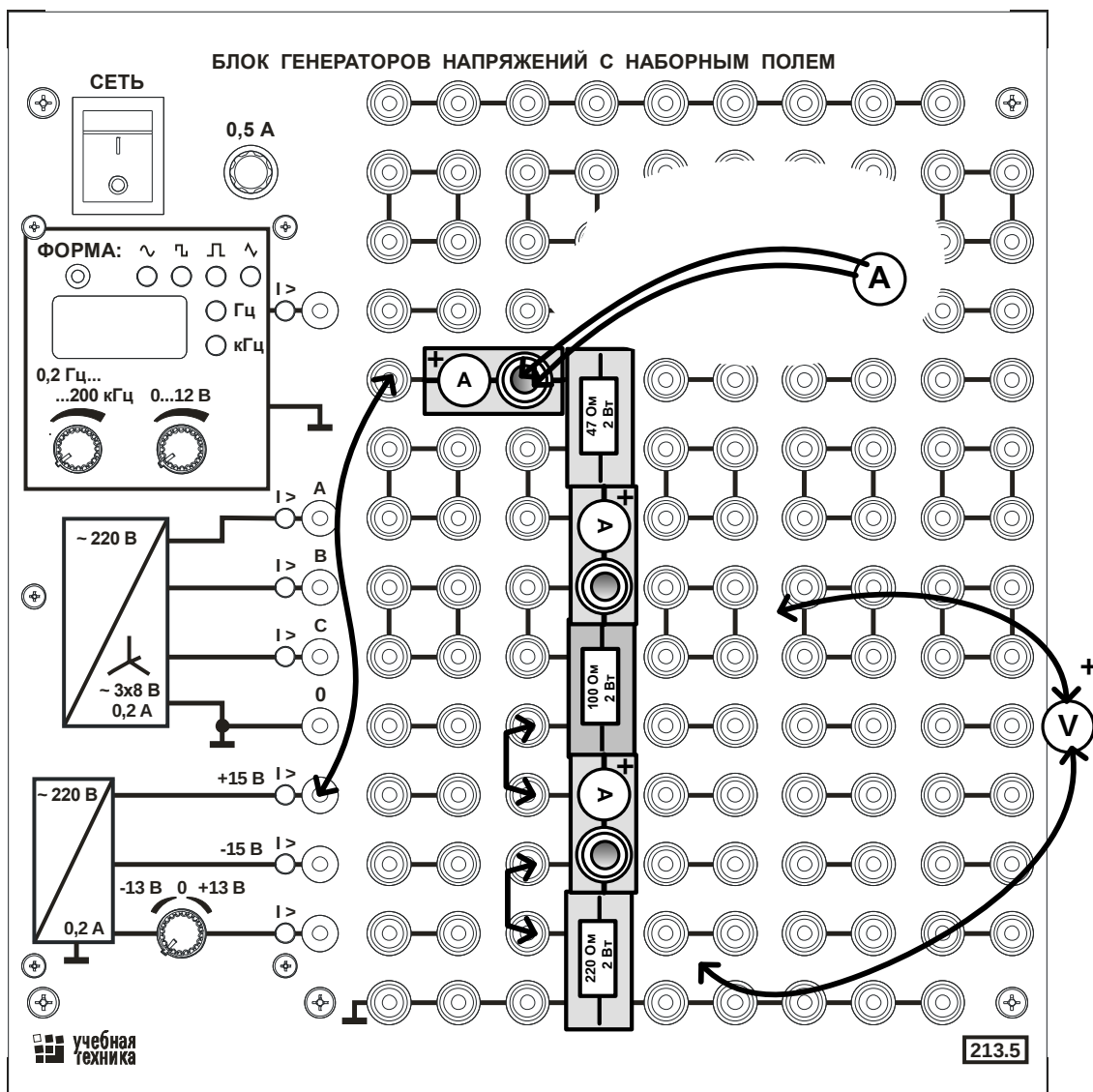


Рис. 2.4. Монтажная схема.

Таблица 2.2.

|                       | Ток<br>( $I$ ),<br>мА | Падения напряжения<br>на резисторах, В |                     |                     | Напряжение на<br>входе цепи, В         |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------------|
|                       |                       | 47 Ом<br>( $U_1$ )                     | 100 Ом<br>( $U_2$ ) | 220 Ом<br>( $U_3$ ) | $R_{\text{экв}} = \dots$ Ом<br>( $U$ ) |
| Измеренные значения   |                       |                                        |                     |                     |                                        |
| Рассчитанные значения |                       |                                        |                     |                     |                                        |

- Проверьте выполнение второго закона Кирхгофа по экспериментальным и по расчётным значениям напряжений:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

### 3. Параллельное соединение резисторов в цепи постоянного тока

#### *Общие сведения*

Если резисторы или любые другие нагрузки соединены параллельно (рис. 2.5), все они находятся под одинаковым напряжением:

$$U = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3}$$

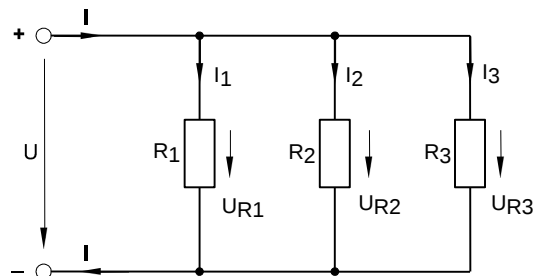


Рис. 2.5. Схема параллельного соединения резисторов.

В каждой ветви цепи протекает свой ток. Сумма токов всех ветвей в соответствии с первым законом Кирхгофа равна полному току:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Величина тока ветви зависит от приложенного напряжения и сопротивления данной ветви:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

Ток в неразветвленной части цепи зависит от приложенного напряжения и эквивалентного сопротивления цепи:

$$I_{\Sigma} = \frac{U}{R_{\Sigma}}$$

Для вычисления эквивалентного сопротивления цепи служит формула:  $\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ .

Для цепи с двумя параллельно соединенными резисторами:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

### **Экспериментальная часть**

#### **Задание**

Измеряя напряжения и токи, убедиться, что напряжение, прикладываемое к каждому резистору, одинаково и что сумма токов ветвей равна полному току цепи. Проверить результаты измерения расчётом.

#### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь согласно монтажной схеме (рис. 2.6), вставив последовательно с каждым из резисторов (330, 220 и 470 Ом) специальные миниблоки для подключения амперметра.
- Измерьте напряжение на каждом резисторе, а также напряжение на источнике. Убедитесь, что все они одинаковы и запишите значение напряжения в табл. 2.3.
- С помощью мультиметра, специального кабеля со штекером и миниблоков для подключения амперметра измерьте токи в каждом резисторе и на входе цепи. Результаты запишите в табл. 2.3.
- Рассчитайте эквивалентное сопротивление цепи, ток в каждом резисторе и на входе цепи. Результаты занесите в табл. 2.2 и сравните с измеренными значениями.
- Проверьте как по экспериментальным, так и по расчётным данным, выполняется ли первый закон Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Таблица 2.3.

|                          | Напря<br>жение<br>( <i>U</i> ), В | Токи в ветвях, мА                   |                                     |                                     | Ток на входе<br>цепи, мА                     |    |
|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|----|
|                          |                                   | 330 Ом<br>( <i>I</i> <sub>1</sub> ) | 220 Ом<br>( <i>I</i> <sub>2</sub> ) | 470 Ом<br>( <i>I</i> <sub>3</sub> ) | <i>R</i> <sub>ЭКВ</sub> =...<br>( <i>I</i> ) | Ом |
| Измеренные<br>значения   |                                   |                                     |                                     |                                     |                                              |    |
| Рассчитанные<br>значения |                                   |                                     |                                     |                                     |                                              |    |

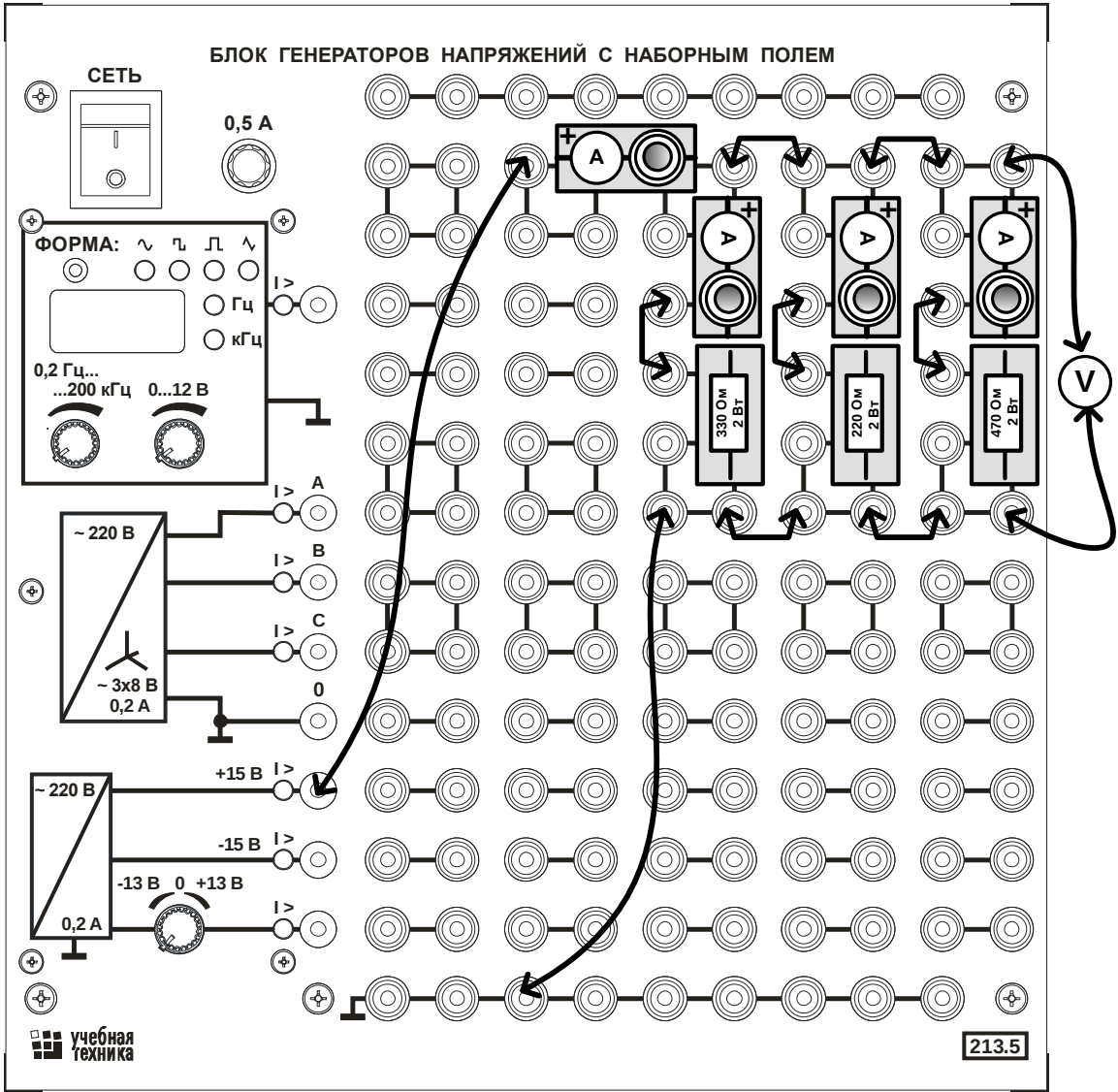


Рис. 2.6. Монтажная схема

#### 4. Цепь постоянного тока при смешанном соединении резисторов

##### *Общие сведения*

На рис. 2.7. показан пример цепи со смешанным (т.е. последовательно-параллельным) соединением резисторов. Цепь состоит из последовательно ( $R_1$  и  $R_2$ ) и параллельно ( $R_3$  и  $R_4$ ) соединенных резисторов.

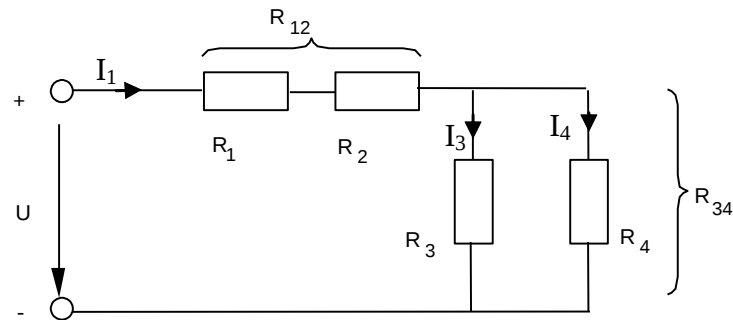


Рис. 2.7. Схема смешанного соединения резисторов.

Участки цепи с последовательным и параллельным соединением резисторов относительно друг друга соединены последовательно. Чтобы вычислить полное сопротивление цепи сначала определяют эквивалентное сопротивление параллельного участка:

$$R_{34} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

Затем определяют эквивалентное сопротивление всей цепи, состоящей теперь из трёх последовательно соединённых сопротивлений:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_{34}.$$

Для расчёта токов в этой цепи необходимо сначала определить по закону Ома ток в эквивалентном сопротивлении, он же в сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ :

$$I_1 = \frac{U}{R_{\Sigma}}.$$

После этого опять же по закону Ома определяются напряжение на участке с параллельным соединением и токи в параллельных ветвях:

$$U_{34} = I_1 R_{34}; \quad I_3 = \frac{U_{34}}{R_3}; \quad I_4 = \frac{U_{34}}{R_4}.$$

## Экспериментальная часть

### Задание

Измерить токи, напряжения и мощность в цепи при смешанном соединении резисторов. Проверить результаты измерений расчётом. Проверить выполнение первого и второго законов Кирхгофа и баланса мощностей.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно монтажной схеме (рис. 2.8.). В каждой из трёх ветвей этой схемы включены миниблоки для подключения амперметра. На входе цепи включён ваттметр для измерения полной мощности, потребляемой цепью.

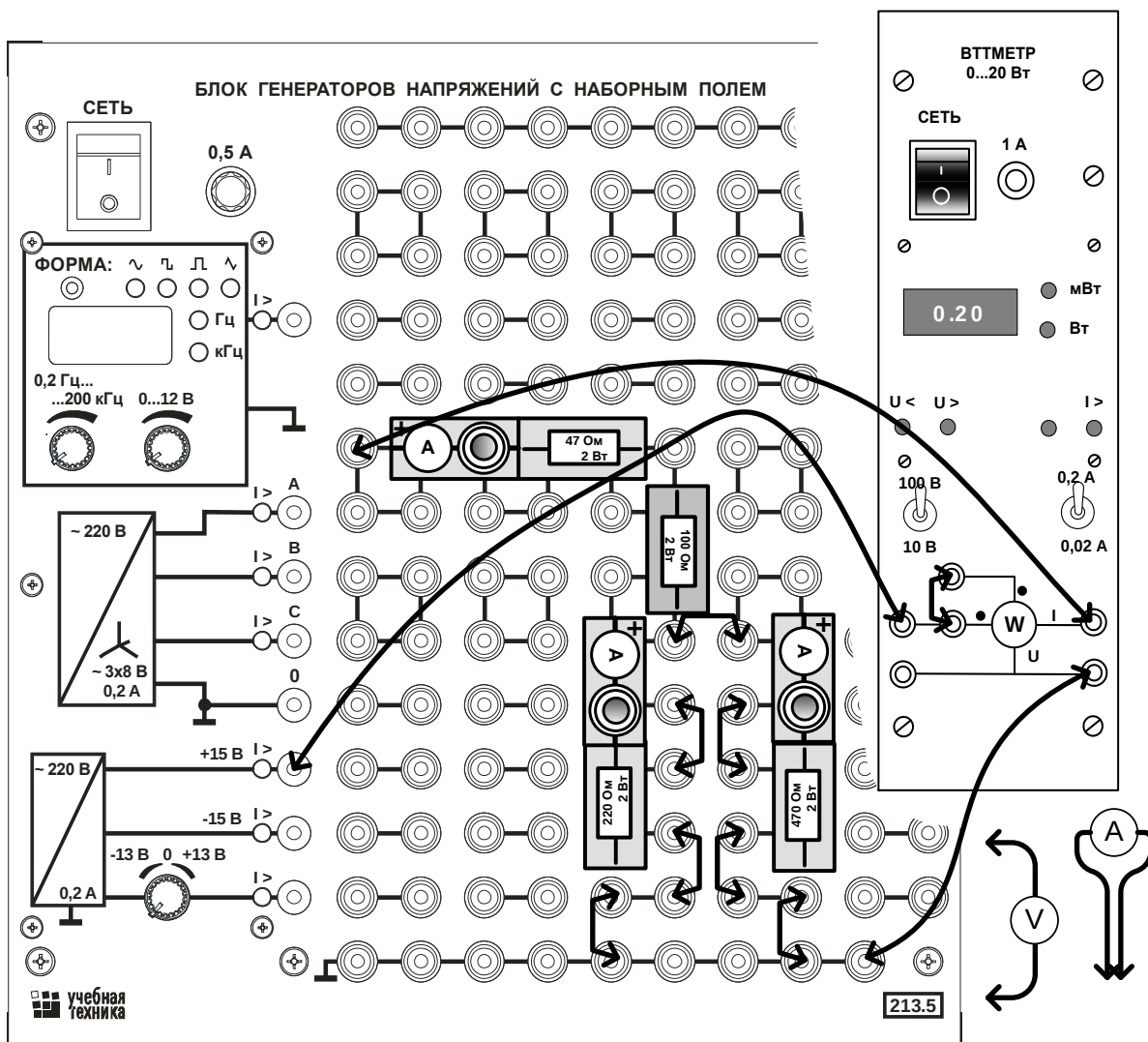


Рис. 2.8. Монтажная схема.

- Измерьте токи во всех ветвях, поочерёдно включая миллиамперметр в каждую ветвь цепи. Измерьте напряжения на всех элементах и мощность. *При измерении мощности правильно выберите пределы измерения ваттметра (так, чтобы не светились светодиоды  $I >$  и  $I <$ ).* Результаты измерений занесите в табл. 5.1.

Таблица 2.4.

|                     | $I_1$ , мА | $I_3$ , мА | $I_4$ , мА | $U$ , В | $U_1$ , В | $U_2$ , В | $U_{34}$ , В | $P$ , Вт |
|---------------------|------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|--------------|----------|
| Измеренные величины |            |            |            |         |           |           |              |          |
| Расчётные значения  |            |            |            |         |           |           |              |          |

- Убедитесь, что выполняются первый и второй законы Кирхгофа, а именно:

$$I_1 = I_3 + I_4;$$

$$U_1 = U_1 + U_2 + U_{34}.$$

- Рассчитайте токи и напряжения на всех элементах по формулам, приведённым в разделе «Общие сведения», занесите результаты в строку «Расчётные значения» и сравните их с экспериментальными данными. Проверьте также выполнение первого и второго законов Кирхгофа по расчётным значениям.
- Определите мощность, потребляемую каждым резистором и сумму мощностей потребителей:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = \dots\dots\dots \text{Вт};$$

$$P_2 = I_1^2 R_2 = \dots\dots\dots \text{Вт};$$

$$P_3 = I_3^2 R_3 = \dots\dots\dots \text{Вт};$$

$$P_4 = I_4^2 R_4 = \dots\dots\dots \text{Вт};$$

$$\dots\dots \sum P = \dots\dots\dots \text{Вт}.$$

- Вычислите мощность, отдаваемую источником, и убедитесь, что она примерно равна сумме мощностей потребителей:

$$P = UI = \dots\dots\dots \text{Вт}.$$

Занесите это значение в табл. 2.4. и сравните с мощностью, измеренной ваттметром.

***Вопросы к лабораторной работе № 1***

1. Какое сопротивление электрической цепи называется внешним и какое внутренним?
2. Какой схемой замещения отображается реальный источник электрической энергии?
3. От чего зависит и как рассчитывается сопротивление проводника?
4. Какими формулами выражается закон Ома для пассивного участка и для всей цепи?
5. Каким уравнением связаны ЭДС, напряжение и ток источника энергии?
6. Каким образом можно экспериментально определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника энергии?
7. Перечислите приемники электрической энергии, обладающие ЭДС. Как направлена ЭДС приемника энергии относительно тока?
8. Как рассчитывают и в каких единицах измеряют электрическую энергию и мощность?
9. Как распределяются напряжения между последовательно соединенными элементами цепи?
10. Как распределяются токи между параллельно соединенными пассивными элементами? Как рассчитать общее сопротивление цепи?
11. Как рассчитать токи в цепи со смешанным соединением пассивных элементов?
12. Как формулируются I и II законы Кирхгофа? Изложите порядок расчета токов в сложной цепи с применением этих законов

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Цель работы

Исследование цепи синусоидального тока при последовательном соединении R, L, C.

Исследование цепи синусоидального тока при параллельном соединении L и C.

#### 1. Цепь синусоидального тока при последовательном соединении R, L, C.

##### *Общие сведения*

В цепи переменного тока кроме сопротивлений используются также катушки индуктивности и конденсаторы.

На сопротивлениях, которые в цепи переменного тока называют ещё **активными сопротивлениями**, связь между током и напряжением определяется законом Ома. Если по активному сопротивлению  $R$  протекает синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на этом сопротивлении  $u = U_m \sin \omega t$ , где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота, а амплитуды тока и напряжения связаны законом Ома:  $U_m = RI_m$ .

Если по идеальной индуктивности  $L$  (т.е. активное сопротивление провода катушки равно нулю) протекает ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на ней  $u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ , т.е. напряжение на катушке опережает ток на  $90^\circ$ , или ток отстаёт от напряжения по фазе на  $90^\circ$ . Амплитуды тока и напряжения связаны соотношением, аналогичным закону Ома:  $U_m = X_L I_m$ , где  $X_L = \omega L$  – **индуктивное сопротивление**.

Наконец, если по конденсатору, ёмкость которого  $C$ , протекает синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на нём  $u = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$  отстаёт от тока по фазе на  $90^\circ$ . Амплитуда напряжения связана с током также выражением, аналогичным закону Ома:  $U_m = X_C I_m$ , где  $X_C = 1/\omega C$  – **ёмкостное сопротивление**.

Выражения аналогичные закону Ома применяются и для действующих значений синусоидальных токов и напряжений:

$$U_R = RI_R; \quad U_L = X_L I_L; \quad U_C = X_C I_C.$$

При последовательном соединении R, L, и C (рис.3.1a) через все элементы протекает один и тот же ток. Тогда напряжение на всей цепи можно определить по второму закону Кирхгофа, как сумму напряжений на

отдельных элементах. При сложении, чтобы учесть фазовые сдвиги между напряжениями, удобно использовать векторные диаграммы. На векторной диаграмме действующие (или амплитудные) значения токов и напряжений изображают векторами, длины которых равны численным значениям токов и напряжений, а углы между ними соответствуют фазовым сдвигам (рис. 3.1б).

В цепи переменного тока кроме сопротивлений используются также катушки индуктивности и конденсаторы.

На сопротивлениях, которые в цепи переменного тока называют ещё **активными сопротивлениями**, связь между током и напряжением определяется законом Ома. Если по активному сопротивлению  $R$  протекает синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на этом сопротивлении  $u = U_m \sin \omega t$ , где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота, а амплитуды тока и напряжения связаны законом Ома:  $U_m = RI_m$ .

Если по идеальной индуктивности  $L$  (т.е. активное сопротивление провода катушки равно нулю) протекает ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на ней  $u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ , т.е. напряжение на катушке опережает ток на  $90^\circ$ , или ток отстаёт от напряжения по фазе на  $90^\circ$ . Амплитуды тока и напряжения связаны соотношением, аналогичным закону Ома:  $U_m = X_L I_m$ , где  $X_L = \omega L$  – **индуктивное сопротивление**.

Наконец, если по конденсатору, ёмкость которого  $C$ , протекает синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на нём  $u = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$  отстаёт от тока по фазе на  $90^\circ$ . Амплитуда напряжения связана с током также выражением, аналогичным закону Ома:  $U_m = X_C I_m$ , где  $X_C = 1/\omega C$  – **ёмкостное сопротивление**.

Выражения аналогичные закону Ома применяются и для действующих значений синусоидальных токов и напряжений:

$$U_R = RI_R; \quad U_L = X_L I_L; \quad U_C = X_C I_C.$$

При последовательном соединении R, L, и C (рис.3.1а) через все элементы протекает один и тот же ток. Тогда напряжение на всей цепи можно определить по второму закону Кирхгофа, как сумму напряжений на отдельных элементах. При сложении, чтобы учесть фазовые сдвиги между напряжениями, удобно использовать векторные диаграммы. На векторной диаграмме действующие (или амплитудные) значения токов и напряжений изображают векторами, длины которых равны численным значениям токов и напряжений, а углы между ними соответствуют фазовым сдвигам (рис. 3.1б).

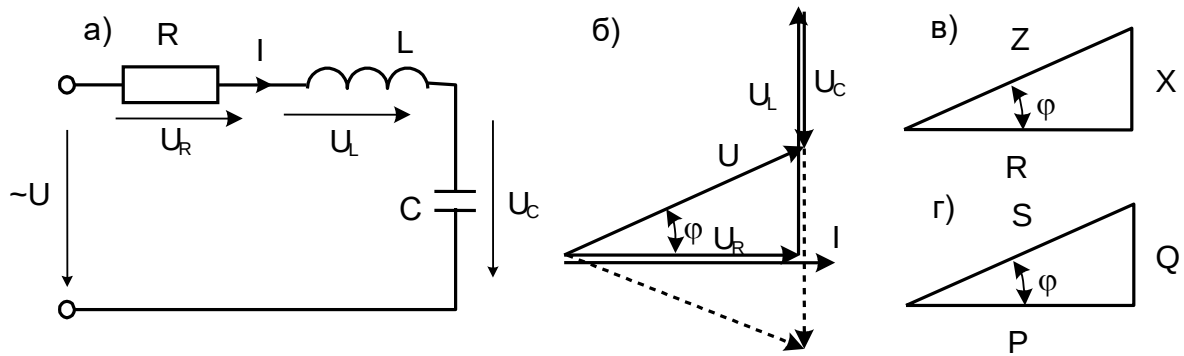


Рис. 3.1.

Из векторной диаграммы следует, что напряжение на всей цепи

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{R^2 I^2 + (X_L I - X_C I)^2} = ZI,$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$  - **полное сопротивление** цепи при последовательном соединении R, L, и C, а  $X = X_L - X_C$  - реактивное сопротивление.

Из векторной диаграммы следует также, что угол сдвига между током и напряжением

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}.$$

Все соотношения между активным, реактивным и полным сопротивлениями, а также углом  $\varphi$ , хорошо иллюстрируются с помощью треугольника сопротивлений (рис. 3.1в), который подобен треугольнику напряжений.

Если  $X_L > X_C$ , то угол  $\varphi$  положительный и напряжение опережает ток. Этот случай показан на векторной диаграмме сплошными линиями. Если же  $X_L < X_C$ , то угол  $\varphi$  отрицательный, и напряжение отстает от тока (показано на векторной диаграмме пунктиром). Если же, наконец,  $X_L = X_C$ , тогда и  $U_L = U_C$  и  $\varphi = 0$ , и ток совпадает с напряжением по фазе. Этот случай называется **резонансом напряжений**.

Условие резонанса  $X_L = X_C$  или  $\varphi = 0$  можно также записать в виде:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{или} \quad \omega^2 LC = 1.$$

Отсюда можно определить частоту, индуктивность или ёмкость, при которой в цепи будет наблюдаться резонанс.

При синусоидальном токе мощность, потребляемая цепью, периодически изменяется во времени с двойной частотой. Однако, кроме переменной составляющей, она содержит также и постоянную составляющую. Среднее значение мощности за период называется **активной**

**мощностью:**  $P = UI \cos \varphi = I^2 R$ . Она измеряется в Вт. Кроме активной мощности в цепях переменного тока используют понятия **полной мощности**  $S = UI = I^2 Z$ , (В·А), **реактивной мощности**  $Q = UI \sin \varphi = I^2 X$ , (вар), а также индуктивной мощности  $Q_L = I^2 X_L$ , (вар) и ёмкостной мощности  $Q_C = I^2 X_C$ , (вар). Очевидно, что  $Q = Q_L - Q_C$ . Все соотношения между мощностями можно проиллюстрировать треугольником мощностей, подобным треугольникам напряжений и сопротивлений (рис. 3.1г). При резонансе, когда  $X = X_L - X_C = 0$  и  $\varphi = 0$ , реактивная мощность также равна нулю, а активная равна полной мощности.

Параметры цепи переменного тока  $R$ ,  $X_L$  и  $X_C$  можно определить по показаниям трёх приборов вольтметра, амперметра и ваттметра. Измерив этими приборами  $U$ ,  $I$ , и  $P$ , определяем  $Z = U/I$  и  $\varphi = \arccos P/UI$ . Затем из треугольника сопротивлений определяем  $R = Z \cos \varphi$  и  $X = Z \sin \varphi$ .

## Экспериментальная часть

### Задание

Определить экспериментально параметры цепи с последовательным соединением  $R$ ,  $L$  и  $C$  для трёх случаев  $X_L > X_C$ ,  $X_L = X_C$  и  $X_L < X_C$ . Построить векторные диаграммы. Сделать расчёт цепи при резонансе и сравнить результаты расчёта с экспериментальными данными.

### Порядок выполнения работы

- Измерьте омметром и запишите активное сопротивление катушки индуктивности 900 витков.  $R_K = \dots\dots\dots$  Ом.
- Снимите с трансформатора катушку 900 витков, вставьте в неё **только одну половинку** разъёмного сердечника и соберите цепь, принципиальная схема которой показана на рис. 3.2, а монтажная – на рис. 3.3.

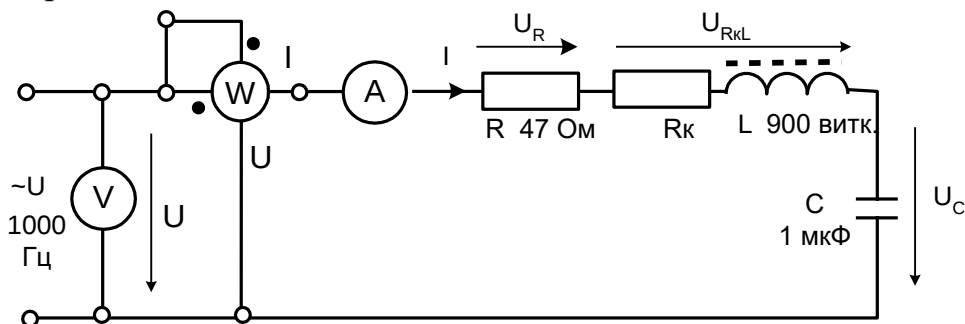


Рис.3.2. Принципиальная схема

- Установите переключатель сигналов генератора напряжений в положение «~», регулятор частоты – в положение 1000 Гц и

регулятор напряжения в крайнее правое положение (максимальная амплитуда).

- Включите генератор и, регулируя частоту, добейтесь резонанса по максимуму тока.
- Измерьте мощность, ток и напряжения на входе цепи, на резисторе, на катушке с активным внутренним сопротивлением и на конденсаторе. Запишите эти показания приборов в строку  $X_L = X_C$  табл. 3.1. *При измерении мощности следите за сигнализацией ошибок в выборе пределов измерения  $I >, I <, U >, U <$ .*

Таблица 3.1

| f =<br>.....Гц                                       | Измерения |          |         |                       |                         |                       | Вычисления                              |                                               |
|------------------------------------------------------|-----------|----------|---------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                                      | P,<br>мВт | I,<br>мА | U,<br>В | U <sub>R</sub> ,<br>В | U <sub>RkL</sub> ,<br>В | U <sub>C</sub> ,<br>В | U <sub>Rk</sub> =R <sub>k</sub> I,<br>В | $U_L = \sqrt{U_{R\&L}^2 - U_{R\&C}^2}$ ,<br>В |
| C = 1 мкФ<br>(X <sub>L</sub> =X <sub>C</sub> )       |           |          |         |                       |                         |                       |                                         |                                               |
| C = 1,47<br>мкФ<br>(X <sub>L</sub> >X <sub>C</sub> ) |           |          |         |                       |                         |                       |                                         |                                               |
| C = 0,47<br>мкФ<br>(X <sub>L</sub> <X <sub>C</sub> ) |           |          |         |                       |                         |                       |                                         |                                               |

- Включите параллельно конденсатору 1 мкФ конденсатор 0,47 мкФ и запишите показания приборов в строку  $X_L > X_C$ .
- Оставьте в цепи один конденсатор 0,47 мкФ и запишите показания приборов в строку  $X_L < X_C$ .
- По опытным данным рассчитайте напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях катушки и занесите результаты также в табл. 3.1.
- На рис. 3.4 постройте в масштабе векторные диаграммы для всех случаев.
- По экспериментальным данным определите параметры цепи Z,  $\varphi$ , R, X и сведите результаты расчёта в табл.3.2.

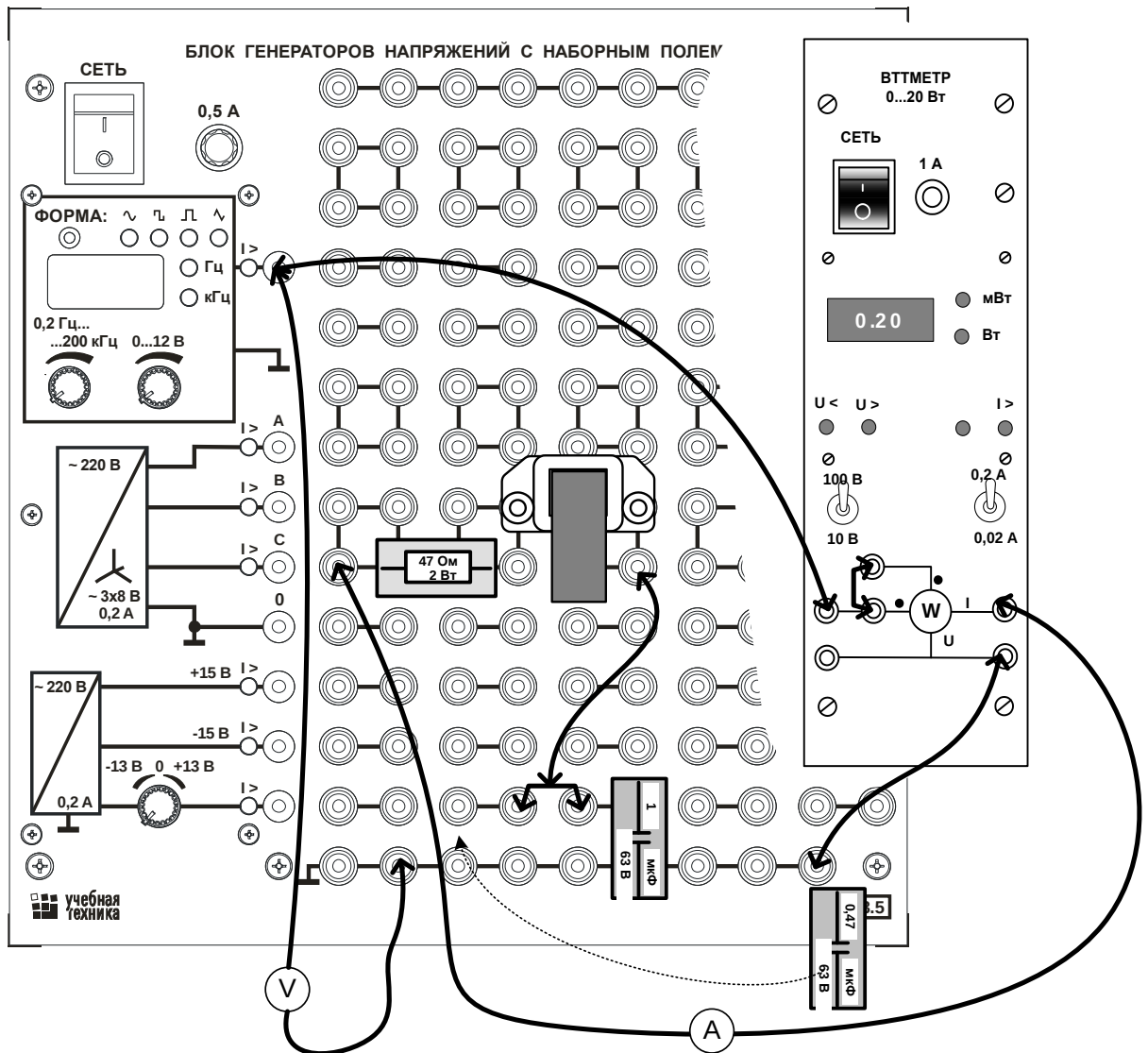


Рис. 3.3. Монтажная схема.

- Определите те же эквивалентные параметры цепи  $Z, \varphi, R, X$  по номинальным данным, указанным на этикетках (кроме катушки) и сведите результаты расчёта в табл. 3.3. Сравните результаты.



Рис. 3.4. Векторные диаграммы.

Таблица 3.2

|             | $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$ | , $\varphi$ , град | $\sin \varphi$ | $Z = \frac{U}{I}$ , Ом | $R = Z \cos \varphi$ ,<br>Ом | $X = Z \sin \varphi$ ,<br>Ом |
|-------------|-------------------------------|--------------------|----------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $X_L = X_C$ |                               |                    |                |                        |                              |                              |
| $X_L > X_C$ |                               |                    |                |                        |                              |                              |
| $X_L < X_C$ |                               |                    |                |                        |                              |                              |

Таблица 3.3

|             | $R = R_k + R$ ,<br>Ом | $X_L = U_L / I$ , Ом<br>(по данным<br>табл.7.1) | $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ,<br>Ом | $X = X_L - X_C$ ,<br>Ом | $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ ,<br>Ом | $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ ,<br>град. |
|-------------|-----------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|
| $X_L = X_C$ |                       |                                                 |                                    |                         |                                |                                           |
| $X_L > X_C$ |                       |                                                 |                                    |                         |                                |                                           |
| $X_L < X_C$ |                       |                                                 |                                    |                         |                                |                                           |

## 2. Параллельное соединение катушки индуктивности и конденсатора

### Общие сведения

В общем случае, на входе цепи синусоидального тока, содержащей сопротивления, индуктивности и ёмкости (рис. 3.5а) протекает ток, сдвинутый по фазе относительно напряжения на угол  $\varphi$ , что можно показать на векторной диаграмме (рис. 3.5б). Действующее значение этого тока определяется по закону Ома:

$$I = U/Z = UY,$$

где  $Y = 1/Z$  – **полная проводимость** цепи.

Если ток отстаёт от напряжения ( $\varphi > 0$ ), то говорят, что цепь носит индуктивный характер, если опережает ( $\varphi < 0$ ) – ёмкостный характер. Второй случай показан на векторной диаграмме пунктиром.

Ток можно представить в виде суммы двух составляющих: **активной**, совпадающей по фазе с приложенным напряжением и **реактивной**, сдвинутой относительно напряжения на  $+90^\circ$  или  $-90^\circ$ .

Активная составляющая тока  $I_a = I \cos \varphi = UY \cos \varphi = UG$ , где  $G = Y \cos \varphi$  называется **активной** проводимостью. Реактивная составляющая тока  $I_p = I \sin \varphi = UY \sin \varphi = UB$ , где  $B = Y \sin \varphi$  называется **реактивной** проводимостью.

Все соотношения между проводимостями  $Y$ ,  $G$ , и  $B$ , а также углом  $\varphi$  могут быть наглядно представлены в виде треугольника проводимостей, подобного треугольнику токов (рис. 3.5.в).

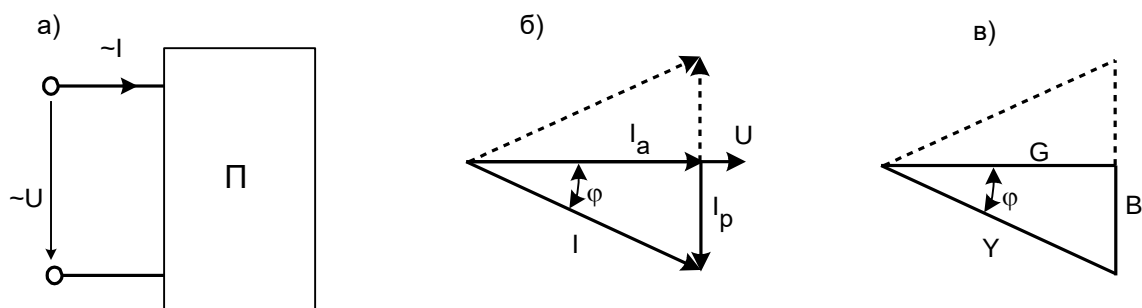


Рис. 3.5

Если катушка, обладающая индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R$  соединена параллельно с конденсатором ёмкостью  $C$

(рис.3.6а), то напряжение на них одно и то же, а ток  $I$  на входе цепи представляет сумму тока в катушке  $I_k$ , отстающим от напряжения на угол  $\varphi$  и тока в конденсаторе  $I_C$ , опережающего напряжение на  $90^\circ$ .

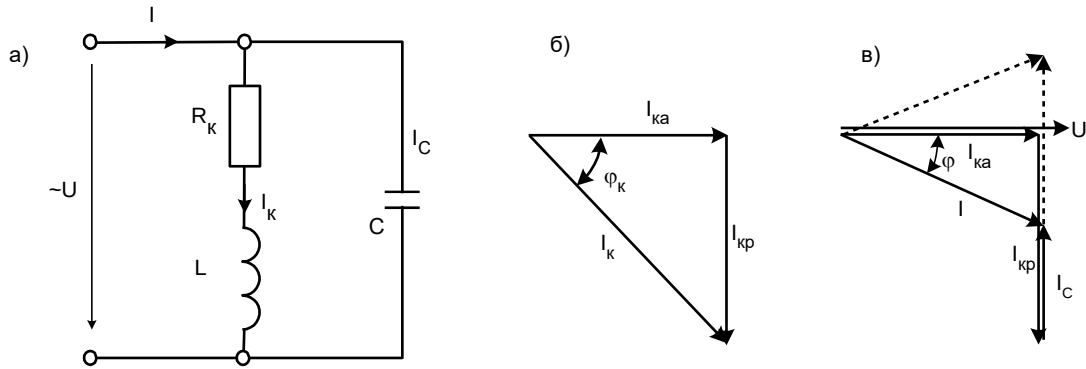


Рис.3.6

Для сложения токов сначала представим ток в катушке в виде двух составляющих: активной  $I_{ка}$ , и реактивной  $I_{кр}$ , как показано на рис.3.6.б, а затем нарисуем из конца вектора  $I_{кр}$  вектор тока в конденсаторе (рис. 3.6.в), опережающий напряжение на  $90^\circ$  и получим суммарный ток. Из векторной диаграммы следует, что

$$I = \sqrt{I_{ка}^2 + (I_{кр} - I_C)^2} = \sqrt{U^2 G^2 + U^2 (B_L - B_C)^2} = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = UY,$$

где  $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$ , - полная проводимость этой цепи.

В свою очередь:

$B = B_L - B_C$  - реактивная проводимость всей цепи;

$B_L = Y_k \sin \varphi_k$  - индуктивная проводимость катушки;

$B_C = \omega C$  - ёмкостная проводимость конденсатора;

$G = Y_k \cos \varphi_k$  - активная проводимость катушки;

Из векторной диаграммы следует также, что угол сдвига между током и напряжением

$$\varphi = \arctg \frac{I_{кр} - I_C}{I_{ка}} = \arctg \frac{B_L - B_C}{G} = \arctg \frac{B}{G}.$$

Если  $B_L > B_C$ , то угол  $\varphi$  положительный и напряжение опережает ток. Этот случай показан на векторной диаграмме сплошными линиями. Если

же  $B_L < B_C$ , то угол  $\varphi$  отрицательный, и напряжение отстаёт от тока (показано на векторной диаграмме пунктиром). Если же, наконец,  $B_L = B_C$ , тогда и  $I_{кр} = I_C$  и  $\varphi = 0$ , и ток совпадает с напряжением по фазе. Этот случай называется резонансом токов.

Условие резонанса  $B_L = B_C$  или  $\varphi = 0$  можно также записать в виде:

$$Y_k \sin \varphi_k = \omega C \quad .$$

В свою очередь,

$$Y_k = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{\sqrt{R_k^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \text{а} \quad \sin \varphi_k = \frac{\omega L}{\sqrt{R_k^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \text{поэтому} \quad \frac{L}{R_k^2 + \omega^2 L^2} = C.$$

Отсюда можно определить ёмкость, индуктивность или частоту, при которой в цепи будет наблюдаться резонанс.

### **Экспериментальная часть**

#### **Задание**

Определить экспериментально параметры катушки индуктивности, рассчитать резонансную ёмкость параллельно включенного конденсатора, снять зависимость токов в цепи от ёмкости, построить векторные диаграммы для трёх случаев  $C < C_{рез}$ ,  $C = C_{рез}$  и  $C > C_{рез}$ .

#### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь (принципиальная схема рис. 3.6, монтажная – 3.7), включив в каждую ветвь по миниблоку для подключения амперметра. Конденсаторы в первом опыте не включайте.

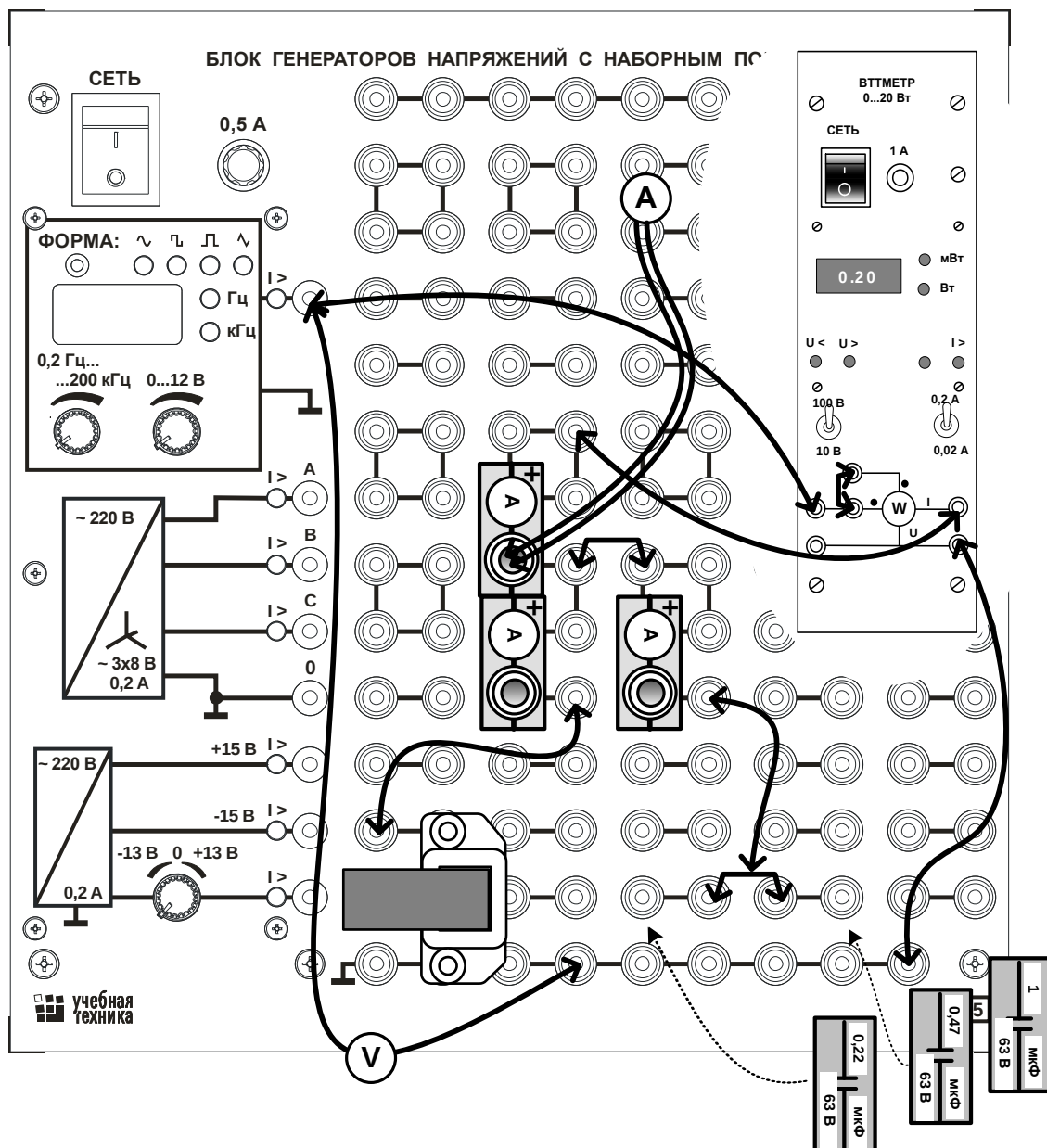


Рис.3.7. Монтажная схема.

- Установите частоту питающего напряжения 1000 Гц, максимальную амплитуду и измерьте напряжение, на входе цепи, ток и мощность, потребляемые цепью. Результаты измерений запишите в табл. 3.1.
- Вычислите параметры катушки и ожидаемую резонансную ёмкость. Все формулы приведены в разделе «Общие сведения»

Таблица 3.1

| Измерения |          |           | Вычисления   |                    |       |                 |
|-----------|----------|-----------|--------------|--------------------|-------|-----------------|
| $U$ , В   | $I$ , мА | $P$ , мВт | $Y_k$ , 1/Ом | $\varphi_k$ , град | $B_L$ | $C_{рез}$ , мкФ |
|           |          |           |              |                    |       |                 |

- Устанавливайте параллельно индуктивности поочерёдно различные конденсаторы как показано на рис. 3.7, измеряйте и записывайте в табл. 3.2 значения токов в трёх ветвях цепи.
- На рис. 3.8 постройте графики изменения токов от ёмкости параллельно включенного конденсатора и по минимуму тока определите фактическую резонансную ёмкость. Сравните её с расчётным значением.

Таблица 3.2

| $C$ , мкФ  | 0,22 | 0,47 | 0,69<br>(0.22+0.47) | 1 | 1.22<br>(1+0.22) | 1.47<br>(1+0.47) |
|------------|------|------|---------------------|---|------------------|------------------|
| $I_k$ , мА |      |      |                     |   |                  |                  |
| $I_C$ , мА |      |      |                     |   |                  |                  |
| $I$ , мА   |      |      |                     |   |                  |                  |

- На рис. 3.9 постройте векторные диаграммы для трёх случаев:  $C < C_{рез}$ ,  $C = C_{рез}$  и  $C > C_{рез}$ . Для резонансного режима значения токов возьмите из графика.

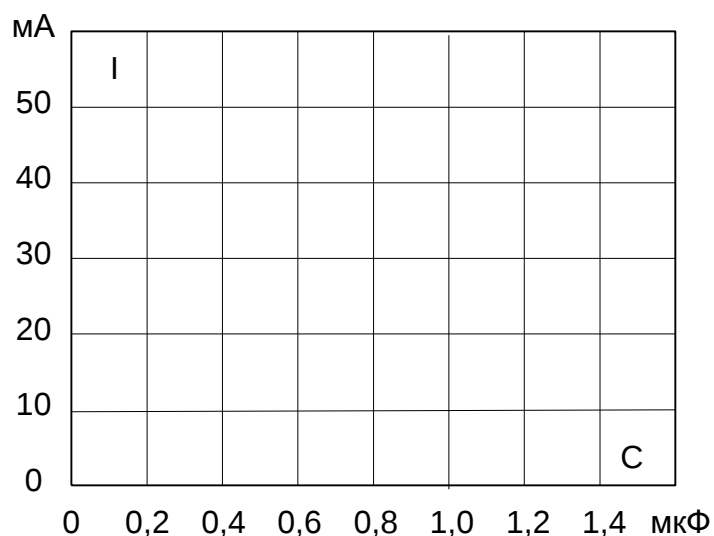


Рис. 3.8. График изменения токов от ёмкости.



Рис. 3.9. Векторные диаграммы.

## *Вопросы к лабораторной работе № 2*

1. Какие значения синусоидальной величины называются мгновенными, а какие максимальными?
  2. Какое сопротивление называется активным?
  3. От чего зависят и как рассчитываются индуктивное и емкостное сопротивления?
  4. Как рассчитать полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных:
    - а) резистора и катушки;
    - б) резистора и конденсатора;
    - в) резистора, катушки и конденсатора?
- Изобразите векторную диаграмму для каждой цепи.
5. В какой цепи и при каком условии возникает резонанс напряжений? В чем сущность этого явления?
  6. Как можно рассчитать общий ток нескольких параллельно соединенных приемников энергии?
  7. В какой цепи и при каком условии возникает резонанс токов? Какое практическое применение находит это явление?
  8. Какая мощность называется активной, как её рассчитывают и в каких единицах измеряют?

10. Что называется коэффициентом мощности, с какой целью и какими способами его повышают?

11. Как рассчитывают и в каких единицах измеряют полную и реактивную мощности?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

#### Цель работы

Исследование трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду, треугольник.

Исследование аварийных режимов трёхфазных цепей при соединении нагрузки в звезду, треугольник.

#### 1. Исследование трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

##### *Общие сведения*

Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «звезда» (рис. 4.1), то к сопротивлениям нагрузки приложены фазные напряжения. Линейные напряжения ( $U_L$ ) в  $\sqrt{3}$  раз больше фазных ( $U_\Phi$ ), а линейные токи ( $I_L$ ) равны фазным ( $I_\Phi$ ) и определяются по закону Ома:

$$I_A = \frac{U_A}{R_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{R_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{R_C},$$

Ток нейтрали ( $I_N$ ) равен векторной сумме этих токов:  $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ .

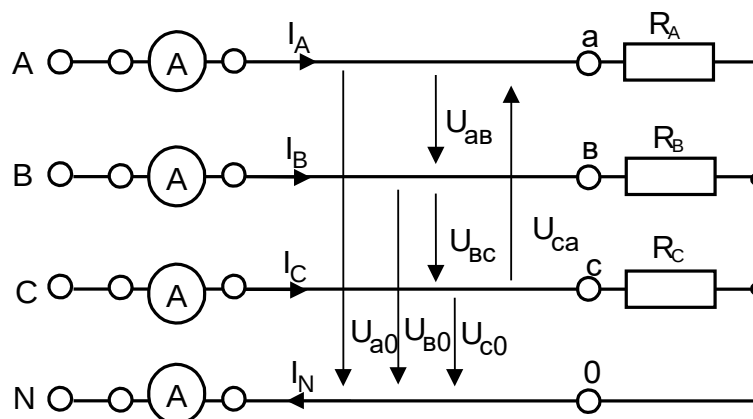


Рис. 4.1. Трёхфазная цепь по схеме «звезда».

При симметричных напряжениях  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  и одинаковых сопротивлениях  $R_A = R_B = R_C = R$  токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  также симметричны и их векторная сумма ( $I_N$ ) равна нулю. Тогда  $I_L = I_\Phi = U_\Phi / R$ ;  $I_N = 0$ .

Если же сопротивления фаз нагрузки неодинаковы, то через нулевой провод протекает некоторый ток  $I_N \neq 0$ , а в схеме без нейтрали происходит

смещение точки 0 на векторной диаграмме напряжений. Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 4.2).

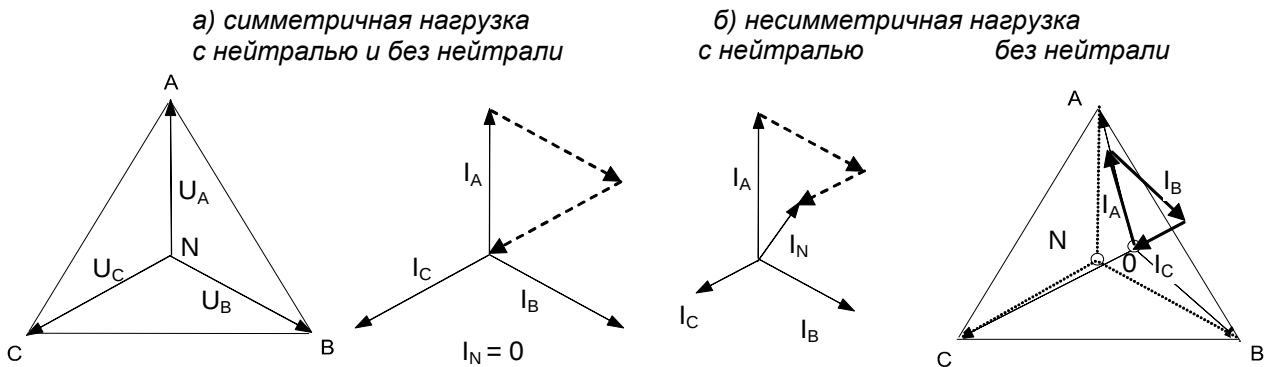


Рис.4.2. Векторные диаграммы.

Мощность складывается из мощностей трёх фаз:  $\Sigma P = P_A + P_B + P_C$ . При симметричной и чисто активной нагрузке, имеем:  $\Sigma P = 3 P_\phi = 3 U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$ .

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке в симметричной трёхфазной цепи:

$$\text{Активная мощность } \Sigma P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi.$$

$$\text{Реактивная мощность } \Sigma Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi.$$

$$\text{Полная мощность } \Sigma S = 3 \cdot U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L.$$

Активная мощность в четырёхпроводной трёхфазной цепи измеряется с помощью трёх ваттметров (рис. 4.3а), а в трёхпроводной - с помощью двух ваттметров (рис. 4.3б).

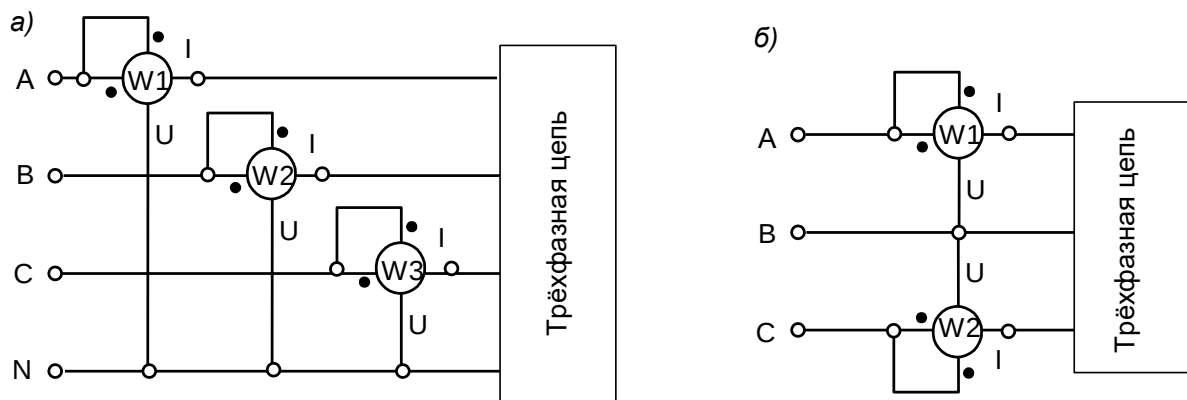


Рис. 4.3.

## Экспериментальная часть

### Задание

В трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду измерить действующие значения токов и напряжений, мощность, построить векторные диаграммы и проверить баланс мощностей для следующих случаев:

- Симметричная активная нагрузка с нейтральным проводом и без него.
- Несимметричная активная нагрузка с нейтральным проводом и без него.
- Несимметричная смешанная нагрузка с нейтральным проводом и без него.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь с симметричной активной нагрузкой ( $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$ ) согласно принципиальной схеме (рис. 4.1) и монтажной схеме (рис.4.4).
- Измерьте напряжения и токи на нагрузке в схеме с нейтральным проводом и вычислите мощности. Результаты измерений и вычислений занесите в табл.4.1.
- Подключая ваттметр сначала в фазу *A*, затем в фазу *B* и, наконец, в фазу *C* измерьте мощности трёх фаз и вычислите суммарную мощность. Результаты запишите в также в табл. 4.1. *(Для переключения ваттметра из одной цеп в другую, также, как и амперметра, используйте специальный коммутационный миниблок «амперметр» и пару проводников с коаксиальным разъёмом!)*. Проверьте баланс мощностей, т.е. сравните суммарную измеренную мощность с суммой рассчитанных фазных мощностей.
- Уберите из схемы нейтральный провод (перемычку между точками *N* и *0*) и снова измерьте токи и напряжения.
- Подключая токовую цепь ваттметра сначала в фазу *A*, а цепь напряжения – на напряжение  $U_{AB}$ , затем токовую цепь в фазу *C*, а цепь напряжения – на напряжение  $U_{CB}$ , измерьте две мощности и вычислите суммарную мощность. Проверьте баланс мощностей.

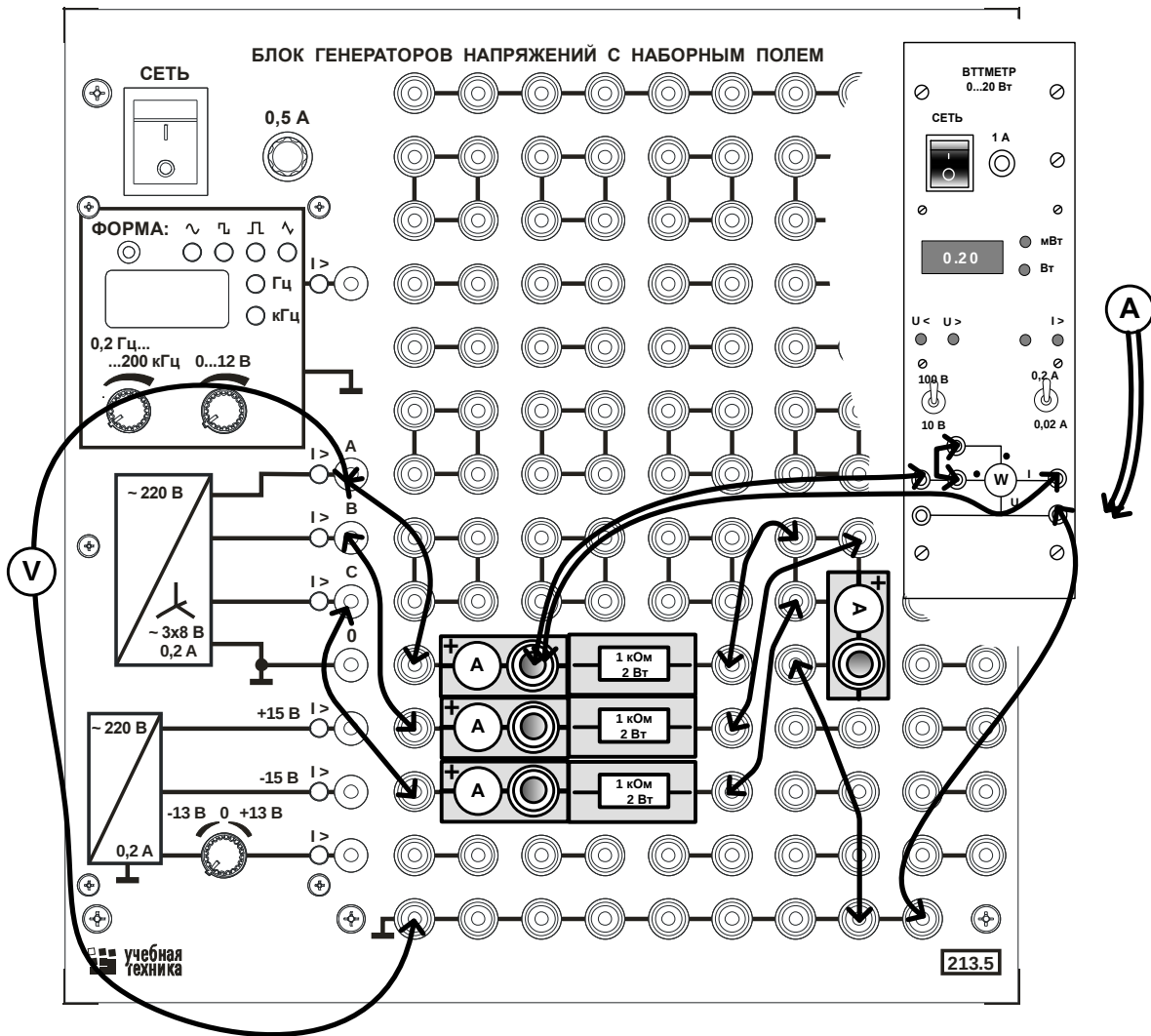


Рис. 4.4. Монтажная схема.

- Повторите измерения и вычисления для несимметричной нагрузки с нейтральным и без нейтрального провода ( $R_A = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_B = 330 \text{ Ом}$ ,  $R_C = 470 \text{ Ом}$ ).
- Повторите измерения и вычисления, заменив резистор фазы В конденсатором  $4,4 \text{ мкФ}$ , а резистор фазы С – катушкой индуктивности 900 витков с собранным ферромагнитным сердечником. Выберите масштабы токов и напряжений и постройте векторные диаграммы для всех случаев.

Таблица 4.1

| Схема «звезда»                  |            | Симметричная активная нагрузка |              | Несимметричная активная нагрузка |              | Несимметричная смешанная нагрузка |              |
|---------------------------------|------------|--------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|
|                                 |            | с нейтралью                    | без нейтрали | с нейтралью                      | без нейтрали | с нейтралью                       | без нейтрали |
| Фазные токи, ток нейтрали<br>мА | $I_A$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $I_B$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $I_C$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $I_N$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
| Линейные напряжения<br>, В      | $U_{AB}$   |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $U_{BC}$   |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $U_{CA}$   |                                |              |                                  |              |                                   |              |
| Фазные напряжения<br>, В        | $U_A$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $U_B$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $U_C$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
| Рассчитанные мощности, мВт      | $P_A$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $P_B$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $P_C$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $\Sigma P$ |                                |              |                                  |              |                                   |              |
| Измеренные мощности, мВт        | $P_1$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $P_2$      |                                |              |                                  |              |                                   |              |
|                                 | $P_3$      |                                | -            |                                  | -            |                                   | -            |
|                                 | $\Sigma P$ |                                |              |                                  |              |                                   |              |

## Векторные диаграммы

1. Симметричная активная нагрузка  $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |

2. Несимметричная активная нагрузка  $R_A = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_B = 330 \text{ Ом}$ ,  $R_C = 470 \text{ Ом}$

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| С нейтралью                         |  |  |  |  |  |  |  | Без нейтрали                         |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |

### 3. Смешанная несимметричная нагрузка фаз:

$R_A = 1 \text{ кОм}$ ,  $C_B = 4,4 \text{ мкФ}$ ,  $L_C \rightarrow$  катушка 900 витков с сердечником

| С нейтралью                         |  |  |  |  |  | Без нейтрали                         |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |

## 2. Исследование трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник

### Общие сведения

В схеме «треугольник» (рис. 4.5), нагрузка  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$  и  $R_{CA}$  каждой фазы включается на **линейное напряжение**, которое в данном случае равно **фазному** ( $U_L = U_\Phi$ ).

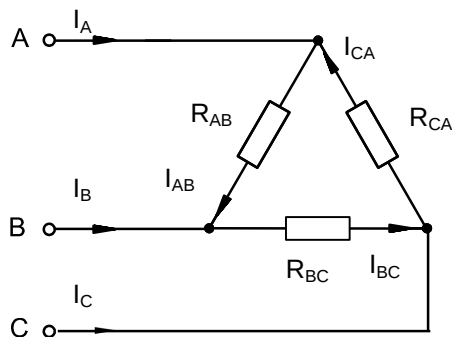


Рис. 4.5. Схема соединения нагрузки в треугольник.

Фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  определяются по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{R_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{R_{CA}}.$$

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа как векторные разности соответствующих фазных токов:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \quad \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \quad \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}.$$

Построение этих векторов показано на векторной диаграмме (рис. 4.6).

При симметричных напряжениях  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и одинаковых нагрузках фаз  $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R$  токи также симметричны, причём, линейный ток по величине в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного. Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 4.7).

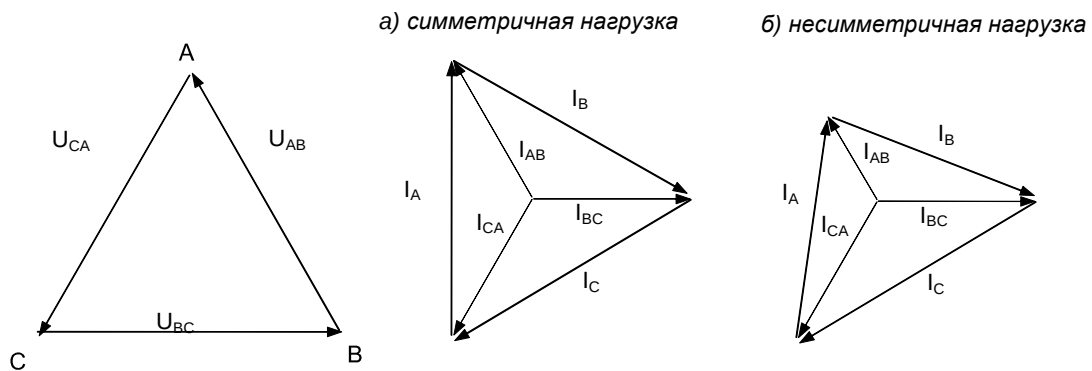


Рис. 4.7. Векторные диаграммы.

Суммарная мощность  $\Sigma P$ , потребляемая трехфазной нагрузкой при ее соединении в «треугольник», складывается из мощностей фаз  $\Sigma P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$ .

Также, как и при соединении в звезду в случае симметричной нагрузки:

$$\text{Активная мощность } \Sigma P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi.$$

$$\text{Реактивная мощность } \Sigma Q = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \sin \varphi.$$

$$\text{Полная мощность } \Sigma S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}}.$$

Активная мощность трёхфазной цепи при соединении в треугольник измеряется двумя ваттметрами так же, как и при соединении в звезду без нейтрального провода.

### Экспериментальная часть

#### Задание

В трехфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник измерить

действующие значения токов и напряжений, мощность, построить векторные диаграммы и проверить баланс мощностей для следующих случаев:

- Симметричная активная нагрузка.
- Несимметричная активная нагрузка.
- Несимметричная смешанная нагрузка.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь с симметричной нагрузкой ( $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = 1 \text{ кОм}$ ) согласно принципиальной схеме (рис. 4.8) и монтажной схеме (рис. 4.9).

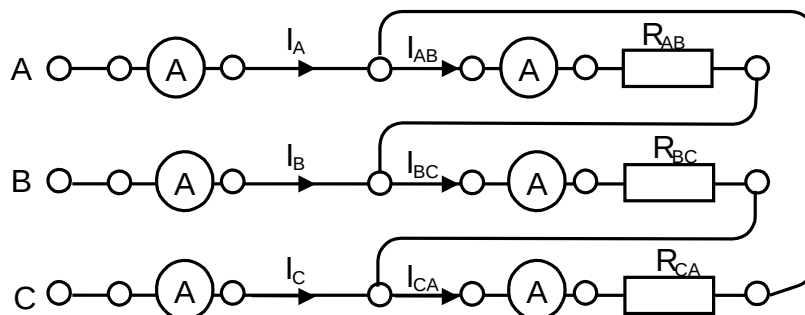


Рис. 4.8. Принципиальная схема цепи с симметричной нагрузкой.

- Измерьте мультиметрами напряжения и токи, указанные в табл. 4.2 и вычислите мощности.
- Подключая токовую цепь ваттметра сначала в фазу *A*, а цепь напряжения – на напряжение  $U_{AB}$ , затем токовую цепь в фазу *C*, а цепь напряжения – на напряжение  $U_{CB}$ , измерьте две мощности и вычислите суммарную мощность. Проверьте баланс мощностей. *(Для переключения ваттметра из одной цеп в другую, также как и амперметра, используйте специальный коммутационный миниблок «амперметр» и пару проводников с коаксиальным разъёмом!).*
- Повторите измерения и вычисления для несимметричной нагрузки с ( $R_{AB} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{BC} = 330 \text{ Ом}$ ,  $R_{CA} = 470 \text{ Ом}$ ). Повторите измерения и вычисления, заменив резистор фазы *B* конденсатором  $4,4 \text{ мкФ}$ , а резистор фазы *C* – катушкой индуктивности  $900 \text{ витков}$  с собранным ферромагнитным сердечником.
- Выберите масштабы токов и напряжений и постройте векторные диаграммы для всех случаев.

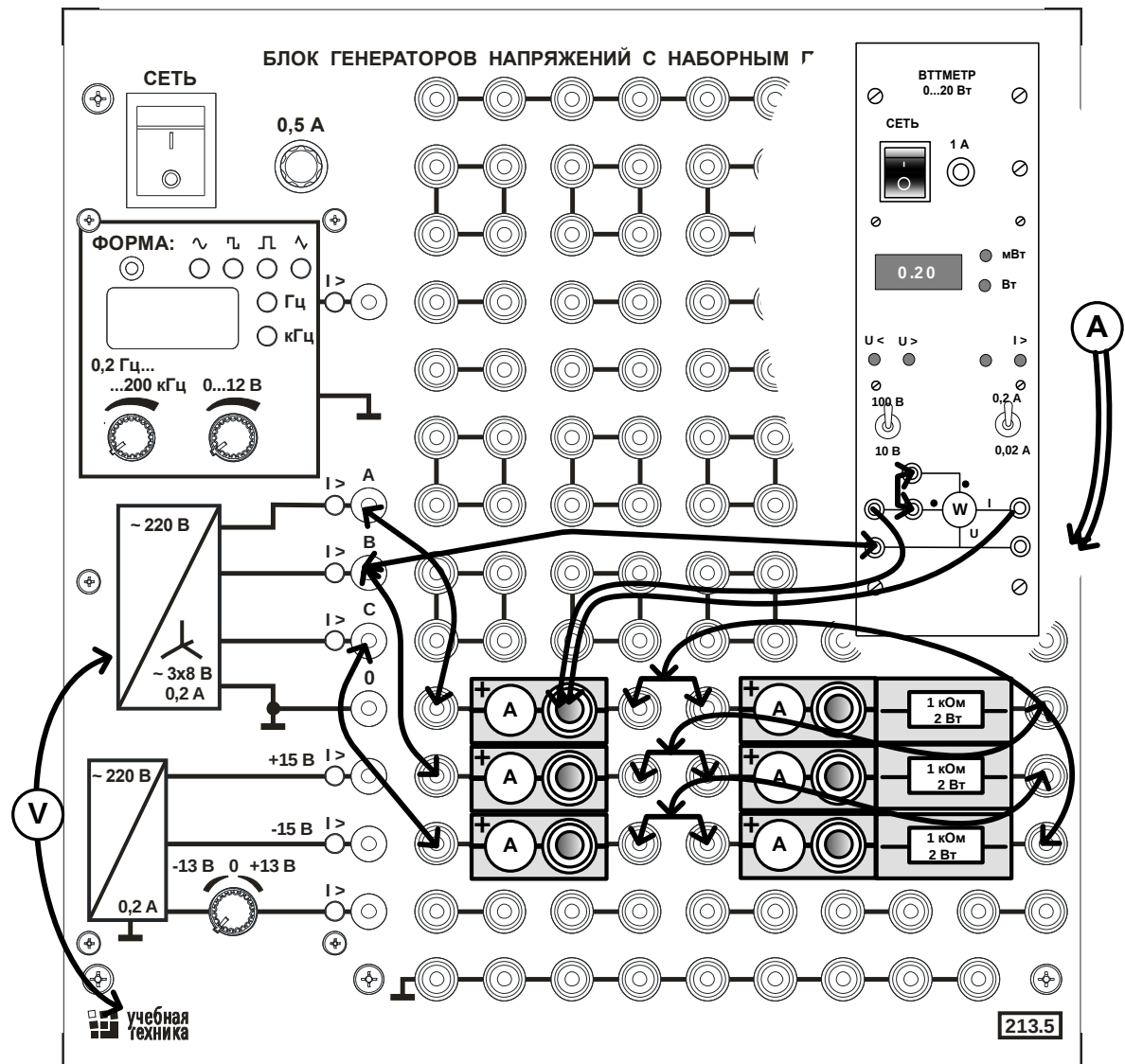


Рис. 4.9. Монтажная схема.

Таблица 4.2

| Соединение<br>«треугольник»      |            | Симметричная<br>активная нагрузка | Несимметричная<br>активная нагрузка | Несимметричная<br>смешанная<br>нагрузка |
|----------------------------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| Фазные токи,<br>мА               | $I_{AB}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $I_{BC}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $I_{CA}$   |                                   |                                     |                                         |
| Линейные<br>токи, мА             | $I_A$      |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $I_B$      |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $I_C$      |                                   |                                     |                                         |
| Линейные<br>напряжения,<br>В     | $U_{AB}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $U_{BC}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $U_{CA}$   |                                   |                                     |                                         |
| Рассчитанные<br>мощности,<br>мВт | $P_{AB}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $P_{BC}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $P_{CA}$   |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $\Sigma P$ |                                   |                                     |                                         |
| Измеренные<br>мощности,<br>мВт   | $P_1$      |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $P_2$      |                                   |                                     |                                         |
|                                  | $\Sigma P$ |                                   |                                     |                                         |

## Векторные диаграммы

1. Симметричная активная нагрузка  $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

$m_U = \dots\dots\dots \text{B/cm}, m_I = \dots\dots\dots \text{mA/cm}$



### 3. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

#### *Общие сведения*

Аварийными являются режимы, возникают при коротких замыканиях в нагрузке или в линиях и обрыве проводов. Остановимся на некоторых типичных аварийных режимах.

#### *Обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке*

В симметричном режиме  $I_N = 0$ , поэтому обрыв нейтрального провода не приводит к изменению токов и напряжений в цепи и такой режим не является аварийным. Однако, при несимметричной нагрузке  $I_N \neq 0$ , поэтому обрыв нейтрали приводит к изменению всех фазных токов и напряжений. На векторной диаграмме напряжений точка «0» нагрузки, совпадающая до этого с точкой «N» генератора, смещается таким образом, чтобы сумма фазных токов оказалась равной нулю (рис. 4.10). Напряжения на отдельных фазах могут существенно превысить номинальное напряжение.

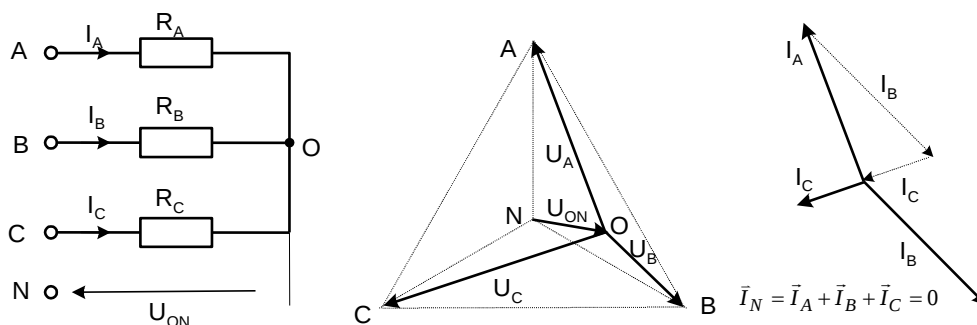


Рис. 4.10.

#### *Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме с нулевым проводом*

При обрыве провода, например, в фазе A ток этой фазы становится равным нулю, напряжения и токи в фазах B и C не изменяются, а в нулевом проводе появляется ток  $I_N = I_B + I_C$ . Он равен току, который до обрыва протекал в фазе A (рис. 4.11).

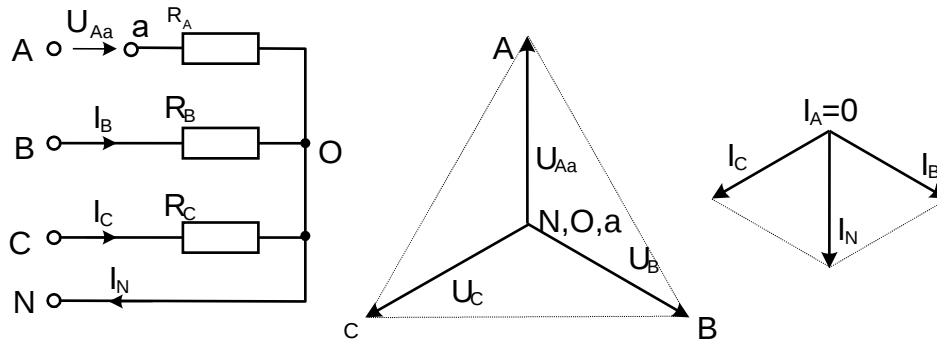


Рис. 4.11

### **Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме без нулевого провода**

При обрыве, например, фазы  $A$  (рис.4.12) сопротивления  $R_A$  и  $R_B$  оказываются соединёнными последовательно и к ним приложено линейное напряжение  $U_{BC}$ . Напряжение на каждом из сопротивлений составляет  $\sqrt{3}/2$  от фазного напряжения в нормальном режиме. Нулевая точка нагрузки на векторной диаграмме напряжений смещается на линию  $BC$ , и при  $R_B = R_C$  она находится точно в середине отрезка  $BC$ .

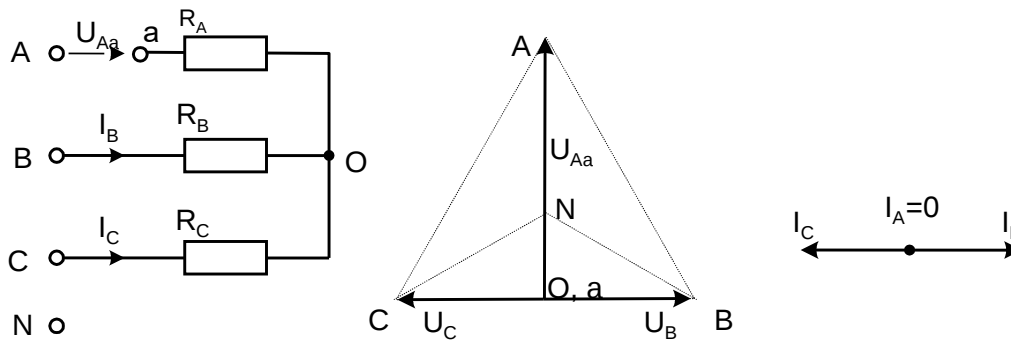


Рис. 4.12

### **Короткие замыкания**

При коротком замыкании фазы нагрузки в схеме с нулевым проводом ток в этой фазе становится очень большим (теоретически бесконечно большим) и это приводит к аварийному отключению нагрузки защитой. В схеме без нулевого провода при замыкании, например, фазы  $A$ , нулевая точка нагрузки смещается в точку « $A$ » генератора. Тогда к сопротивлениям фаз  $B$  и  $C$  прикладываются линейные напряжения. Токи в этих фазах возрастают в  $\sqrt{3}$  раз, а ток в фазе  $A$  – в 3 раза (рис. 4.13).

Короткие замыкания между линейными проводами и в той и в другой схеме приводят к аварийному отключению нагрузки защитой.

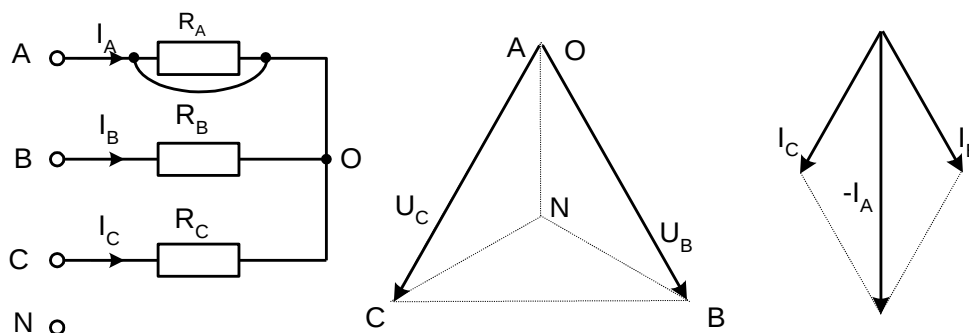


Рис. 4.13

## Экспериментальная часть

### Задание

Экспериментально исследовать аварийные режимы трёхфазной цепи при присоединении нагрузки в звезду.

### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 4.14) с сопротивлениями фаз  $R_A=R_B=R_C=1\text{ кОм}$ . Монтажная схема изображена на рис. 4.4, но ваттметр в этой работе не понадобится.

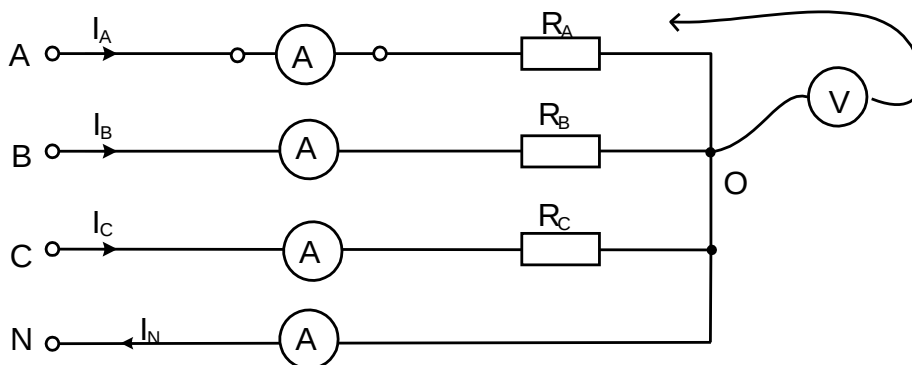


Рис.4.14. Принципиальная схема цепи сопротивлениями фаз.

- Убедитесь, что обрыв (отключение) нейтрали не приводит к изменению фазных токов.
- Убедитесь, что в схеме с нулевым проводом происходит отключение источника защитой при коротких замыканиях, как в фазах нагрузки, так и между линейными проводами.
- Убедитесь, что в схеме без нулевого провода короткое замыкание в фазе нагрузки не приводит к отключению, а при коротком замыкании между линейными проводами установка отключается.
- Прodelайте измерения токов и напряжений всех величин, указанных в табл. 4.3 в различных режимах и по

экспериментальным данным постройте векторные диаграммы для каждого случая в выбранном масштабе.

- Ответьте на контрольные вопросы.

Таблица 4.3

| № | Режим                                                            | $U_{AO},$<br>В | $U_{BO},$<br>В | $U_{CO},$<br>В | $U_{ON},$<br>В | $I_A,$<br>мА | $I_B,$<br>мА | $I_C,$<br>мА | $I_N,$<br>мА |
|---|------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | $R_A=1$ кОм<br>$R_B=330$ Ом<br>$R_C=470$ Ом<br>Обрыв нейтрали    |                |                |                |                |              |              |              |              |
| 2 | $R_A=R_B=R_C=1$<br>кОм<br>Схема с<br>нейтралью<br>Обрыв фазы $A$ |                |                |                |                |              |              |              |              |
| 3 | $R_A=R_B=R_C=1$<br>кОм<br>Сх. без нейтрали<br>Обрыв фазы $A$     |                |                |                |                |              |              |              |              |
| 4 | $R_A=R_B=R_C=1$<br>кОм<br>Сх. без нейтрали<br>К. 3. фазы $A$     |                |                |                |                |              |              |              |              |

### Векторные диаграммы

**1.  $R_A=1$  кОм,  $R_B=330$  Ом,  $R_C=470$  Ом. Обрыв нейтрали**

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |

**2.  $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$ , Схема с нейтралью, обрыв фазы A**

|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**3.  $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$ , Схема без нейтрали, обрыв фазы A**

|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**4.  $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$ , Схема без нейтрали, короткое замыкание фазы А**

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |

**Вопрос:** Как изменяется мощность трёхфазной нагрузки при обрыве фазы в схеме с нулевым проводом и без него? Как изменяется мощность при коротком замыкании одной фазы?

**4. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник**

**Общие сведения**

При коротких замыканиях в фазах нагрузки или между линейными проводами токи резко возрастают и происходит аварийное отключение установки защитой.

Обрывы фаз или линейных проводов при соединении нагрузки в треугольник не приводят к перегрузкам по токам или напряжениям, как это иногда случается при соединении нагрузки в звезду.

**При обрыве одной фазы нагрузки** (рис. 4.15) ток этой фазы становится равным нулю, а в оставшихся двух фазах ток не меняется. Два линейных тока уменьшаются в  $\sqrt{3}$  раз, т. е. становятся равными фазному току, а третий остаётся неизменным.

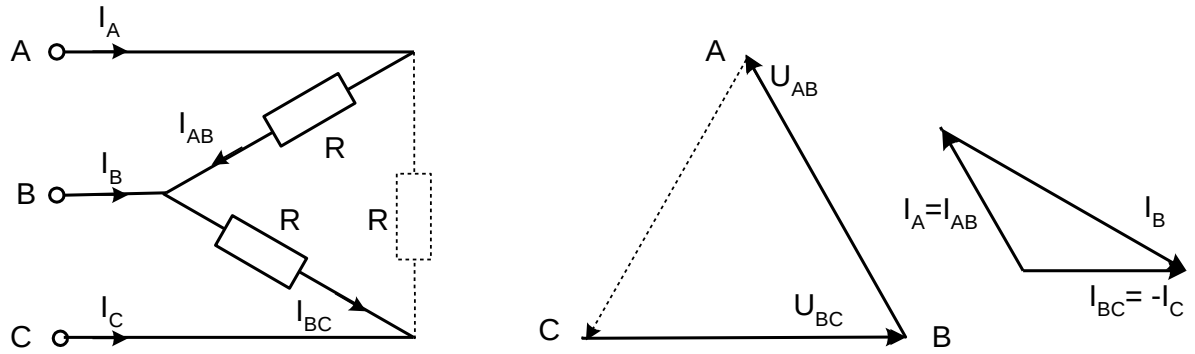


Рис. 4.15.

**При обрыве линейного провода** (например, В) фазные сопротивления  $R_{AB}$  и  $R_{BC}$  оказываются соединёнными последовательно и включёнными параллельно с сопротивлением  $R_{CA}$  на напряжение  $U_{CA}$  (рис. 12.2). Цепь фактически становится однофазной.

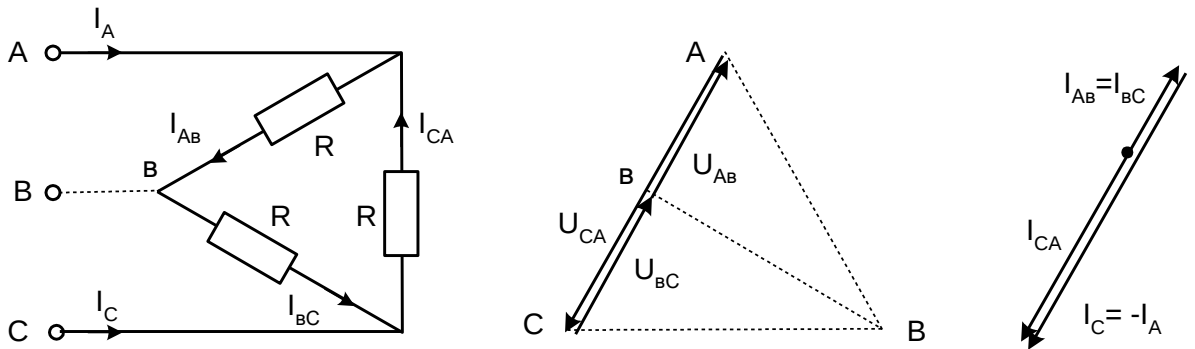


Рис. 4.16.

**При одновременном обрыве линейного провода и одной фазы** нагрузки цепь также становится однофазной (рис. 4.15 и 4.16).

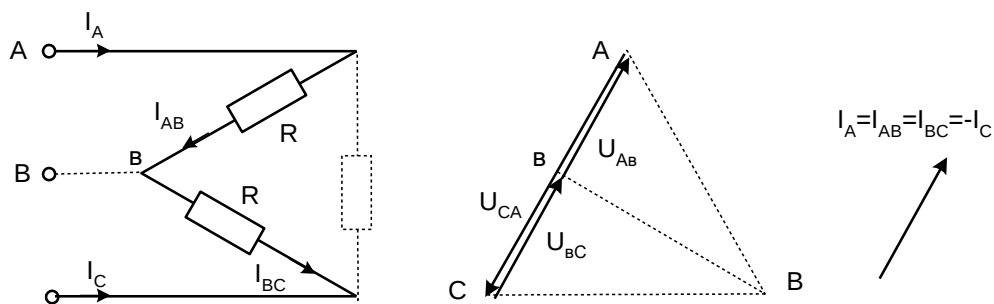


Рис. 4.17.

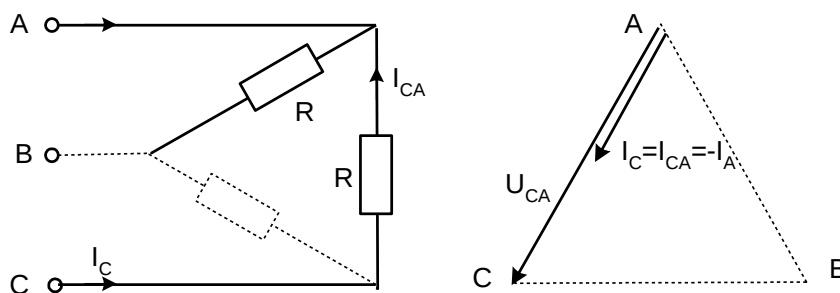


Рис. 4.17.

### Экспериментальная часть

#### Задание

Экспериментально исследовать аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.

#### Порядок выполнения работы

Соберите цепь согласно схеме (рис.4.18) с сопротивлениями фаз  $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=1\text{кОм}$ . Монтажная схема такая же, как на рис. 4.9, но ваттметр в этой работе не понадобится.

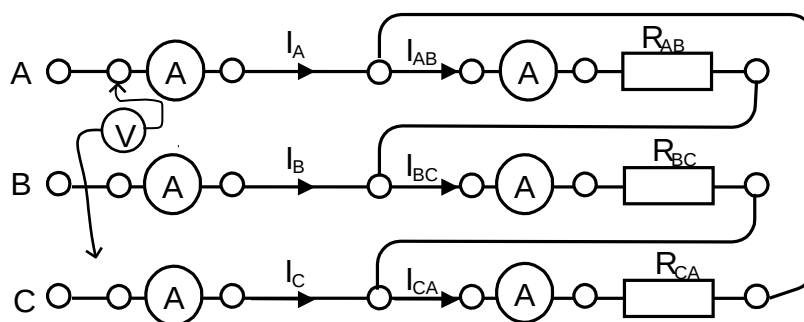


Рис.4.18. Принципиальная схема цепи с сопротивлениями фаз.

- ### Таблица 4.4

| № | Режим                              | $I_{AB},$<br>мА | $I_{BC},$<br>мА | $I_{CA},$<br>мА | $I_A,$<br>мА | $I_B,$<br>мА | $I_C,$<br>мА |
|---|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | Симметричный режим, $R_\phi=1$ кОм |                 |                 |                 |              |              |              |
| 2 | Обрыв фазы $AB$ нагрузки           |                 |                 |                 |              |              |              |
| 3 | Обрыв линейного провода $A$        |                 |                 |                 |              |              |              |
| 4 | Обрыв фазы $AB$ и линии $C$        |                 |                 |                 |              |              |              |
| 5 | Обрыв фазы $AB$ и линии $A$        |                 |                 |                 |              |              |              |

## 2. Обрыв фазы АВ нагрузки

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{B/cm}$ |  |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{mA/cm}$ |  |  |  |  |  |  |

**2. Обрыв линейного провода A**

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |

**3. Обрыв фазы АВ и линии C**

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |

#### 4. Обрыв фазы АВ и линии А

|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |                                      |  |  |  |  |  |  |  |
| $m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |  | $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$ |  |  |  |  |  |  |  |

1. **Вопрос:** Как вычислить мощность несимметричной трёхфазной нагрузки?
2. **Вопрос:** Как (во сколько раз) увеличиваются или уменьшаются фазные и линейные токи в каждом из рассмотренных аварийных режимов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЁТ НЕРАЗВЕТВЛЁННЫХ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

#### Цель работы

Экспериментальное исследование и расчёт магнитной цепи при постоянном токе.

Исследование магнитной цепи на переменном токе.

#### **2. Экспериментальное исследование магнитной цепи постоянного тока**

##### *Общие сведения*

Участок магнитной цепи характеризуется вебер-амперной характеристикой, т.е. зависимостью магнитного потока  $\Phi$  от магнитного напряжения на этом участке  $NI$ , где  $N$  – напряжённость магнитного поля, а  $l$  – длина участка. В замкнутом контуре магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных напряжений всех участков равна алгебраической сумме намагничивающих (магнитодвижущих) сил всех катушек  $iw$ ,

$$\sum NI = \sum iw,$$

где  $i$  – ток в катушке, а  $w$  – число витков.

Вебер-амперная характеристика неразветвлённой магнитной цепи представляет собой зависимость  $\Phi(iw)$ . Её можно построить, если известны кривая намагничивания  $B(H)$  ферромагнитного материала, из которого сделан магнитопровод и его геометрические размеры: площадь поперечного сечения  $S$  и длина средней линии  $l$  каждого участка.

Задаваясь рядом произвольных значений магнитной индукцией  $B_1$  для одного из участков магнитной цепи, находим по кривой намагничивания напряжённость  $H_1$  на этом участке, магнитный поток  $\Phi = B_1 S_1$  и магнитное напряжение  $H_1 l_1$  на этом участке. Считая магнитный поток вдоль всей неразветвлённой цепи одинаковым находим далее магнитную индукцию на втором участке  $B_2$  и находим аналогично  $H_2$ , и  $H_2 l_2$ . Повторяем этот расчёт для всех участков замкнутой магнитной цепи, находим  $\sum NI = iw$  и строим график  $\Phi(iw)$ . Для воздушных зазоров магнитной цепи при определении  $H$  вместо кривой намагничивания используем зависимость  $H = B/\mu_0$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость пустоты.

Принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 5.1. Конденсатор 100 мкФ включён параллельно катушке W1 для предотвращения перенапряжений при отключении цепи и более плавного нарастания напряжения при включении.

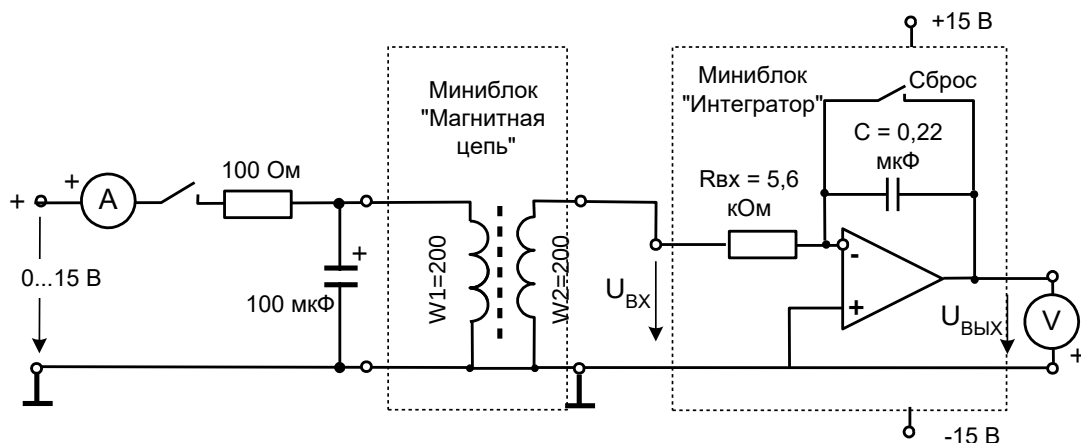


Рис.5.1. Принципиальная схема лабораторной установки.

Для измерения магнитного потока на постоянном токе обычно используется так называемый баллистический метод, основанный на измерении заряда, протекающего по измерительной катушке, намотанной на магнитопровод. При включении цепи на постоянный ток или при её выключении магнитный поток изменяется. При этом, в измерительной катушке индуцируется ЭДС  $E = w \Delta \Phi / \Delta t$ , в ней возникает ток  $I = E/R$ . За время  $\Delta t$  через измерительную катушку протекает заряд  $\Delta q = I \Delta t = w \Delta \Phi / R$ , где  $R$  – сопротивление контура с измерительной катушкой. Для измерения заряда часто использовался баллистический гальванометр, отклонение подвижной части которого пропорционально заряду протекшего через него за короткое время. Отсюда этот метод получил название баллистического. В данной работе вместо баллистического гальванометра используется интегрирующий усилитель. Приращение напряжения на его выходе пропорционально интегралу от тока, протекающего через его входные зажимы. Если начальное напряжение на выходе усилителя равно нулю, то после протекания заряда  $q$  на его выходе устанавливается напряжение

$$U_{\text{вых}} = q/C,$$

где  $C$  – входная ёмкость интегратора.

Подставляя в эту формулу выражение заряда через магнитный поток, получим

$$U_{\text{вых}} = w \Phi / RC.$$

Отсюда:

$$\Phi = U_{\text{вых}} \cdot RC/w,$$

где  $R$  и  $C$  – параметры входной цепи интегрирующего усилителя, указанные на его этикетке.

При измерениях следует иметь в виду, что даже при отсутствии напряжения на входе интегратора, напряжение на его выходе медленно изменяется (дрейфует) вследствие несовершенства интегратора и внешних помех. Поэтому, непосредственно перед включением или выключением цепи нужно «обнулить» интегратор, замкнув на 2...3 с выключатель «Сброс», а отсчёт выходного напряжения произвести после включения или выключения цепи в течение нескольких секунд. Для увеличения достоверности результатов рекомендуется произвести несколько включений и выключений и записать среднее значение выходного напряжения.

Исследуемая магнитная цепь схематично показана на рис. 5.2.

Магнитопровод выполнен из двух Ш-образных ферритовых сердечников марки М2000НМ. На среднем стержне магнитопровода расположены две одинаковые обмотки (намагничивающая и измерительная) по 200 витков каждая. Зазор может регулироваться винтом, один оборот которого изменяет зазор на 0,5 мм (шаг резьбы 0,5 мм). Для устранения перекоса сердечника рекомендуется в левый и правый зазоры вставить немагнитные прокладки (например, полоски бумаги) и осторожно от руки затянуть винт. Так, например, толщина бумаги «Снегурочка» для офисной техники 0,1 мм, толщина газетной бумаги - 0,05...0,06 мм.

***Будьте осторожны: большое усилие при затягивании винта может привести к разлому печатной платы на которой смонтирована вся конструкция!***

Необходимые для расчёта размеры сердечника приведены на рис. 5.3, а кривая намагничивания феррита М2000НМ – на рис. 5.4.

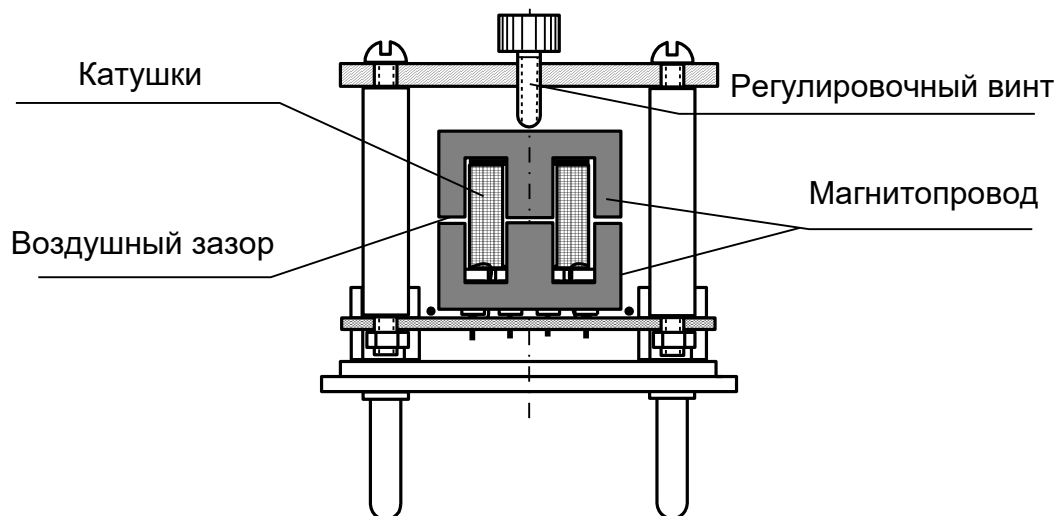


Рис.5.2. Магнитная цепь.

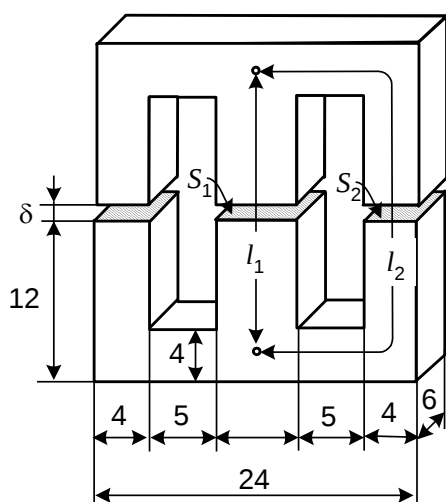


Рис. 5.3. Размеры сердечника.

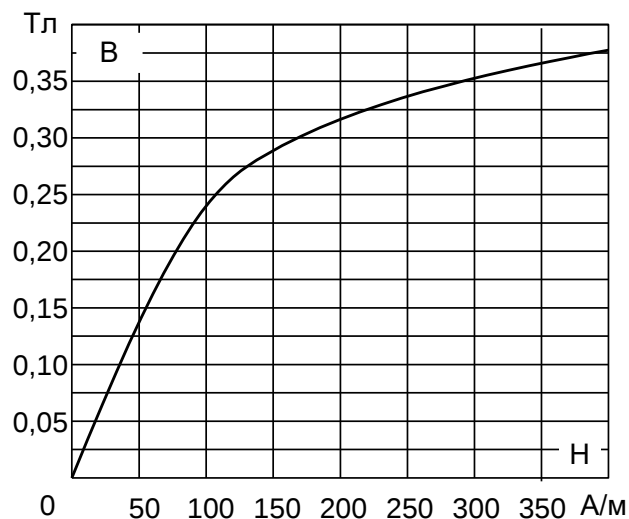


Рис. 5.4. Кривая намагничивания феррита.

### Экспериментальная часть

#### Задание

Снять экспериментально вебер-амперные характеристики магнитной цепи без зазора, а также с зазорами 0,06 и 0,1 мм. Сделать расчёт характеристики без зазора и с одним из зазоров. Сравнить результаты.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите электрическую цепь согласно принципиальной схеме (рис. 5.1) и монтажной схеме (рис. 5.5). Конденсатор 100 мкФ в этой цепи установлен для того, чтобы после отключения цепи в контуре L-C возникали затухающие колебания, и сердечник размагничивался.
- Устраните зазор в магнитной цепи, завернув до отказа регулировочный винт усилием «от руки». Переключите интегратор в положение «Сброс» (верхнее положение переключателя), включите генератор напряжений и установите первое значение тока из табл. 5.1. Убедитесь что напряжение на выходе равно нулю.

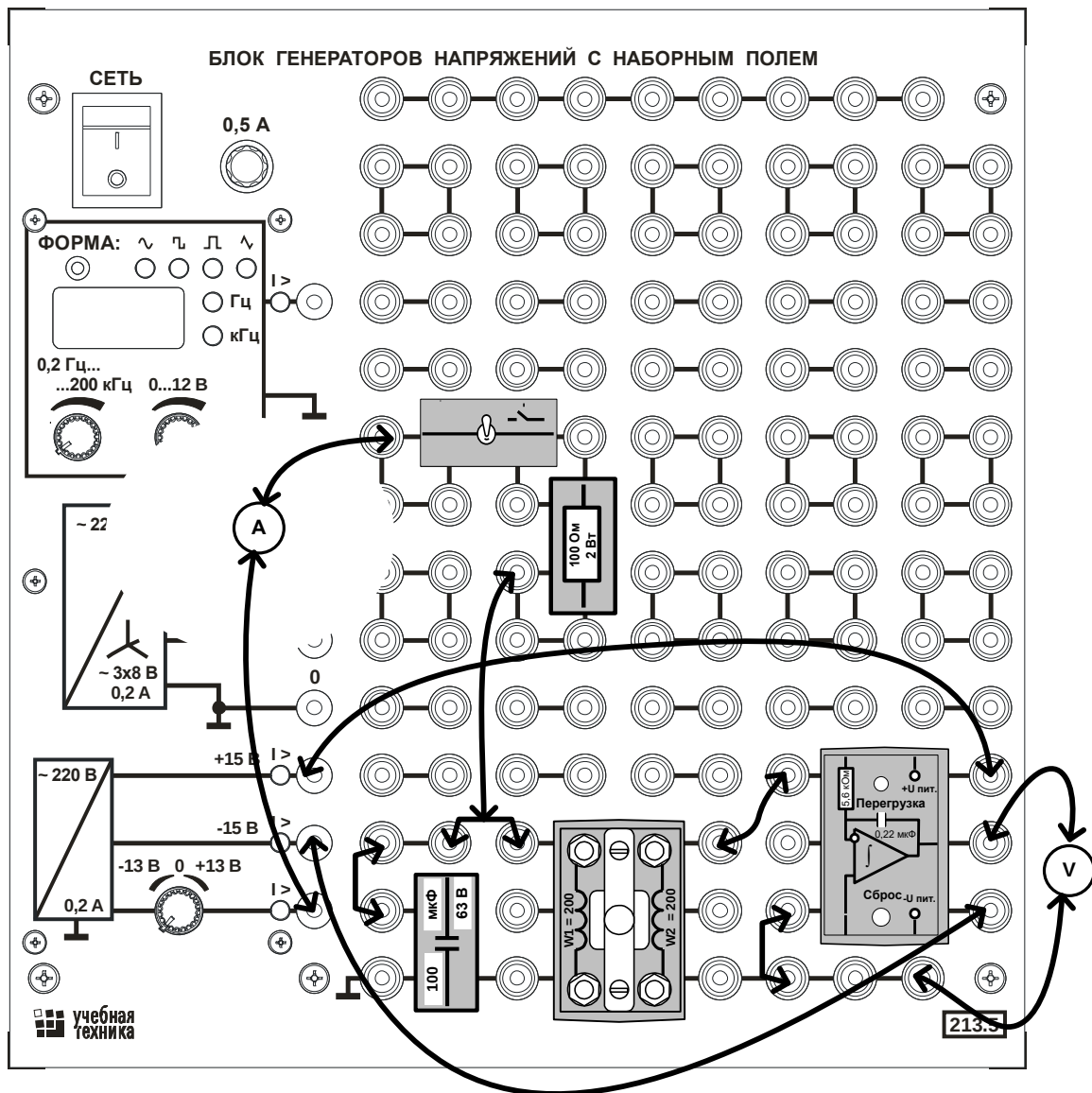


Рис.5.5. Монтажная схема.

- Включите интегрирование, и тотчас отключите ток выключателем на входе цепи. В течение двух – трёх секунд после этого запомните значение напряжения на выходе интегратора.
- Снова произведите сброс, включите интегрирование и тотчас включите выключатель на входе цепи. Снова запомните показание вольтметра на выходе. Оно должно быть примерно такое же, как и при выключении, только с другим знаком.
- Прodelайте операции включения и выключения несколько раз и запишите в таблицу среднее или наиболее часто повторяющееся значение.
- Установите следующее значение тока и повторите операции выключения и включения.

- Повторите опыт при всех значениях тока, указанных в табл. 5.1, рассчитайте магнитный поток  $\Phi = U_{\text{ВЫХ}} \cdot RC/w$  и магнитодвижущую силу  $I$ . Постройте экспериментальные графики  $\Phi(Iw)$  на рис. 5.2.
- Установите второе значение зазора и повторите опыт при значениях тока, указанных для этого зазора. Постройте графики на том же рис.
- Прodelайте эти же опыты для третьего значения зазора и также постройте графики.

Таблица 5.1

|                       |                      |    |    |    |    |    |     |     |
|-----------------------|----------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|
| $\delta = 0$          | I, мА                | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
|                       | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В |    |    |    |    |    |     |     |
|                       | $Iw$ , А             |    |    |    |    |    |     |     |
|                       | $\Phi$ , Вб          |    |    |    |    |    |     |     |
| $\delta = 0,06$<br>мм | I, мА                |    | 20 | 40 |    | 80 |     | 120 |
|                       | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В |    |    |    |    |    |     |     |
|                       | $Iw$ , А             |    |    |    |    |    |     |     |
|                       | $\Phi$ , Вб          |    |    |    |    |    |     |     |
| $d = 0,1$<br>мм       | I, мА                |    |    | 40 |    | 80 |     | 120 |
|                       | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В |    |    |    |    |    |     |     |
|                       | $Iw$ , А             |    |    |    |    |    |     |     |
|                       | $\Phi$ , Вб          |    |    |    |    |    |     |     |

### 3. Расчёт магнитной цепи

При расчёте магнитной цепи в силу её симметрии две крайних ветви объединяются в одну ветвь удвоенного сечения. Придерживаетесь следующего порядка расчёта:

- По размерам, указанным на рис. 5.2 определите длины средних линий участков магнитной цепи  $l_1$  и  $l_2$  (при  $\delta = 0$ ), а также их сечения  $S_1$  и  $S_2$ .

$$l_1 =$$

.....

м.

$$l_2 =$$

.....

м.

$$S_1 = \dots\dots\dots \text{м}^2.$$

$$S_2 = \dots\dots\dots \text{м}^2.$$

- Расчёт вебер-амперных характеристик магнитной цепи без зазора и с одним из зазоров ведите в форме табл. 5.2

Таблица 5.2

| $B_1$ , Тл                                                                | 0,1 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|-----|------|
| $H_1$ , А/м (по рис. 11.3)                                                |     |     |      |     |      |
| $H_1 l_1$ , А                                                             |     |     |      |     |      |
| $\Phi = B_1 S_1$ , Вб                                                     |     |     |      |     |      |
| $B_2 = \Phi / S_2$ , Тл                                                   |     |     |      |     |      |
| $H_2$ , А/м (по рис. 11.3)                                                |     |     |      |     |      |
| $H_2 l_2$ , А                                                             |     |     |      |     |      |
| $I_w = H_1 l_1 + H_2 l_2$ , А (при $\delta = 0$ )                         |     |     |      |     |      |
| $H_{\delta 1} = B_1 / \mu_0$ , А/м                                        |     |     |      |     |      |
| $H_{\delta 2} = B_2 / \mu_0$ , А/м                                        |     |     |      |     |      |
| $I_w = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\delta 1} \delta + H_{\delta 2} \delta$ , А |     |     |      |     |      |

- На рис. 5.6 постройте две рассчитанные характеристики  $\Phi(I_w)$  и сравните их с опытными.

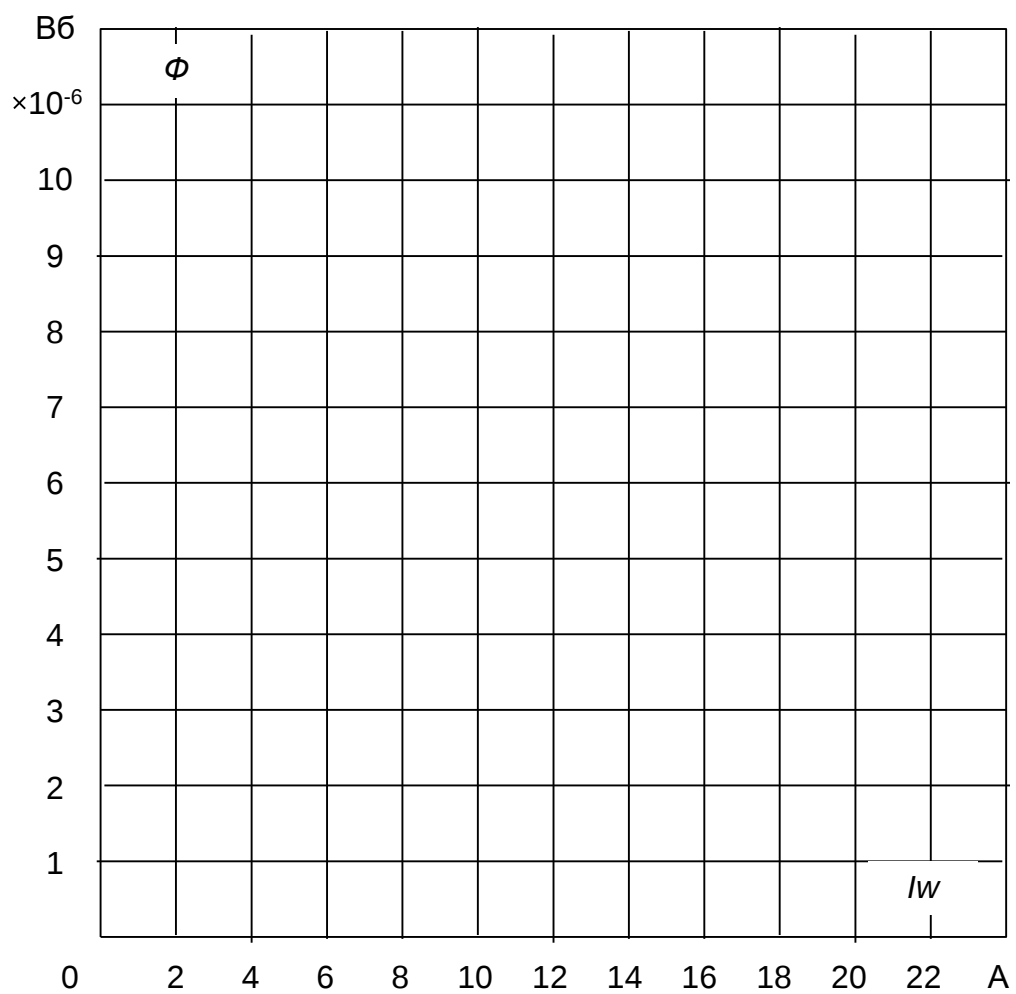


Рис. 5.6. График магнитного потока.

### 3. Исследование магнитной цепи на переменном токе

#### *Общие сведения*

Если намагничивающую катушку магнитопровода подключить к переменному напряжению  $u(t)$ , то в ней возникает переменный ток  $i(t)$ , а в магнитопроводе – переменный магнитный поток  $\phi(t)$ .

При синусоидальном приложенном напряжении

$$u(t) = U_{\text{макс}} \sin \omega t,$$

где  $U_{\text{макс}}$  и  $\omega$  – соответственно амплитуда и круговая частота, магнитный поток также будет синусоидальным. (Здесь пренебрегается влиянием активного сопротивления катушки). Амплитуда магнитного потока связана с действующим значением приложенного напряжения следующим выражением:

$$\Phi_{\text{макс}} = U/4,44fw.$$

Следовательно, максимальное значение магнитного потока определяется лишь действующим значением приложенного напряжения  $U$ , его частотой  $f$  и числом витков катушки  $w$ .

При увеличении приложенного напряжения и магнитного потока сначала пропорционально увеличивается и амплитуда тока. Однако, при переходе в область насыщения амплитуда тока резко возрастает и его форма искажается.

При наличии воздушного зазора в магнитопроводе или при его увеличении магнитный поток практически остаётся неизменным, но увеличивается магнитное сопротивление магнитопровода, и уменьшаются индуктивность и индуктивное сопротивление катушки. При неизменном приложенном напряжении это приводит к увеличению тока. Форма тока становится ближе к синусоидальной, так как магнитное сопротивление теперь, в основном, определяется воздушным зазором.

Вебер-амперная характеристика магнитопровода  $\phi(iw)$  при переменном токе имеет вид петли (петля гистерезиса), ширина которой зависит от потерь энергии в магнитопроводе на перемагничивание и вихревые токи. При увеличении зазора в магнитопроводе петля вырождается в прямую линию. В данной лабораторной работе петля гистерезиса выводится на дисплей компьютера с помощью USB осциллографа в режиме XY. Принципиальная схема установки показана на рис. 5.7.

На магнитопроводе кроме намагничивающей обмотки  $w_1$  имеется измерительная обмотка  $w_2$ , в которой индуцируется ЭДС,

пропорциональная скорости изменения магнитного потока. Эта ЭДС подаётся на вход интегрирующего усилителя, на выходе которого напряжение пропорционально магнитному потоку:

$$u_{\text{вых}} = w_2 \phi / RC,$$

где  $R$  и  $C$  – параметры интегратора, указанные на его этикетке.

Это напряжение подаётся на вертикальный вход осциллографа (Y). На горизонтальный вход (X) подаётся напряжение, пропорциональное току в намагничивающей катушке. Для этого последовательно с катушкой включается небольшое добавочное сопротивление (шунт).

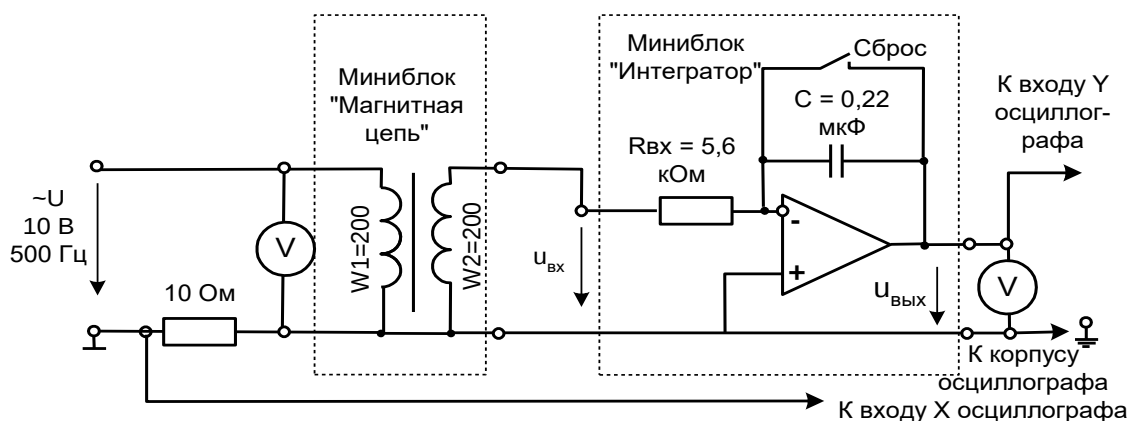


Рис.5.7. Принципиальная схема установки.

## Экспериментальная часть

### Задание

С помощью осциллографа убедиться, что при синусоидальном приложенном напряжении магнитный поток в катушке также синусоидальный, а форма тока может отличаться от синусоиды. Снять экспериментально и проверить расчётом зависимость амплитуды магнитного потока от действующего значения приложенного напряжения и от частоты.

Пронаблюдать на осциллографе за изменением формы и величины магнитного потока и тока при изменении воздушного зазора.

Получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, пронаблюдать за изменением петли при изменении зазора в магнитопроводе.

### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис.5.7) и монтажной схеме (рис. 5.8). **При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение**

***x1. Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.***

- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу а, **затем**, к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите генератор напряжений, установите частоту синусоидального сигнала 400...500 Гц и амплитуду примерно 5 В.
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows.
- Подключите кабели к входу (входам) осциллографа (CH1 и CH2) и подсоедините их к испытываемой цепи. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку. В окне «Easy Control» нажмите кнопку AUTO. Осциллограф автоматически установит масштабы напряжения и времени.
- Увеличивая и уменьшая амплитуду приложенного напряжения, наблюдайте за изменениями амплитуды и формы кривой тока (CH1) и формы магнитного потока (CH2). Сделайте выводы.
- Увеличивая напряжение согласно табл. 5.3, снимите зависимость напряжения на выходе интегратора  $U_{\text{вых}}$  (по вольтметру V2) от напряжения на входе цепи  $U$  (по вольтметру V1).

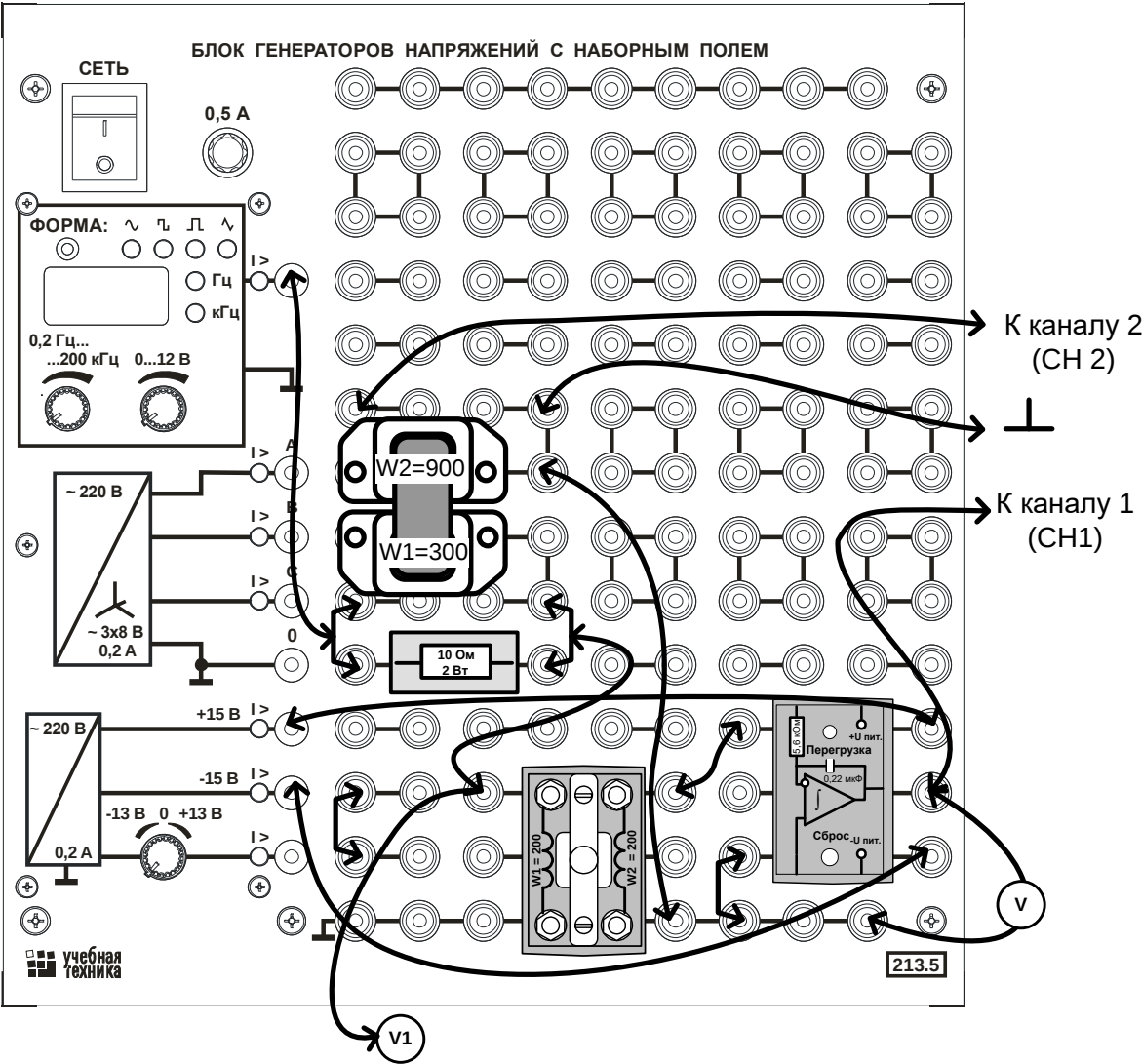


Рис. 5.8. Монтажная схема.

Таблица 5.3

| $U, \text{ В}$                                         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|
| $U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$                            |   |   |   |   |   |
| $\Phi_{\text{м}}, 10\text{-}6\text{Вб}$<br>(эксперим.) |   |   |   |   |   |
| $\Phi_{\text{м}}, 10\text{-}6\text{Вб}$<br>(расчётн.)  |   |   |   |   |   |

- Рассчитайте и постройте на рис. 5.9 экспериментальный график изменения амплитуды магнитного потока от напряжения на катушке:

$$\Phi_M(U) = \frac{RC}{w_2} \sqrt{2} U_{\text{ВЫХ}} .$$

- Рассчитайте этот же график формуле:

$$\Phi_M(U) = \frac{U}{4,44 f w_1} .$$

- Постройте расчётный график также на рис. 5.9 и сравните его с экспериментальным.

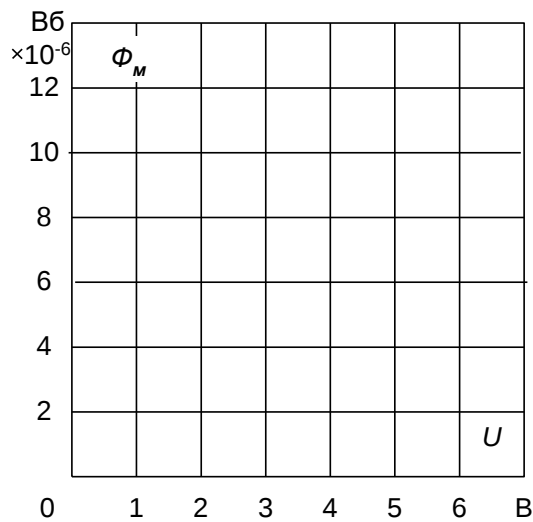


Рис. 5.9

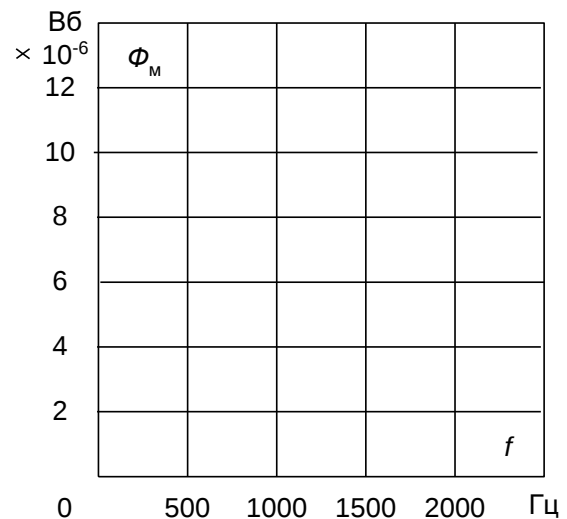


Рис. 5.10

- Установите напряжение на входе цепи 5 В и изменяя частоту приложенного напряжения согласно табл.5.4 снимите зависимость напряжения на выходе интегратора от частоты.
- Рассчитайте экспериментальную и расчётную зависимости амплитуды магнитного потока от частоты по тем же формулам и постройте графики на рис. 5.10

Таблица 5.4

| $f$ , Гц                                        | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 |
|-------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|
| $U_{\text{ВЫХ}}$ , В                            |     |      |      |      |      |
| $\Phi_{\text{м}}$ , $10^{-6}$ Вб<br>(эксперим.) |     |      |      |      |      |
| $\Phi_{\text{м}}$ , $10^{-6}$ Вб<br>(расчётн.)  |     |      |      |      |      |

- Переключите осциллограф в режим X-Y, нажав кнопку «X-Y» на панели «Easy Control». Сдвиньте изображение в центр экрана с помощью флажков «1» и «2», расположенных слева от экрана. Зеркально поверните изображение. Для этого откройте меню «Channel», затем откройте подменю CH1 и щёлкните левой кнопкой мыши на опции «Invert Off».
- Пронаблюдайте за изменением петли гистерезиса при изменении приложенного напряжения.
- Пронаблюдайте за изменением петли гистерезиса при изменении зазора в магнитопроводе. Для изменения зазора необходимо выключить питание, вывернуть слегка регулировочный винт, вставить в образовавшиеся зазоры полоски бумаги и снова затянуть винт и включить питание. Сделайте выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

#### Цель работы

Исследование и расчёт однофазных выпрямителей.

Исследование и расчёт выпрямителей трёхфазного напряжения.

Исследование управляемых выпрямителей и тиристорных регуляторов.

#### 1. Исследование и расчёт однофазных выпрямителей

##### *Общие сведения*

В цепи с полупроводниковым диодом (рис. 6.1) установившийся ток может протекать только при определенной полярности приложенного к диоду напряжения. При изменении полярности напряжения диод запирается и ток прекращается. В результате при синусоидальном приложенном напряжении  $u_{вх}$  в нагрузке протекает пульсирующий ток одного направления. Такую же форму имеет и выпрямленное напряжение на нагрузке  $u_d$ . Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром является конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. Тогда при открытом состоянии диода конденсатор заряжается, а при закрытом – разряжается на нагрузку. Ток и напряжение на нагрузке становятся непрерывными, пульсации уменьшаются, и увеличивается среднее значение напряжения на нагрузке. Кривая  $u_d(t)$  для этого случая показана на рис. 6.1 пунктиром.

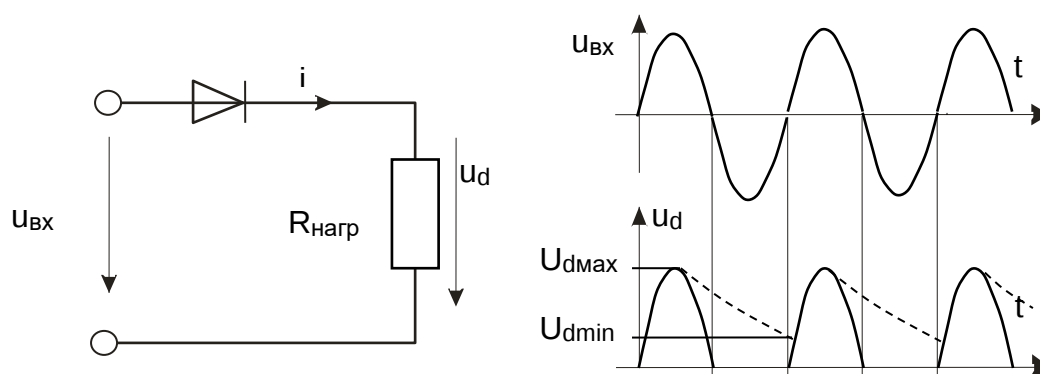


Рис. 6.1. Однополупериодная схема выпрямления

При исследовании выпрямителей применяются следующие обозначения:

- $u_{\text{вх}}, U_{\text{вх}}, U_{\text{вхmax}}$  — мгновенное, действующее и амплитудное значения синусоидального входного напряжения;
- $u_d, U_d, U_{d\text{max}}, U_{d\text{min}}$  — мгновенное, среднее, максимальное, минимальное значения выходного (выпрямленного) напряжения;
- $U_{\text{max}\sim}$  — амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения, которая в первом приближении может быть определена из графика (рис. 6.1):

$$U_{\text{max}\sim} \cong \frac{U_{d\text{max}} - U_{d\text{min}}}{2};$$

- $f_{\text{п}}$  — частота пульсаций выходного напряжения;
- $m = f_{\text{пульс}} / f_{\text{вх}}$  — число пульсаций выпрямленного напряжения за один период напряжения питания;
- $k_{\text{пульс}} = \frac{U_{\text{max}\sim}}{U_d}$  — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

В однополупериодном выпрямителе без фильтра:

$$U_d = \frac{U_{\text{âõ max}}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{âõ}}}{\pi} \cong 0,45U_{\text{âõ}}; \quad U_{\text{max}\sim} \cong \frac{U_{\text{âõ max}}}{2}; \quad k_{\text{пульс}} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырёх диодов, (рис. 6.2). При положительном полупериоде входного напряжения диоды Д2 и Д4 открыты и через них течёт ток в нагрузку. Диоды Д1 и Д3 в этот момент закрыты. При отрицательном полупериоде диоды Д2 и Д4 закрываются, но открываются диоды Д1 и Д3 пропуская ток в нагрузку в том же направлении. По сравнению с однополупериодным выпрямителем в двухполупериодном в два раза увеличивается постоянная составляющая выпрямленного напряжения и в два раза увеличивается частота пульсации, что облегчает задачу сглаживания пульсаций фильтрами.

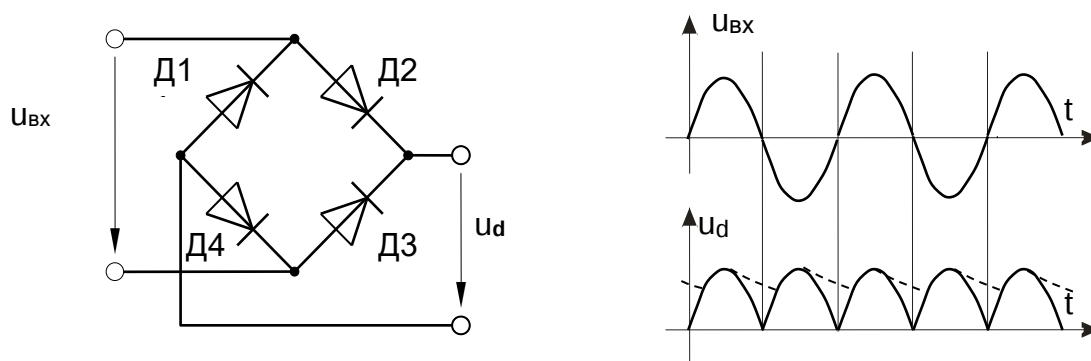


Рис. 6.2. Двухполупериодная схема выпрямления.

В двухполупериодном выпрямителе без фильтра:

$$U_d = \frac{2U_{\hat{a}\hat{o} \max}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_{\hat{a}\hat{o}}}{\pi} \cong 0,9U_{\hat{a}\hat{o}}; \quad U_{\max \sim} \cong \frac{U_{\hat{a}\hat{o} \max}}{2}; \quad k_{\text{коэф}} = \frac{\pi}{4} = 0,785.$$

## Экспериментальная часть

### Задание

Исследовать экспериментально основные параметры однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 6.3) и монтажной (рис. 6.4) сначала без сглаживающего фильтра ( $C=0$ ). Включите мультиметры: V1 – для измерения действующего значения синусоидального напряжения, V2 – для измерения постоянного напряжения. Включите генератор напряжений и установите максимальную амплитуду сигнала.

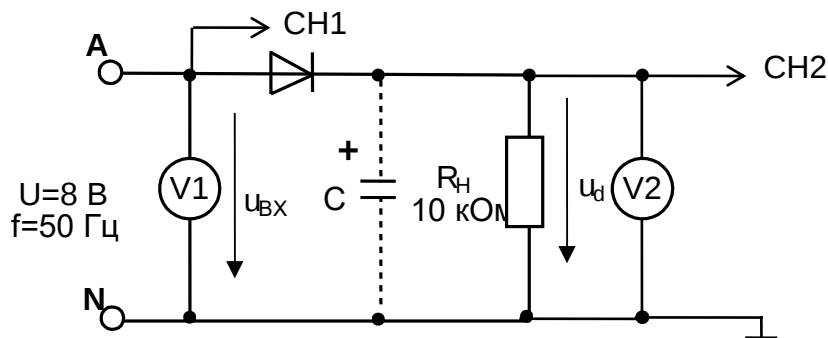


Рис. 6.3. Принципиальная схема установки.

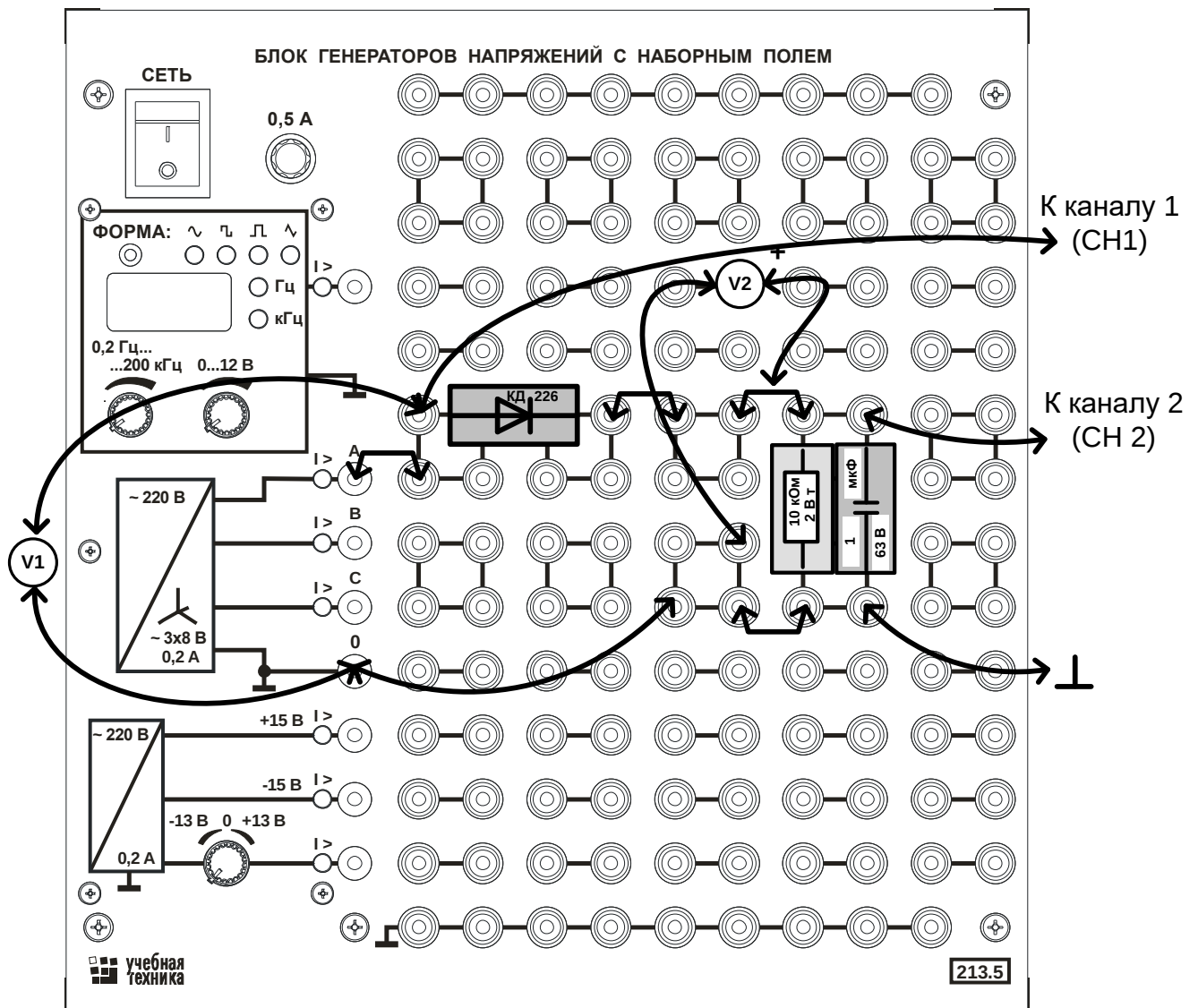


Рис. 6.4. Монтажная схема.

- Включите и настройте USB осциллограф. Для этого запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows, подключите кабели к входам осциллографа (CH1 и CH2) и подсоедините их к испытываемой цепи. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку.
- В окне «Easy Control» нажмите кнопку AUTO. Осциллограф автоматически установит масштабы напряжения и времени.
- Сделайте измерения и запишите в табл. 6.1. значения:  $U_{ВХ}$  - по мультиметру V1,  $U_d$  - по мультиметру V2,  $U_{dmax}$  и  $U_{dmin}$  - по осциллографу,  $m = f_{пульс} / f_{ВХ}$ .  $U_{dmax}$  и  $U_{dmin}$  удобно измерять с помощью

курсор или линии уровня (см Руководство пользователя осциллографа DSO-2090).

- Рассчитайте и запишите в табл. 6.1 коэффициенты  $U_d / U_{BX}$ ,  $U_{\max\sim}$  и  $k_{\text{пульс}}$ .
- Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 6.1 (**не ошибитесь с полярностью при подключении электролитических конденсаторов!**), повторите измерения и вычисления.

Таблица 6.1

| $C$ , мкФ          | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>10</b> | <b>100</b> |
|--------------------|----------|----------|-----------|------------|
| $U_{BX}$ , В       |          |          |           |            |
| $U_d$ , В          |          |          |           |            |
| $U_{d\max}$ , В    |          |          |           |            |
| $U_{d\min}$ , В    |          |          |           |            |
| $m$                |          |          |           |            |
| $U_d / U_{BX}$     |          |          |           |            |
| $U_{\max\sim}$     |          |          |           |            |
| $k_{\text{пульс}}$ |          |          |           |            |

- Соберите цепь двухполупериодного мостового выпрямителя согласно монтажной схеме рис. 6.5, повторите все измерения и вычисления. Результаты сведите в табл. 6.2.

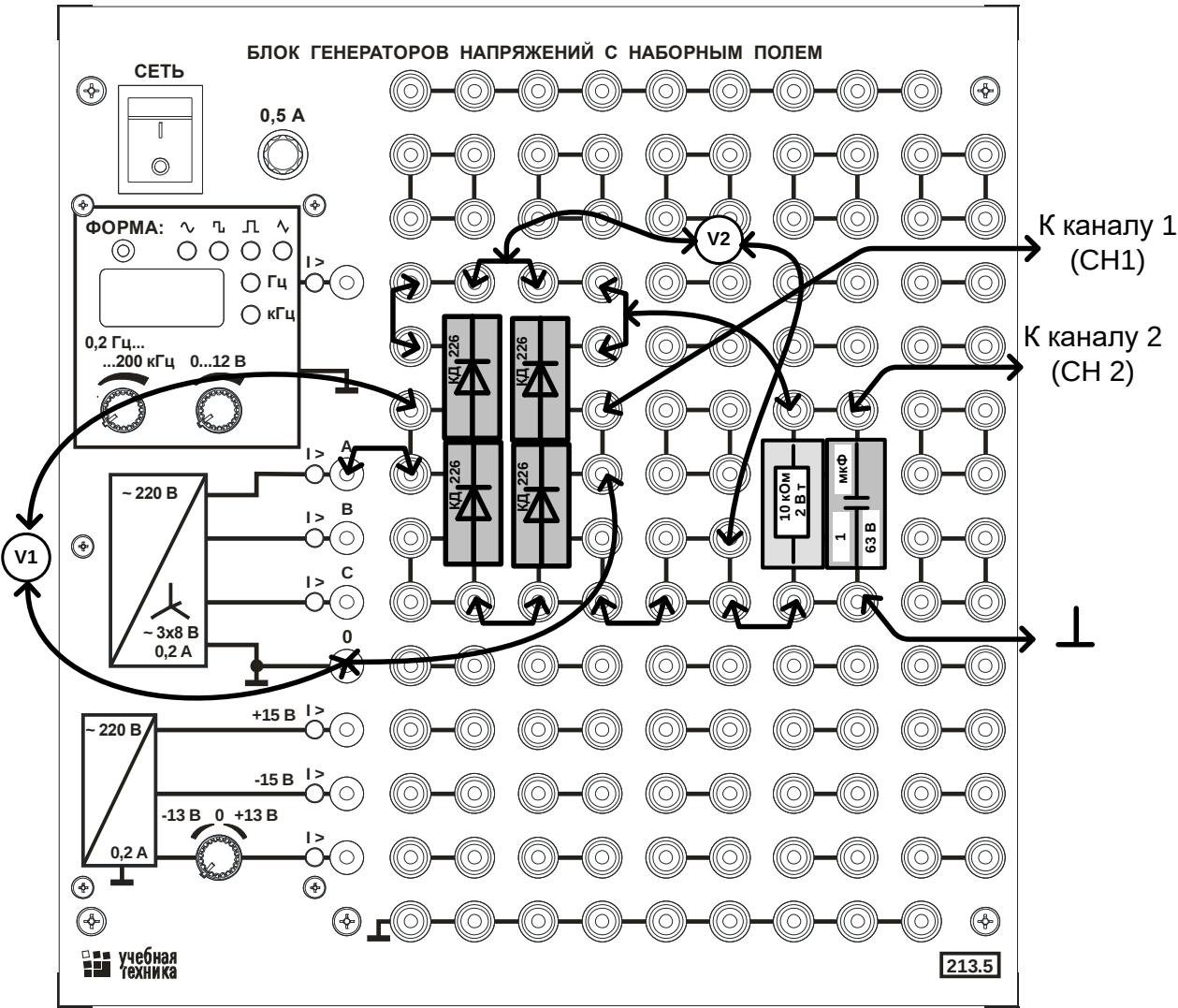


Рис. 6.5. Монтажная схема.

Таблица 6.2

|                              |   |   |    |     |
|------------------------------|---|---|----|-----|
| $C, \text{ мкФ}$             | 0 | 1 | 10 | 100 |
| $U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$   |   |   |    |     |
| $U_d, \text{ В}$             |   |   |    |     |
| $U_{d\text{max}}, \text{ В}$ |   |   |    |     |
| $U_{d\text{min}}, \text{ В}$ |   |   |    |     |
| $m$                          |   |   |    |     |
| $U_d / U_{\text{ВХ}}$        |   |   |    |     |
| $U_{\text{max}\sim}$         |   |   |    |     |
| $k_{\text{пульс}}$           |   |   |    |     |

## 2. Мостовой выпрямитель трёхфазного напряжения

### Общие сведения

Потребители большой мощности питаются выпрямленным трехфазным переменным током. Несколько большая в сравнении с однофазным выпрямителем стоимость трехфазного выпрямителя многократно окупается за счет более простого сглаживания выходного напряжения.

Чаще всего используется мостовая схема выпрямления трёхфазного напряжения (рис. 6.6а). Она состоит из 6 вентилей (полупроводниковых диодов) и питается линейными напряжениями трёхфазного источника. На рис. 6.6б показаны кривые фазных напряжений источника питания  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  и кривая выпрямленного напряжения  $u_d$ . Выпрямленное напряжение образуется разностью фазных напряжений, т.е. линейными напряжениями. В нечётной группе вентилей в открытом состоянии находится тот вентиль, у которого на аноде положительное наибольшее напряжение, а в чётной – тот вентиль, у которого на катоде отрицательное наименьшее напряжение. Разность положительного наибольшего напряжения и отрицательного наименьшего напряжения и есть выпрямленное напряжение на выходе трёхфазного моста. Эта разность на рис. 6.6а заштрихована. Так на отрезке  $30^\circ < \omega t < 150^\circ$  открыт диод Д1, так как напряжение  $u_A$  на этом отрезке имеет наибольшее значение. В чётной группе вентилей на отрезке  $90^\circ < \omega t < 240^\circ$  открыт диод Д2, так как у него на катоде напряжение  $u_C$  имеет наименьшее значение. При  $\omega t = 150^\circ$  диод Д1 закрывается и открывается диод Д3, а при  $\omega t = 240^\circ$  закрывается диод Д2 и открывается Д4. На рисунке 6.6в показаны графики токов в диодах.

Средняя величина выпрямленного напряжения в трёхфазном мосте

$$U_d = \frac{3U_{\text{ё max}}}{\pi} = \frac{3\sqrt{2}U_{\text{ё}}}{\pi} \cong 1,35U_{\text{ё}} = 2,34U_{\text{ё}};$$

Амплитуда пульсаций

$$U_{\text{max} \sim} \cong \frac{1 - \cos 30^\circ}{2} U_{\text{ё max}} \cong 0,067 U_{\text{ё max}};$$

Коэффициент пульсаций

$$k_{\text{юёиñ}} = \frac{0,067\pi}{3} \cong 0,07;$$

Частота пульсаций  $m = f_{\text{пульс}} / f_{\text{вх}} = 6$ .

Для сглаживания пульсаций применяются ёмкостный, индуктивный или индуктивно-ёмкостный фильтры. Ёмкостный фильтр эффективен, когда ток нагрузки невелик, т.е. сопротивление нагрузки велико по сравнению с ёмкостным сопротивлением фильтра. Индуктивный фильтр,

наоборот, эффективен при больших токах, когда сопротивление нагрузки мало по сравнению с индуктивным сопротивлением фильтра. Смешанный индуктивно-ёмкостный фильтр хорошо сглаживает в широком диапазоне изменения нагрузки: при малых токах сглаживание происходит в основном за счёт ёмкости, а при больших за счёт индуктивности.

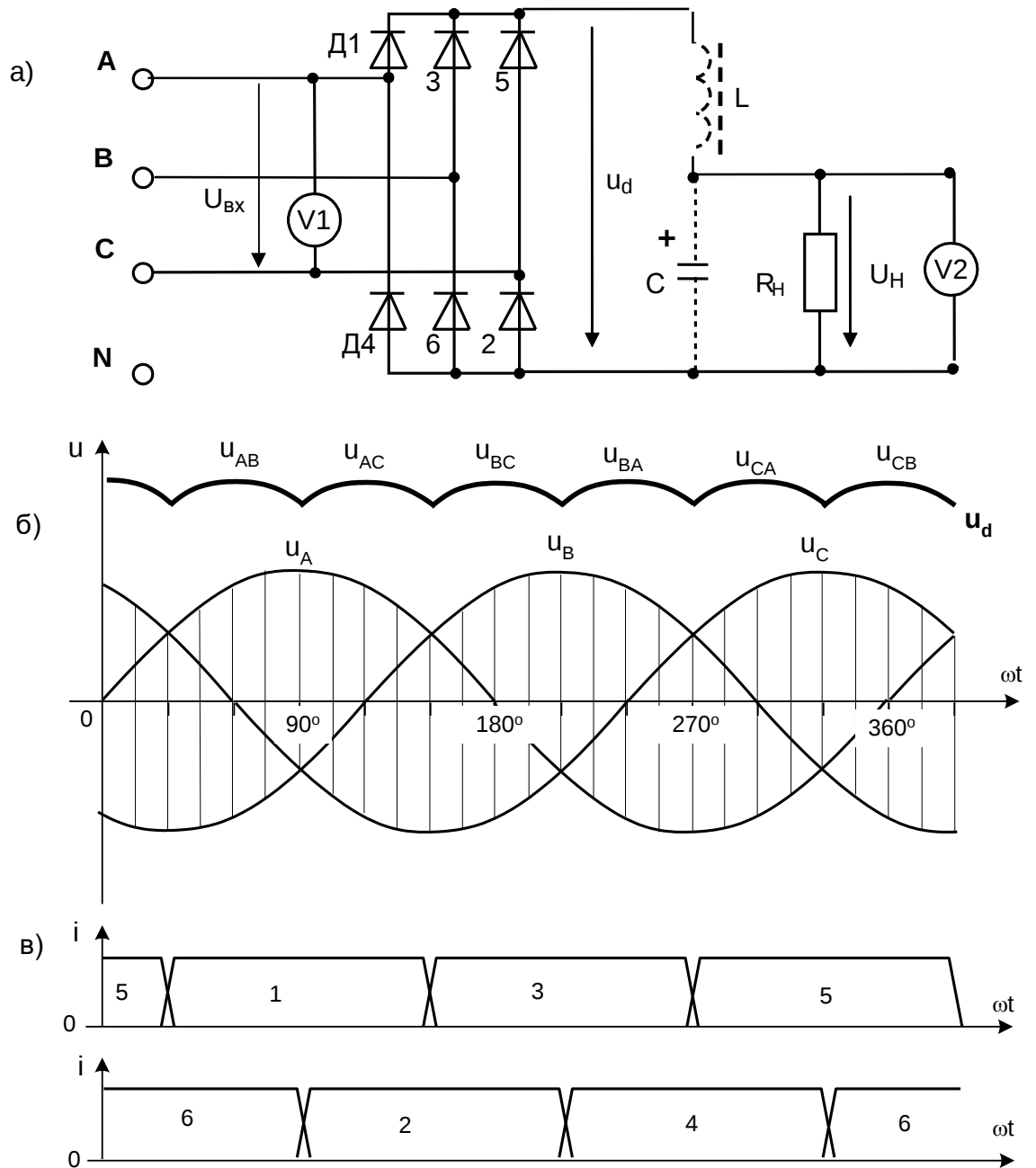


Рис. 6.6. Схема выпрямления трёхфазного напряжения.

## **Экспериментальная часть**

### **Задание**

Выпрямить выходное напряжение трехфазного источника посредством трехфазного мостового выпрямителя (так называемая схема Ларионова). Измерить параметры выпрямителя и сравнить с параметрами однофазных выпрямителей. Исследовать влияние индуктивного, ёмкостного и ёмкостно-индуктивного фильтров на форму выпрямленного напряжения при различных сопротивлениях нагрузки.

### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь трехфазного мостового выпрямителя согласно принципиальной схеме (рис. 6.6) и монтажной схеме (рис. 6.7), На схеме  $V1$  – мультиметр для измерения действующего значения синусоидального напряжения  $V2$  — мультиметр для измерения постоянного (выпрямленного) напряжения. Сопротивление нагрузки  $R_H$  состоит из двух последовательно соединённых резисторов - постоянного 100 Ом и переменного 1000 Ом и в первом опыте может быть любым от 100 до 1100 Ом. В качестве индуктивности используйте катушку трансформатора 900 витков, вставив между половинками сердечника полоски обычной писчей бумаги в один – два слоя, чтобы в магнитопроводе образовался немагнитный зазор. В первом опыте  $C=0$  и  $L=0$  (на монтажной схеме конденсатор отсутствует, а перемычка П1 находится в исходном положении, показанном сплошной линией).

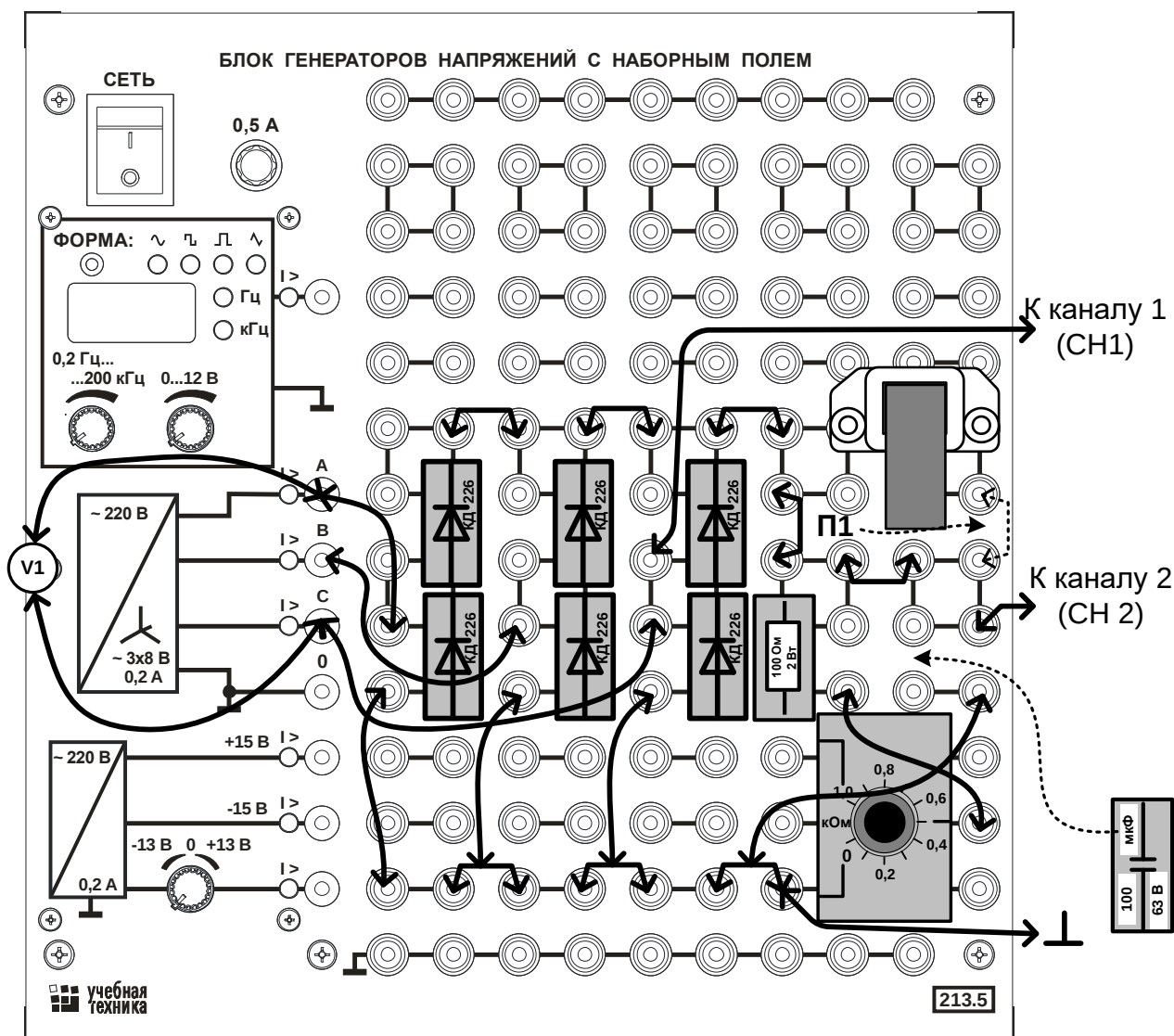


Рис. 6.7. Монтажная схема.

- Подайте на вход схемы переменное трехфазное напряжение максимальной величины, которую может дать источник.
- Включите и настройте USB осциллограф. Для этого запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows, подключите кабели к входам осциллографа (CH1 и CH2) и подсоедините их к испытываемой цепи. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку.

- В окне «Easy Control» нажмите кнопку AUTO. Осциллограф автоматически установит масштабы напряжения и времени.
- Сделайте измерения и запишите в табл. 6.1 значения:  $U_{ВХ}$  — действующее (по вольтметру V1),  $U_d$  — среднее (по вольтметру V2),  $\Delta U_{пульс}$  (по осциллографу с помощью курсора или линии уровня),  $m = f_{пульс} / f_{ВХ}$ . Попробуйте изменять сопротивление нагрузки, вращая влево и вправо ручку потенциометра. Проследите, меняется ли при этом величина и форма выпрямленного напряжения. Объясните результаты.
- Рассчитайте и запишите в табл. 6.1 коэффициенты  $U_d / U_{ВХ}$  и  $k_{пульс}$ .
- Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите конденсатор 100 мкФ, как показано на монтажной схеме пунктирной стрелкой (при этом не перепутайте полярность!).

Таблица 6.1

| $U_{ВХ}, В$ | $U_d, В$ | $\Delta U_{пульс}, В$ | $m$ | $U_d / U_{ВХ}$ | $k_{пульс}$ |
|-------------|----------|-----------------------|-----|----------------|-------------|
|             |          |                       |     |                |             |

- Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 1100 Ом и наоборот, наблюдайте на осциллографе за изменением формы выпрямленного напряжения и сделайте вывод.
- Уберите из схемы конденсатор и включите индуктивность. Для этого переставьте перемычку П1 как показано пунктирной стрелкой. Опять изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 1100 Ом, проследите за изменением формы выпрямленного напряжения.
- Наконец включите в схему и катушку и конденсатор и повторите ещё раз опыт с изменением сопротивления нагрузки.

### 3. Исследование управляемых выпрямителей и тиристорных регуляторов

#### Общие сведения

**Триодные тиристоры**, обычно называемые просто **тиристорами** (рис. 6.8), имеют четыре слоя **р-п-р-п**, один из которых соединен с внешним управляющим электродом (УЭ). Это позволяет приводить цепь катод (К)/анод (А) тиристора в открытое состояние напряжением управления, подаваемым между управляющим электродом и катодом. Будучи открытым, тиристор сохраняет проводящее состояние, даже когда напряжение на управляющем электроде выключается. Цепь катод-анод

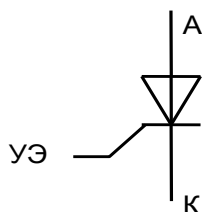


Рис. 6.8

возвращается к запертому состоянию, когда анодный ток уменьшается ниже минимальной величины (тока удержания  $I_{уд}$ ). Для восстановления запирающих свойств тиристора необходима некоторая небольшая пауза между прекращением тока и последующим появлением на тиристоре положительного напряжения. В обратном направлении (от катода к аноду) тиристор, как и обычный диод, тока не проводит. Тиристоры используются для регулирования среднего значения выпрямленного напряжения (тока) и для регулирования действующего значения переменного напряжения (тока).

Принцип действия управляемого однополупериодного выпрямителя поясняется на рис. 6.9. Цепь, состоящая из тиристора и нагрузки, соединённых последовательно, питается от источника синусоидального напряжения.

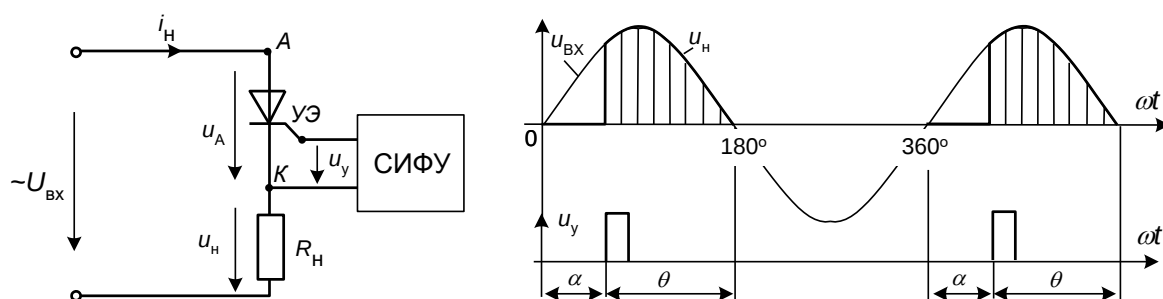


Рис. 6.9. Схема управляемого однополупериодного выпрямителя.

На отрезке времени от  $\omega t = 0$  до  $\omega t = \alpha$  не смотря на положительное напряжение на аноде тиристора ( $u_A$ ), он остаётся закрытым, так как нет напряжения на управляющем электроде. В момент времени  $\omega t = \alpha$  на управляющий электрод тиристора подаётся управляющий импульс от системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и тиристор открывается. Он остаётся открытым и после исчезновения напряжения управления в течение отрезка времени  $\theta$ , т.е. до перехода приложенного к тиристору напряжения через ноль. Отрицательную полуволну тока тиристор не пропускает, и процесс повторяется на следующей положительной полуволне приложенного напряжения. Регулируя угол управления  $\alpha$ , можно изменять время включённого состояния тиристора и, следовательно, среднее значение выпрямленного напряжения.

На практике используются двухполупериодные и многофазные управляемые выпрямители на тиристорах, собранные по нулевым или мостовым схемам. Однако и с помощью одного тиристора возможно регулирование напряжения, создаваемого неуправляемым двухполупериодным выпрямителем (рис. 6.10). В этой схеме на нагрузку, соединённую последовательно с тиристором, подаётся пульсирующее

напряжение от двухполупериодного выпрямителя. Тиристор открывается импульсом управляющего напряжения от СИФУ, а закрывается при снижении тока в нагрузке до значения ниже тока удержания. Однако, в этой схеме не при всех параметрах цепи удаётся обеспечить восстановление запирающих свойств тиристора на маленьком отрезке времени между выключением тиристора и очередным появлением на нём положительного напряжения. Тогда он оказывается постоянно открытым и регулирование напряжения становится невозможным.

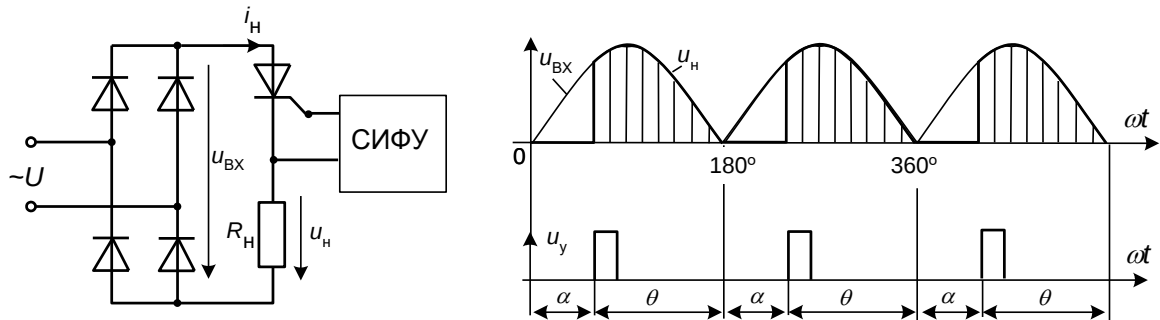


Рис. 6.10

Для регулирования переменного напряжения последовательно с нагрузкой соединяются два встречно-параллельно включённых тиристора, либо один тиристор включается в диагональ выпрямительного моста на диодах, а нагрузка – со стороны переменного напряжения (рис. 6.11). В этом случае через сопротивление нагрузки протекает знакопеременный ток и напряжение на нагрузке пропорционально току. Действующие значения тока и напряжения на нагрузке зависят от угла управления  $\alpha$ .

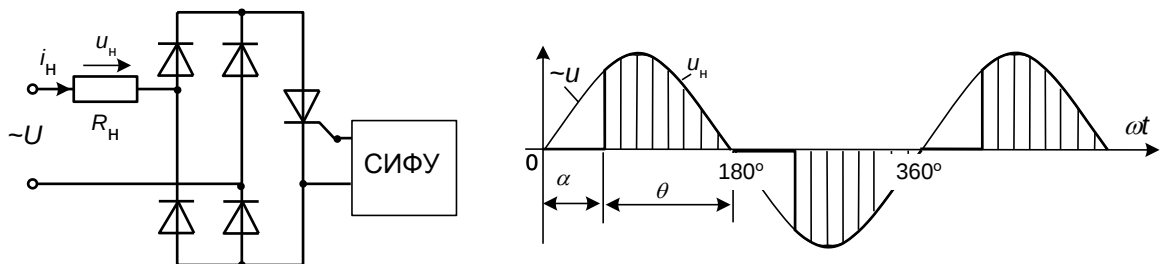


Рис. 6.11

Важной характеристикой тиристорных регуляторов является зависимость выходного напряжения от угла управления, т.е. регулировочная характеристика.

В данной работе используется миниблок «Фазовое управление тиристора», в котором смонтирован тиристор вместе с системой импульсно-фазового управления (СИФУ). Миниблок имеет три вывода: анод, катод и управляющий электрод. Последний нужен лишь для наблюдения управляющих импульсов с помощью осциллографа.

## **Экспериментальная часть**

### **Задание**

С помощью осциллографа и мультиметра снять экспериментально регулировочные характеристики однополупериодного и двухполупериодного управляемых выпрямителей, пронаблюдать на осциллографе за изменением напряжения на выходе тиристорного регулятора переменного напряжения.

### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь однополупериодного выпрямителя на тиристоре согласно монтажной схеме (рис. 6.12) и установите максимальную амплитуду трёхфазного источника, от которого питается цепь. В качестве нагрузки в цепь включена лампочка накаливания и токоограничивающее сопротивление 47...100 Ом. Для наблюдения кривой выпрямленного напряжения и измерения угла задержки включения тиристора  $\alpha$  параллельно нагрузке подключён осциллограф, а для измерения среднего значения выпрямленного напряжения – вольтметр.

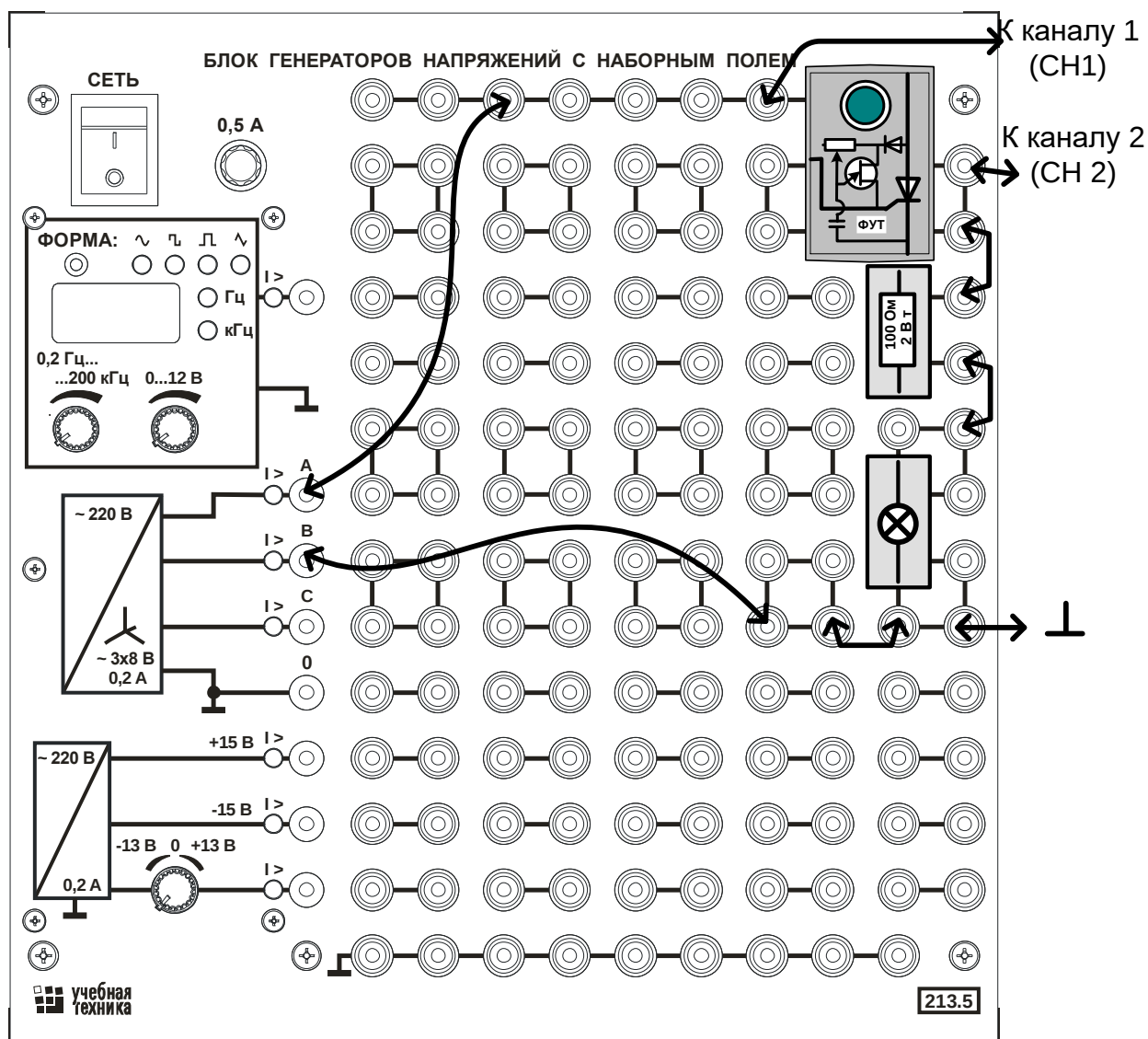


Рис. 6.12. Монтажная схема.

- Включите питание, мультиметр, включите и настройте USB осциллограф. Для этого запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows, подключите кабели к входам осциллографа (CH1 и CH2) и подсоедините их к испытываемой цепи. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку.
- В окне «Easy Control» нажмите кнопку AUTO. Осциллограф автоматически установит масштабы напряжения и времени.
- Изменяя угол задержки включения тиристора регулятором на миниблоке, убедитесь, что изменяется форма выпрямленного

напряжения и его среднее значение (по мультиметру и свечению лампочки).

- Устанавливая различные углы задержки  $\alpha$ , указанные в табл. 6.2, снимите регулировочную характеристику однополупериодного выпрямителя  $U_{\text{ср}}(\alpha)$ . Постройте график этой характеристики на рис. 6.15.

**Примечание:** Для установки угла  $\alpha$  переведите градусы в мс.  $180^\circ$  соответствует полупериоду, т.е. 1 мс, а 18 соответствует 0,1 мс. Для измерения задержки включения тиристора в мс можно воспользоваться курсором осциллографа (см. Руководство пользователя осциллографа DSO-2090)

- Измените схему как показано на рис. 6.13 (двухполупериодный выпрямитель с тиристорным регулятором).
- Убедитесь, что цепь исправна, регулируя угол задержки включения тиристора и наблюдая за изменением формы и величины выходного напряжения. Снимите зависимость  $U_{\text{ср}}(\alpha)$ .  $U_{\text{ср}}$  можно измерять как мультиметром в режиме измерения постоянного напряжения, так и осциллографом (пункты меню Util→Measurement→Voltage→Mean). Результаты представьте также в табл. 6.2 и на рис. 6.15



Соберите теперь схему регулятора переменного напряжения (рис. 6.13) и снимите зависимость  $U_{\sim}(\alpha)$ . Следует иметь в виду, что мультиметр не предназначен для измерения действующего значения несинусоидального напряжения. Поэтому измерения лучше произвести осциллографом. Для этого выберите пункты меню пункты меню *Util*→*Measurement*→*Voltage*→*RMS* (см. Руководство пользователя осциллографа)

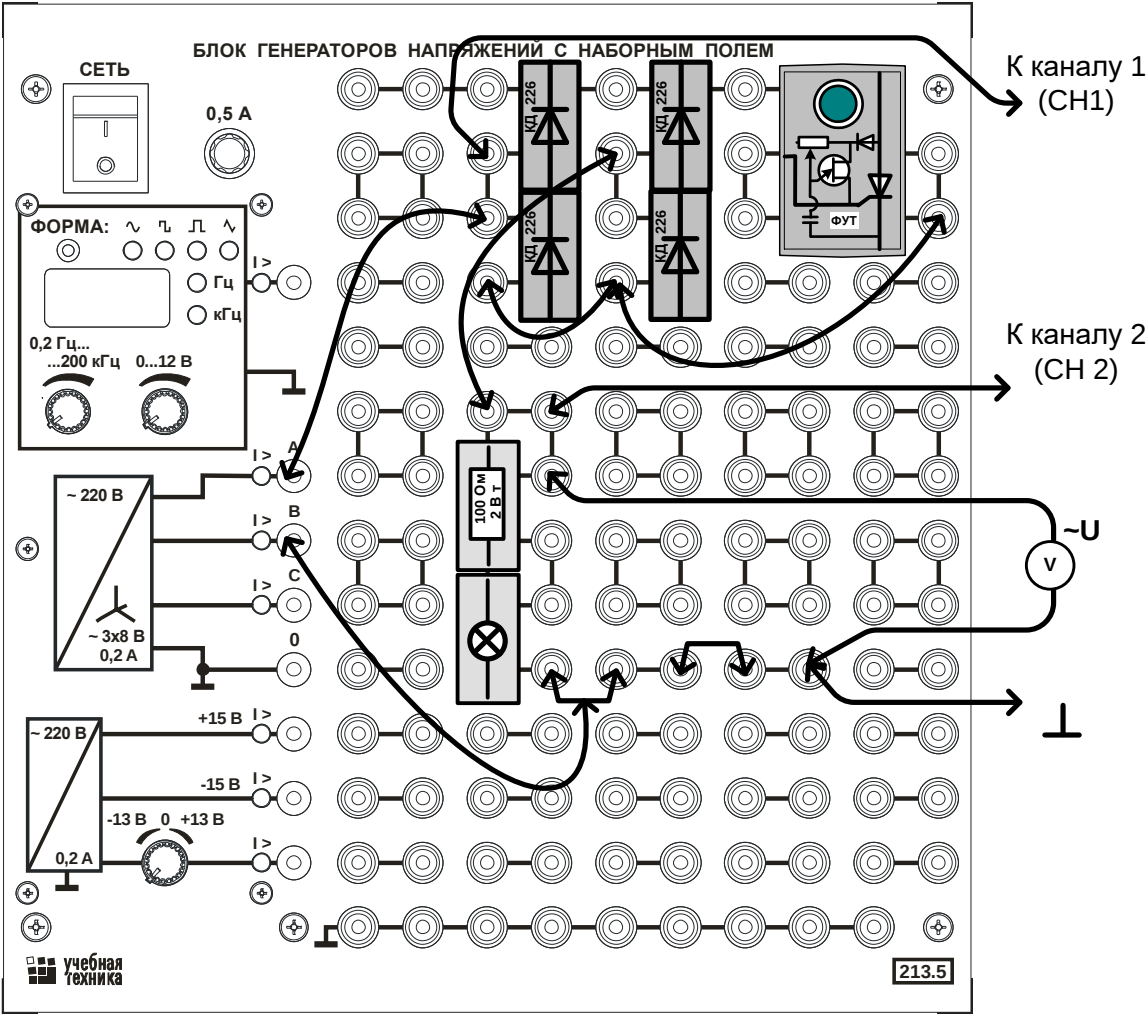


Рис. 6.14. Монтажная схема.

Таблица 6.2

| $\alpha$ , град. | $U_{\text{ср}}$ , В     |                         | $U_{\sim}$<br>Регулятор переменного напряжения |
|------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
|                  | Однополупериодная схема | Двухполупериодная схема |                                                |
| 18               |                         |                         |                                                |
| 36               |                         |                         |                                                |
| 72               |                         |                         |                                                |
| 108              |                         |                         |                                                |
| 144              |                         |                         |                                                |
| 172              |                         |                         |                                                |

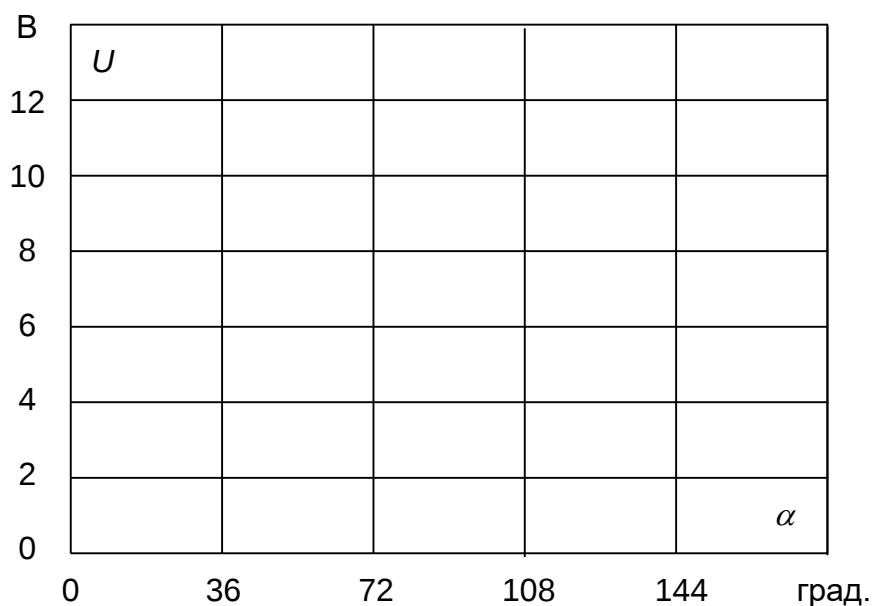


Рис. 6.15

### ***Вопросы к лабораторной работе № 5***

1. Выпрямители, назначение, устройство и принцип работы.
2. Изобразить схему и пояснить работу однополупериодного выпрямителя.
3. Изобразить схему и пояснить работу двухполупериодного выпрямителя.
4. Изобразить схему и пояснить работу мостового выпрямителя.
5. Изобразить схему и пояснить работу трёхфазного выпрямителя и основные отличия от однофазного.
6. Классификация сглаживающих фильтров. Коэффициент пульсаций. Основы расчётов фильтров.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

#### Цель работы

Исследование двухкаскадного транзисторного усилителя.  
Исследование стабилизаторов постоянного напряжения.  
Исследование RS-триггера, мультивибратора и одновибратора.  
Исследование цепей с операционными усилителями.

#### 1. Исследование двухкаскадного транзисторного усилителя

##### *Общие сведения*

Любой усилитель содержит источник питания (как правило, источник постоянного напряжения), управляемый нелинейный элемент, обладающий семейством вольтамперных характеристик (транзистор, электронная лампа, операционный усилитель) и нагрузочный элемент (резистор, трансформатор и др.)

Усиление электрических сигналов осуществляется за счёт 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.

Основными параметрами усилителя являются:

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

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; \quad K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}; \quad K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

- Амплитудная характеристика  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ , представляющая собой зависимость выходного напряжения от входного при постоянной частоте.
- Амплитудно-частотная характеристика  $K(f)$ , представляющая собой зависимость коэффициента усиления (обычно по напряжению) от частоты входного сигнала при неизменной амплитуде синусоидального входного сигнала.

Для увеличения коэффициента усиления и улучшения характеристик усилителя используют многокаскадные усилители с трансформаторной, гальванической, или активно-ёмкостной связью между каскадами. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 K_2 K_3 \dots$$

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. Обратная связь – 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 – то 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. Поэтому она часто используется в качестве выходного каскада. Схема с общей базой имеет большой коэффициент по напряжению, тогда как коэффициент усиления по току близок к единице.

Вид амплитудной характеристики транзисторного усилителя изображён на рис. 7.1а. 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. 7.1б. 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 уменьшении частоты. На верхних частотах коэффициент усиления уменьшается вследствие шунтирующего действия паразитных ёмкостей транзистора и монтажа. На рис. 7.1б показаны:

$f_H$  – нижняя граничная частота, ниже которой напряжение на выходе снижается более чем в  $\sqrt{2}$  раз;

$f_B$  – верхняя граничная частота, выше которой напряжение также снижается более чем в  $\sqrt{2}$  раз;

$\Delta f$  – рабочий диапазон частот или полоса пропускания усилителя.

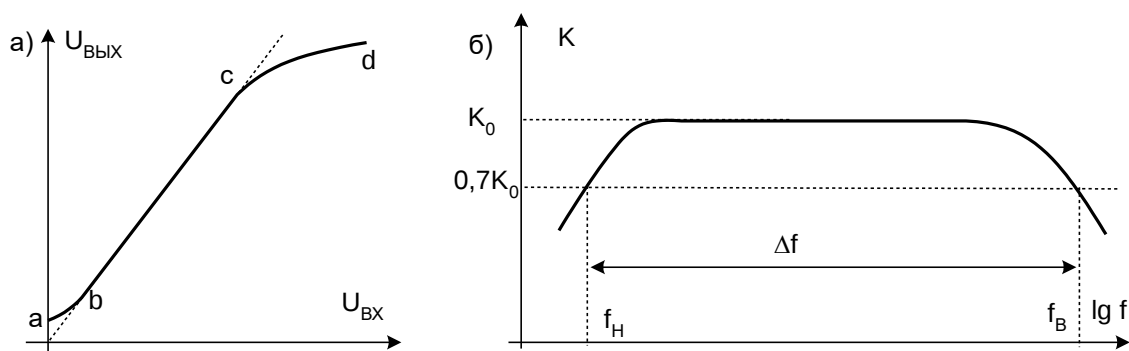


Рис. 7.1

Принципиальная схема исследуемой установки изображена на рис. 7.2. Двухкаскадный усилитель состоит из миниблока «Усилительный каскад с общим эмиттером» и эмиттерного повторителя, собранного на транзисторе. Разделительный конденсатор  $C_{\text{разд1}}$ , встроенный в миниблок на входе усилителя, позволяет избежать влияния сопротивления источника сигналов на положение точки покоя транзистора, которая задаётся делителем  $R1, R3$ . Сопротивление на входе  $R2$  служит для ограничения входного тока и вместе с шунтирующим конденсатором  $C2$  – для подавления высокочастотных самовозбуждений. Резистор  $R5$  образует отрицательную обратную связь для уменьшения коэффициента усиления и повышения температурной стабильности усилителя. Конденсатор  $C_{\text{ос}}$ , устанавливаемый снаружи миниблока, 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  $C_{\text{разд2}}$  на выходе второго каскада усилителя служит для выделения переменного сигнала на нагрузке  $R_H$ .

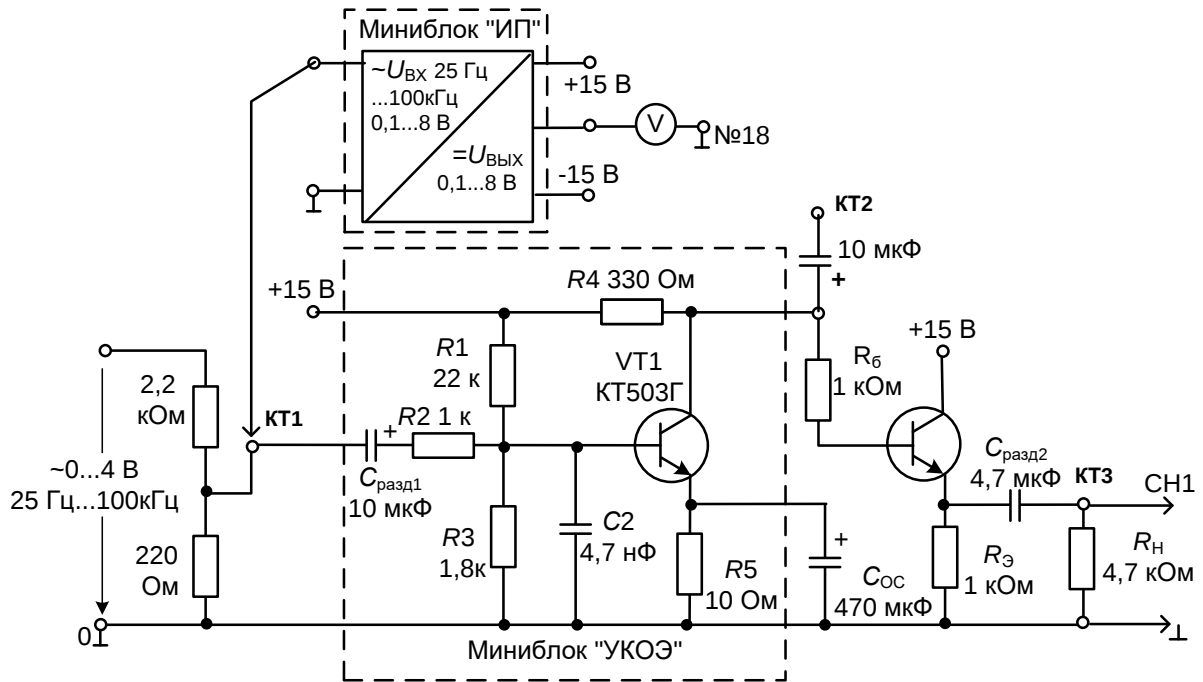


Рис. 7.2. Принципиальная схема двухкаскадного усилителя.

Для наблюдения формы входного и выходного сигналов в схему включён USB осциллограф, по которому можно заметить искажения выходного сигнала.

На входе усилителя включён делитель напряжения на двух резисторах 220 Ом и 2,2 кОм для более плавного регулирования выходного напряжения генератора.

Для измерения входного и выходного напряжений служит миниблок «Измерительный преобразователь» («ИП»). Постоянное напряжение на его выходе равно действующему значению синусоидального напряжения на входе. **Непосредственное измерение синусоидального напряжения мультиметром в данной работе невозможно, так как его частотный диапазон ограничен от 40 до 400 Гц.** К этому миниблоку необходимо подвести питание + и – 15 В, а также подсоединить к нему общую точку источника 0. В ходе работы входной зажим измерительного преобразователя подключается в контрольные точки КТ1, КТ2, КТ3, а вольтметр постоянного напряжения всегда остаётся подключённым к выходным зажимам измерительного преобразователя, необходимо только переключать пределы измерения мультиметра в соответствии с уровнем измеряемого напряжения. Эти измерения можно проделать и с помощью USB осциллографа, без использования миниблока «Измерительный преобразователь» (см. Руководство пользователя осциллографа DSO-2090).

## Экспериментальная часть

### Задание

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

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 7.2) и монтажной схеме (рис. 7.3). **При сборке схемы не перепутайте полярность электролитических конденсаторов!** Переведите переключатель рода сигналов генератора напряжений в положение «~» (синусоида) и установите частоту любую частоту от 1 до 10 кГц (переключатель диапазонов – в положении « $\times 10$ », в окошке счётчика – любое число от 100 до 999).
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу а, **затем**, к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите генератор напряжений.
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows. В окне «Easy Control» нажмите кнопку AUTO. Осциллограф автоматически установит масштабы напряжения и времени.
- 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.
- Оставьте регулятор «Амплитуда» в положении, соответствующем максимальному уровню неискажённого выходного сигнала, измерьте (миниблоком «ИП» с мультиметром или USBосциллографом) действующие значения напряжения в контрольных точках КТ1, КТ2 и КТ3 и запишите их в табл. 7.1 в столбец «Без ОС» (без обратной связи).
- Выньте из гнезд наборного поля конденсатор  $C_{OC}$  470 мкФ и снова измерьте и запишите в столбец «С ОС» (с обратной связью) напряжения в контрольных точках.

Таблица 7.1

| Режим работы     |     | Без ОС | С ОС |
|------------------|-----|--------|------|
| $U, В$           | КТ1 |        |      |
|                  | КТ2 |        |      |
|                  | КТ3 |        |      |
| $K_1$            |     |        |      |
| $K_2$            |     |        |      |
| $K_1 \times K_2$ |     |        |      |
| $K$              |     |        |      |

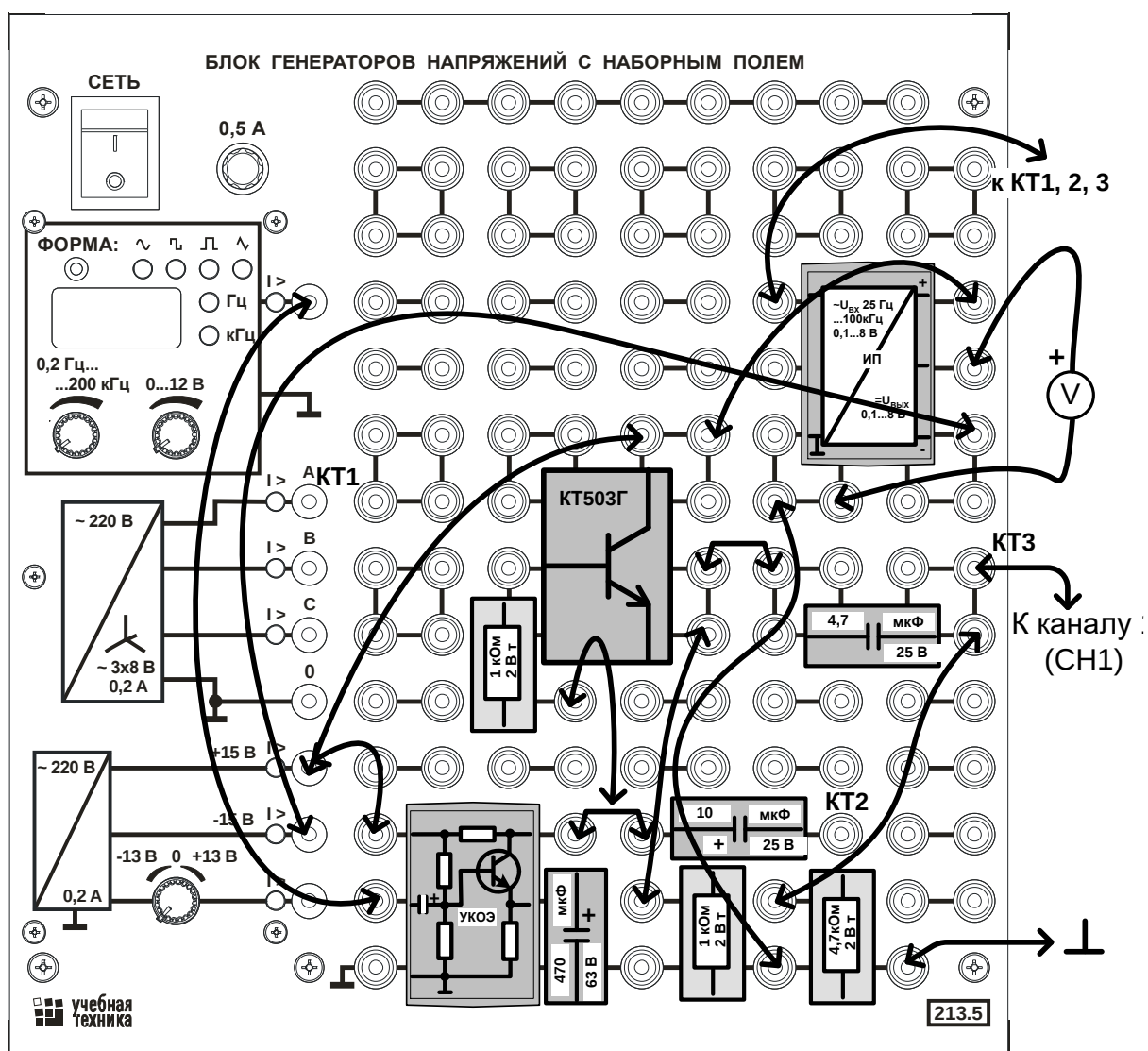


Рис. 7.3. Монтажная схема.

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

- Для снятия амплитудной характеристики усилителя изменяйте регулятором «Амплитуда» напряжение от 0 до значения, при котором выходное напряжение становится явно искажённым, и записывайте в табл.7.2. напряжения на входе (КТ1) и на выходе (КТ3) с обратной связью и без неё.
- На рис.7.4 постройте графики амплитудной характеристики с ОС и без ОС.

Таблица 7.2

|                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{ВХ}, В$         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{ВЫХ}, В$ Без ОС |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{ВЫХ}, В$ С ОС   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

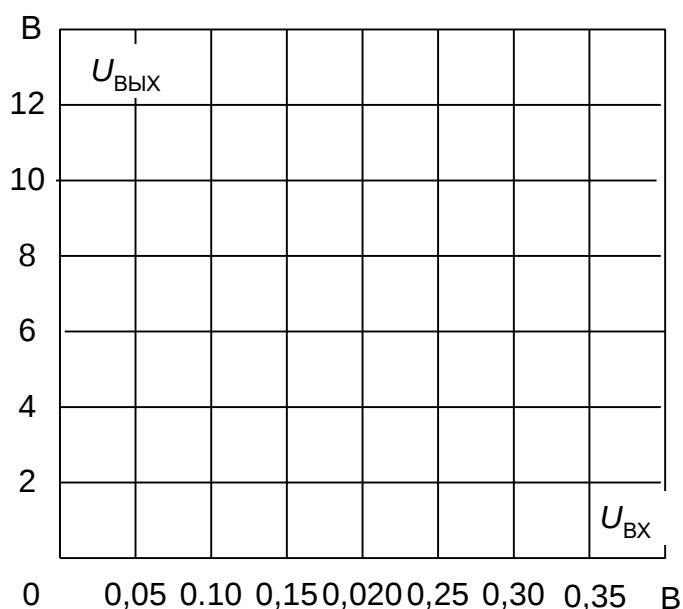


Рис. 7.4. График амплитудной характеристики усилителя.

- Для снятия частотной характеристики установите входной сигнал, соответствующий максимальному уровню неискажённого выходного сигнала в цепи без обратной связи (т.е. с конденсатором  $C_{ОС}$ ). Запишите это значение в левый столбец табл.7.2. 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  $\times 100$ , так как при этом множителе диапазон регулирования амплитуды выходного сигнала может измениться.

- Теперь переведите переключатель диапазонов частот в положение  $\times 1$  и вращайте ручку счётчика влево до упора. **Не прикладывайте к ней больших усилий во избежание поломки!** Запишите в табл. 7.2.1 первое значение частоты (обычно 20..30 Гц), а также входного и выходного напряжений без обратной связи и с ней.
- Вращая ручку счётчика вправо, последовательно устанавливайте значения частоты от 0,05 до 1 кГц, указанные в табл. 7.2 и записывайте выходные напряжения с обратной связью и без неё. После достижения частоты 1 кГц переключите множитель в положение  $\times 10$  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  $\times 100$ , установите в окошке число 200, **подрегулируйте уровень входного сигнала** и продолжайте опыт до 100 кГц.
- Вычислите коэффициенты усиления и на рис. 7.5 постройте графики частотных характеристик с обратной связью и без неё.

Таблица 7.2.1

| $U_{ВХ}$<br>.....В | $f$ , кГц | $U_{ВЫХ}$ , В Без<br>ОС | $U_{ВЫХ}$ , В С ОС | К Без ОС | К С ОС |
|--------------------|-----------|-------------------------|--------------------|----------|--------|
|                    |           |                         |                    |          |        |
|                    | 0,05      |                         |                    |          |        |
|                    | 0,10      |                         |                    |          |        |
|                    | 0,20      |                         |                    |          |        |
|                    | 0,50      |                         |                    |          |        |
|                    | 1,0       |                         |                    |          |        |
|                    | 2,0       |                         |                    |          |        |
|                    | 5,0       |                         |                    |          |        |
|                    | 10        |                         |                    |          |        |
|                    | 20        |                         |                    |          |        |
|                    | 50        |                         |                    |          |        |
|                    | 100       |                         |                    |          |        |

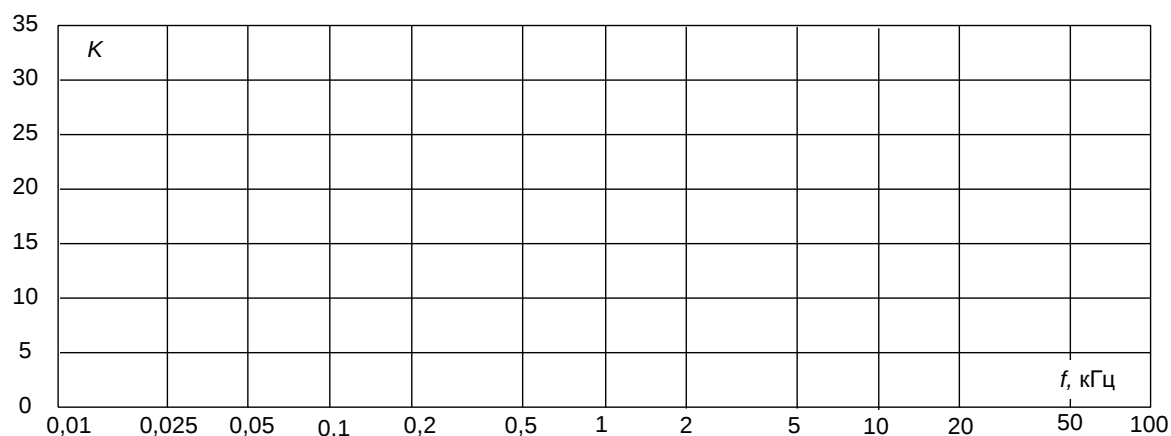


Рис. 7.5. График частотных характеристик усилителя.

## 2. Исследование стабилизаторов постоянного напряжения

### *Общие сведения*

Стабилизаторы напряжения предназначены для стабилизации напряжения на нагрузке при изменениях напряжения источника питания и (или) тока нагрузки.

По принципу действия различают параметрические и компенсационные стабилизаторы напряжения.

Простейший параметрический стабилизатор напряжения состоит из балластного резистора  $R_b$  и стабилитрона Д (рис. 7.6а). Вольтамперная характеристика стабилитрона имеет почти горизонтальный участок (рис. 7.6б), на котором напряжение очень мало изменяется при изменении тока от минимально допустимого тока стабилизации  $I_{ст\ min.}$  до максимально допустимого  $I_{ст\ max.}$  При широком изменении входного напряжения или тока нагрузки изменяется ток в стабилитроне, тогда как напряжение на стабилитроне, а стало быть, и на нагрузке изменяется мало.

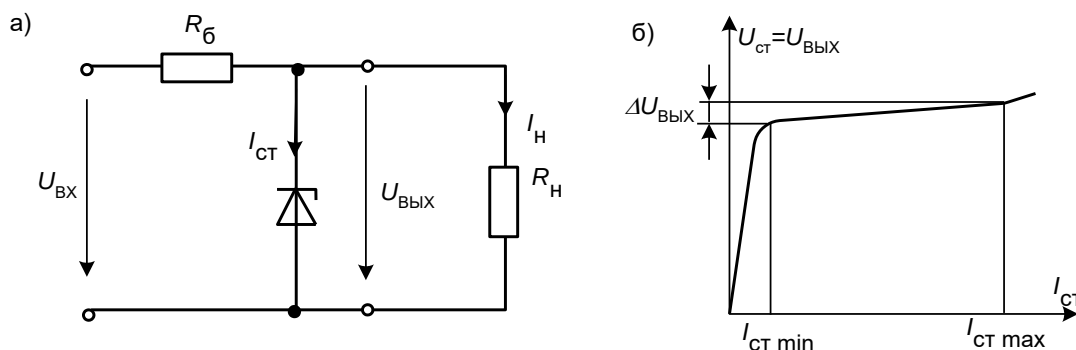


Рис. 7.6

В компенсационных стабилизаторах используется отрицательная обратная связь по напряжению. Он представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования выходного напряжения и состоит из регулирующего элемента, усилителя, сравнивающего устройства и источника опорного напряжения. В данной работе компенсационный стабилизатор выполнен в виде миниблока, упрощённая схема которого представлена на рис.7.7.

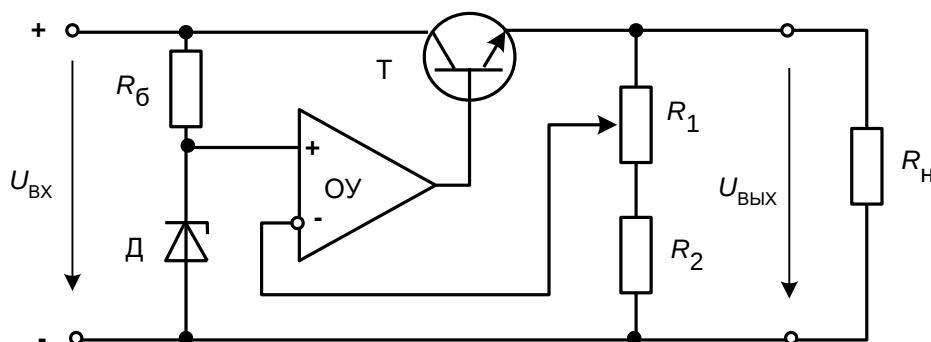


Рис. 7.7. Принципиальная схема компенсационного стабилизатора.

Регулирующим элементом является транзистор Т, а в качестве опорного напряжения используется выходное напряжение параметрического стабилизатора ( $R_6$  и Д). Сравнение опорного напряжения с частью выходного напряжения происходит в операционном усилителе ОУ. Как только эта часть выходного напряжения, по какой либо причине превысит опорное напряжение, операционный усилитель вырабатывает сигнал, закрывающий транзистор. Наоборот, когда напряжение на выходе уменьшается, операционный усилитель открывает транзистор. Потенциометр  $R_1$  позволяет изменять ту часть выходного напряжения, которая сравнивается с опорным напряжением, т.е. задавать величину выходного напряжения стабилизатора.

В реальных стабилизаторах при уменьшении входного напряжения  $U_{ВХ}$  выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  также уменьшается, хотя и в меньшей степени. Однако, ниже некоторого минимального значения входного

напряжения стабилизация прекращается и выходное напряжение уменьшается пропорционально входному. Аналогично, при увеличении тока нагрузки  $I_H$  выходное напряжение стабилизатора сначала незначительно уменьшается, а после превышения некоторого максимально допустимого тока резко падает. Характер изменения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от  $U_{\text{ВХ}}$  и от  $I_H$  показан на рис. 7.8а и б.

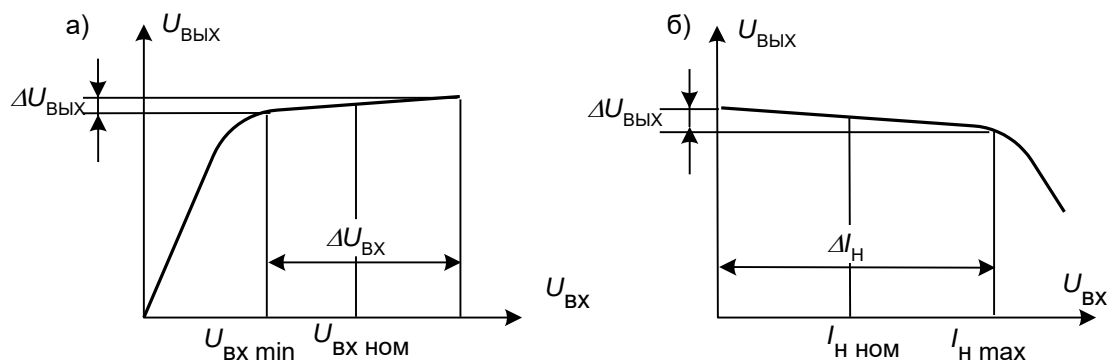


Рис. 7.8

Качество стабилизации стабилизатора характеризуется следующими коэффициентами:

- Коэффициент стабилизации по входному напряжению, определяемый как отношение относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения при  $I_H = \text{const}$ :

$$K_{\text{н} \Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} : \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{\partial U_{\text{вх}}}{\partial U_{\text{вых}}}.$$

- Коэффициент стабилизации по току, определяемый как отношение относительного изменения тока нагрузки к относительному изменению выходного напряжения при  $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$ :

$$K_{\text{н} \Delta I} = \frac{\Delta I_H}{I_H} : \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{\partial I_H}{\partial U_{\text{вых}}}.$$

### Экспериментальная часть

#### Задание

Снять экспериментально характеристики параметрического и компенсационного стабилизаторов постоянного напряжения. Определить параметры стабилизаторов.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь параметрического стабилизатора согласно монтажной схеме (рис. 7.9) сначала не включая в неё сопротивление нагрузки (резисторы 100 Ом и 33 Ом).
- Включите генератор напряжений и, изменяя напряжение на входе стабилизатора от 0 до максимального значения 13...14 В, снимите зависимость выходного напряжения от входного на холостом ходу. Результаты записывайте в табл. 7.3.

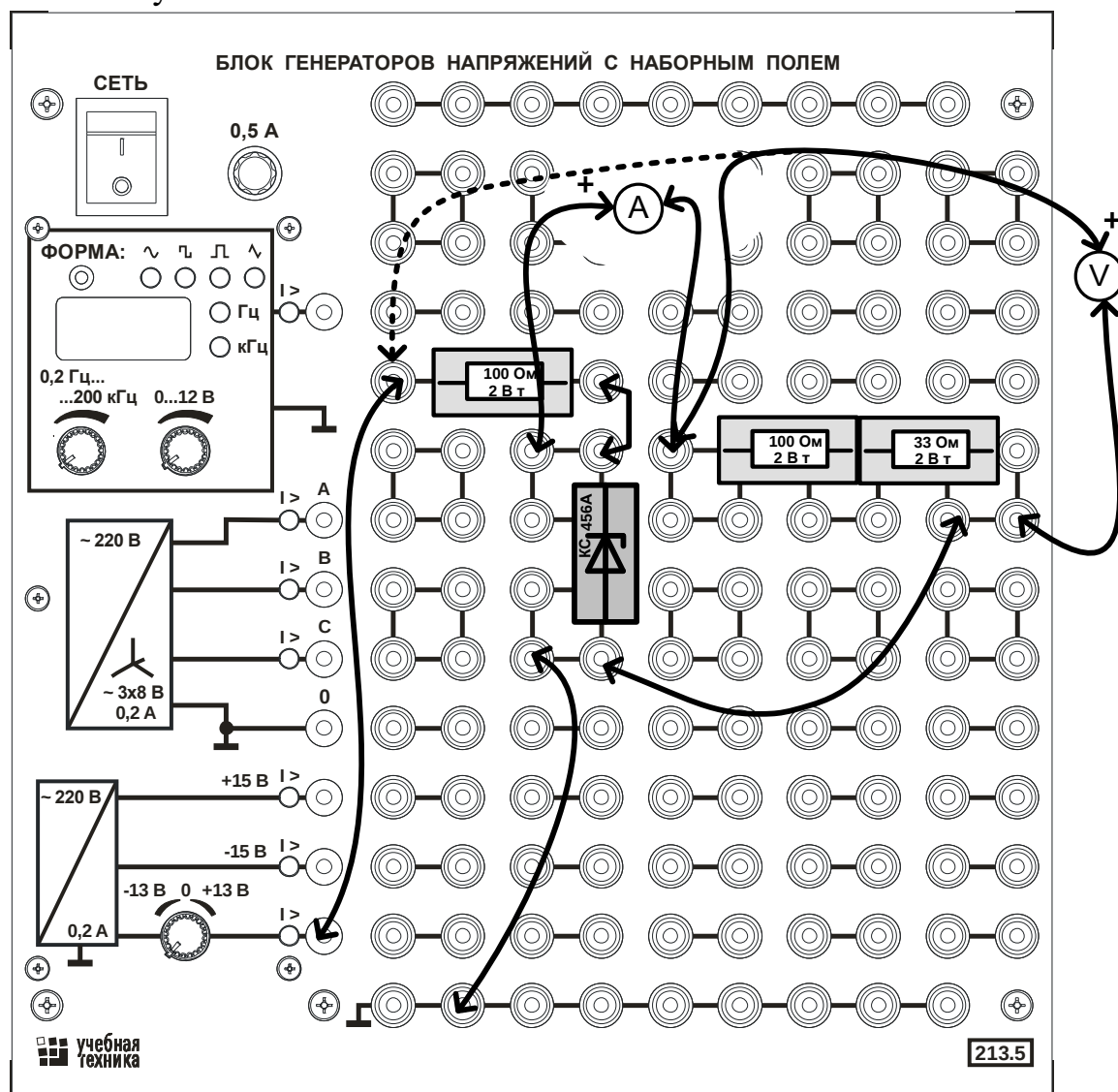


Рис. 7.9. Монтажная схема.

Таблица 7.3

| $U_{ВХ}, В$  | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |  |
|--------------|---|---|---|---|---|----|----|--|
| $U_{ВЫХ}, В$ |   |   |   |   |   |    |    |  |

- Установите максимальное напряжение на входе и, включая различные сопротивление нагрузки, согласно табл. 7.4, снимите зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки.

Таблица 7.4

| $R_H$ Ом      | $\infty$    | 150 | 100 | 47+22 | 47+10 | 47 | 33+10 | 33 |
|---------------|-------------|-----|-----|-------|-------|----|-------|----|
| $I_H$ , мА    | 0<br>(х.х.) |     |     |       |       |    |       |    |
| $U_{ВЫХ}$ , В |             |     |     |       |       |    |       |    |

- На рис. 7.10а и б постройте графики  $U_{ВЫХ}(U_{ВХ})$  и  $U_{ВЫХ}(I_H)$ .

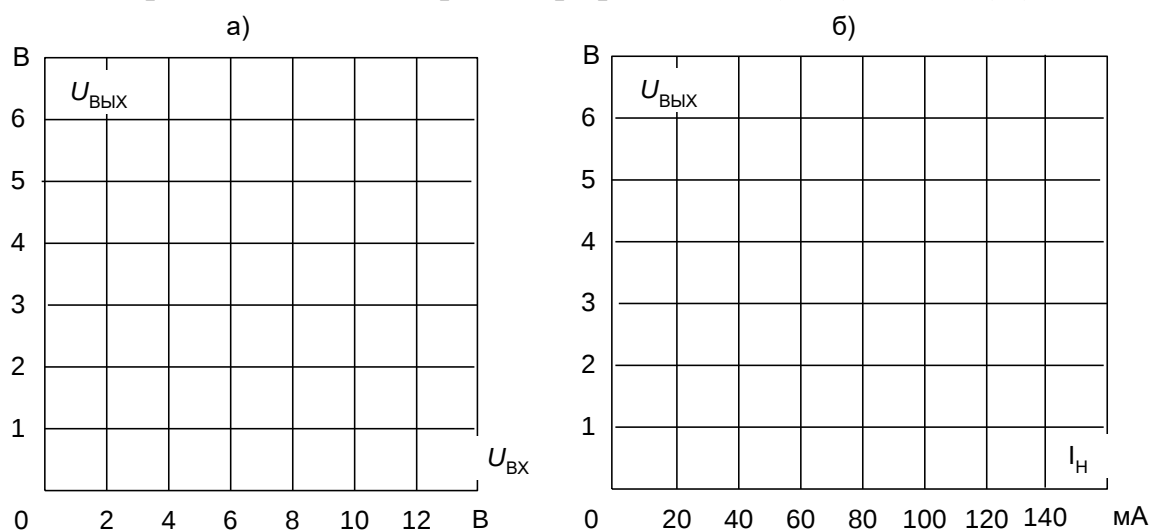


Рис. 7.10

- На графиках укажите минимально допустимое входное напряжение, максимально допустимый ток нагрузки и определите коэффициенты стабилизации по напряжению и по току, приняв  $U_{ВХ\text{ ном}} = 8\text{ В}$  и  $I_{H\text{ ном}} = 80\text{ мА}$ .

$$K_{\text{н} \rightarrow U} = \frac{\Delta U_{\text{âõ}}}{U_{\text{âõ}} \text{ м}} : \frac{\Delta U_{\text{âõ}}}{U_{\text{âõ}} \text{ м}} = \frac{\delta U_{\text{âõ}}}{\delta U_{\text{âõ}}} = \dots$$

$$K_{\text{н} \rightarrow I} = \frac{\Delta I_1}{I_1 \text{ м}} : \frac{\Delta U_{\text{âõ}}}{U_{\text{âõ}} \text{ м}} = \frac{\delta I_1}{\delta U_{\text{âõ}}} \dots$$

- Соберите цепь для исследования компенсационного стабилизатора (рис. 7.11) сначала не подключая нагрузку.

- Установите на входе стабилизатора максимальное напряжение регулятором источника, а на выходе - напряжение 4...6 В с помощью потенциометра на миниблоке.
- Изменяя напряжение на входе стабилизатора от 0 до максимального значения 13...14 В, снимите зависимость выходного напряжения от входного на холостом ходу. Результаты записывайте в табл. 7.5.

Таблица 7.5

|              |   |   |   |   |   |    |    |  |
|--------------|---|---|---|---|---|----|----|--|
| $U_{ВХ}, В$  | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |  |
| $U_{ВЫХ}, В$ |   |   |   |   |   |    |    |  |

- Установите максимальное напряжение на входе и, включая различные сопротивление нагрузки, согласно табл. 7.6, снимите зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки.

Таблица 7.6

|              |             |     |     |       |       |    |       |    |
|--------------|-------------|-----|-----|-------|-------|----|-------|----|
| $R_H Ом$     | $\infty$    | 150 | 100 | 47+22 | 47+10 | 47 | 33+10 | 33 |
| $I_H, мА$    | 0<br>(х.х.) |     |     |       |       |    |       |    |
| $U_{ВЫХ}, В$ |             |     |     |       |       |    |       |    |

- На тех же рис.7.10а и б постройте графики  $U_{ВЫХ}(U_{ВХ})$  и  $U_{ВЫХ}(I_H)$  для компенсационного стабилизатора.
- На графиках укажите минимально допустимое входное напряжение, максимально допустимый ток нагрузки и определите коэффициенты стабилизации по напряжению и по току, приняв  $U_{ВХ ном} = 8 В$  и  $I_{H ном} = 80 мА$ .

$$K_{\hat{U}} = \frac{\Delta U_{\hat{U}}}{U_{\hat{U}}} : \frac{\Delta U_{\hat{U}}}{U_{\hat{U}}} = \frac{\delta U_{\hat{U}}}{\delta U_{\hat{U}}} = \dots\dots\dots$$

$$K_{\hat{I}} = \frac{\Delta I_{\hat{I}}}{I_{\hat{I}}} : \frac{\Delta U_{\hat{U}}}{U_{\hat{U}}} = \frac{\delta I_{\hat{I}}}{\delta U_{\hat{U}}} \dots\dots\dots$$

- Сравните эти коэффициенты с коэффициентами параметрического стабилизатора.

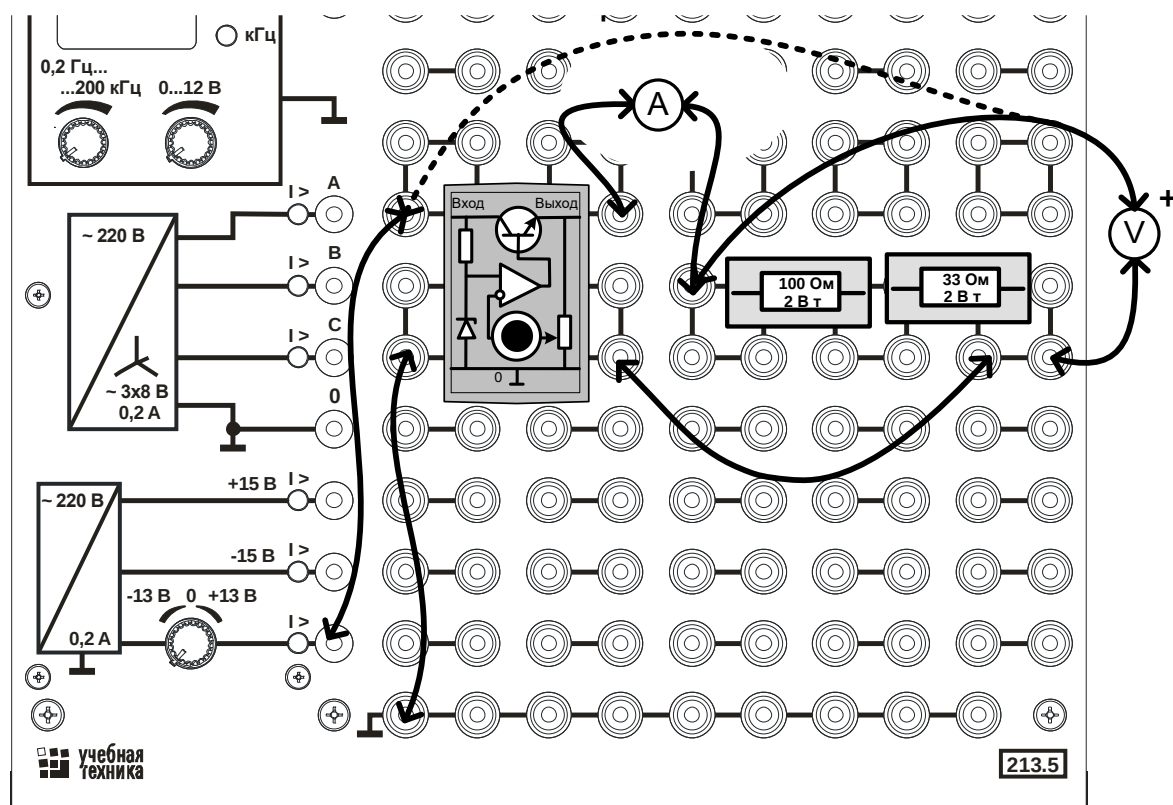


Рис. 7.11. Монтажная схема.

### 3. Исследование RS-триггера, мультивибратора, и одновибратора

#### Общие сведения

Триггер представляет собой электронную схему, имеющую два устойчивых состояния. Каждому из этих состояний ставится в соответствие логическое значение  $Q=1$ , если на выходе высокое напряжение и  $Q=0$ , если на выходе низкое напряжение. Переход из одного состояния в другое и обратно совершается под действием специальных запускающих импульсов. Триггеры относятся к логическим элементам, которые могут играть роль элементарного автомата, реле, порогового устройства, запоминающего устройства. На базе триггеров могут быть построены генераторы импульсов, реле времени и другие устройства. Преимущественное распространение получили полупроводниковые триггеры типов *RS*, *JK*, *T*, и *D*.

Практически все триггеры строятся на базе  $RS$ -триггера, имеющего два входа:  $S$  (от английского термина *set* – установка) и  $R$  (*reset* – сброс) и два выхода:  $Q$  – прямой выход и  $\bar{Q}$  – инверсный выход. Схема простейшего  $RS$ -триггера показана на рис. 7.12. Он состоит из двух транзисторов (усилителей), охваченных положительной обратной связью по напряжению. При включении питания один из транзисторов (допустим  $VT1$ ) оказывается закрытым, а второй ( $VT2$ ) – открытым. Тогда выходное напряжение  $U_{\text{вых1}}$  подаётся на базу транзистора  $VT2$ , удерживая его в открытом состоянии. Значения логических величин при этом  $Q = 1$  (есть

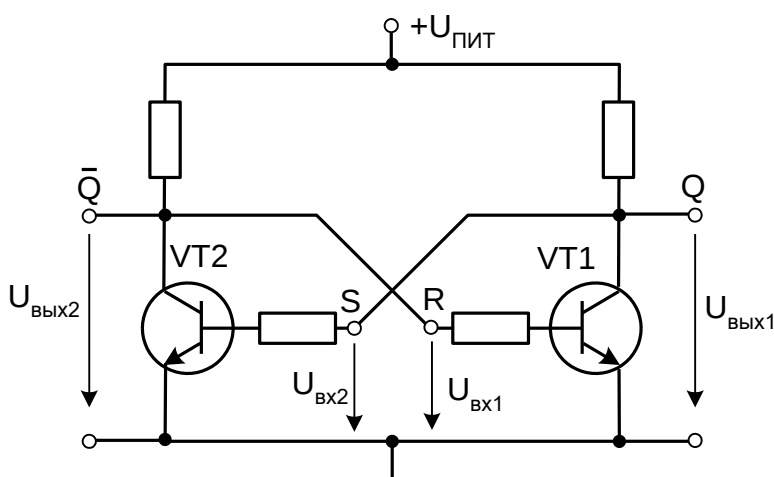


Рис. 7.12

напряжение на выходе 1) и  $\bar{Q} = 0$  (нет напряжения на выходе 2). Для переключения триггера в другое устойчивое состояние необходимо подать положительный запускающий импульс на базу закрытого транзистора  $VT1$  ( $U_{\text{вх1}}$ ), тогда он открывается, напряжение  $U_{\text{вых1}}$  становится близким к нулю, оно подаётся на

базу  $VT2$  и он закрывается. Появляется высокое напряжение  $U_{\text{вых2}}$ , которое, в свою очередь, подаётся на базу транзистора  $VT1$ , удерживая его в открытом состоянии и после исчезновения запускающего импульса. Логически выходные величины принимают значения:  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$ .

В рассмотренной простейшей схеме одновременная подача запускающих импульсов на оба входа может привести как к переключению триггера, так и к сохранению прежнего состояния. Чтобы избежать такой неопределённости и получить некоторые новые свойства, как, например, установка и сброс по одному и тому же входу приходится усложнять схему запуска ( $JK$ ,  $T$  и  $D$ -триггеры).

Если резистивные обратные связи в  $RS$ -триггере заменить резистивно-ёмкостными, то можно получить триггер, автоматически переключающийся из одного состояния в другое с определённой частотой. Он называется мультивибратором. Если только одну резистивную обратную связь заменить ёмкостной, то получится триггер, который после подачи запускающего импульса переключится во второе состояние только на ограниченное время. Затем он автоматически возвращается в исходное состояние (одновибратор или реле времени).

## Экспериментальная часть

### Задание

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

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь RS-триггера, принципиальная схема которого показана на рис. 7.13, а монтажная – на рис. 7.14. В схему включены светодиод для индикации открытого состояния транзистора VT1 и сигнальная лампа для индикации открытого состояния VT2.

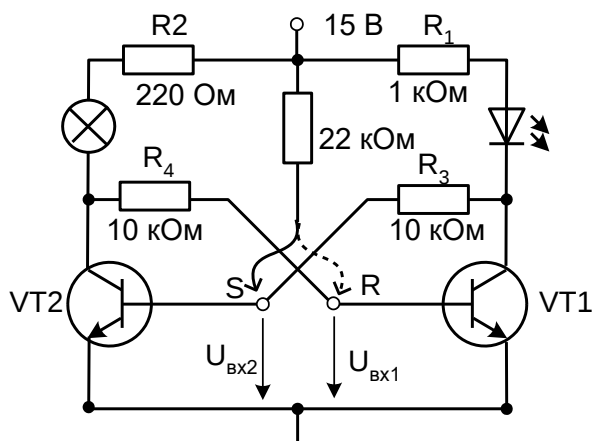


Рис. 7.13. Принципиальная схема RS-триггера

- Включите генератор напряжений и по свечению лампы или светодиода убедитесь, что один транзистор открылся, а другой остался закрытым.
- 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.
- Убедитесь, что состояние триггера изменяется только после подачи импульса напряжения на другой вход, т.е. на базу закрытого транзистора.
- Соберите схему мультивибратора (рис. 7.15 и 7.16).
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу а, **затем**, к ноутбуку. Включите ноутбук.

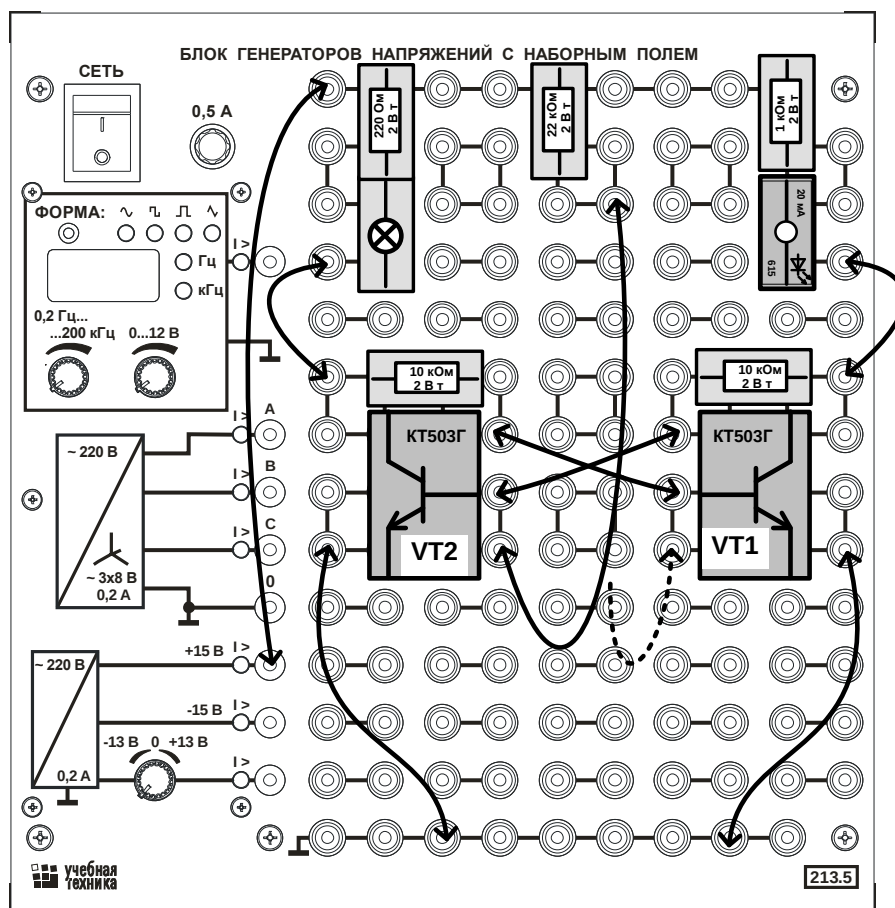


Рис.7.14. Монтажная схема.

- Включите генератор напряжений.
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows. В окне «Easy Control» нажмите кнопку AUTO. Осциллограф автоматически установит масштабы напряжения и времени.
- Определите по осциллографу и запишите в табл. 7.7:
  - период колебаний  $T = \dots\dots\dots \text{мс};$
  - время наличия сигнала на первом выходе ( $U_{\text{вых1}}$ )  $T_{11} = \dots\dots\dots \text{мс};$
  - время отсутствия сигнала на первом выходе  $T_{01} = \dots\dots\dots \text{мс};$
  - время наличия сигнала на втором выходе ( $U_{\text{вых2}}$ )  $T_{12} = \dots\dots\dots \text{мс};$
  - время отсутствия сигнала на втором выходе  $T_{02} = \dots\dots\dots \text{мс};$

- Замените конденсатор  $C2 = 0,47$  мкФ конденсатором 1 мкФ и запишите в таблицу 7.7 новые значения тех же отрезков времени. Сделайте выводы.

Таблица 7.7

|                               | $T$ , мс | $T_{11}$ , мс | $T_{01}$ , мс | $T_{12}$ , мс | $T_{02}$ , мс |
|-------------------------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $C1 = C2 = 0,47$ мкФ          |          |               |               |               |               |
| $C1 = 0,47$ мкФ, $C2 = 1$ мкФ |          |               |               |               |               |

- Замените конденсатор  $C1$  электролитическим конденсатором 100 мкФ (+ - к коллектору транзистора!) а  $C2$  на 470 мкФ (+ - также к коллектору транзистора!) и наблюдайте за переключением мультивибратора по миганию светодиода и сигнальной лампочки.

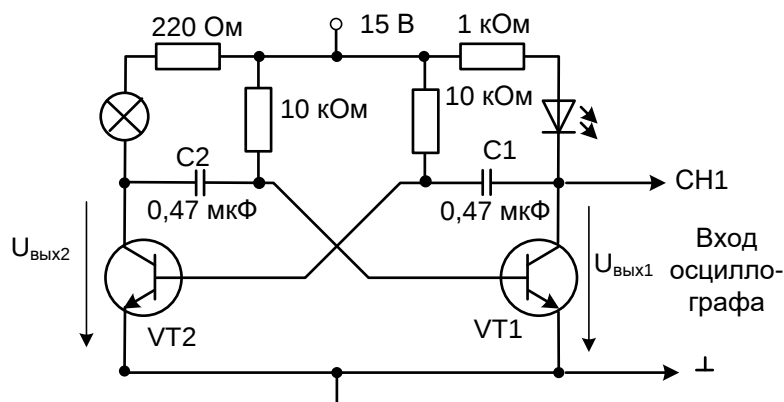


Рис. 7.15. Принципиальная схема мультивибратора.

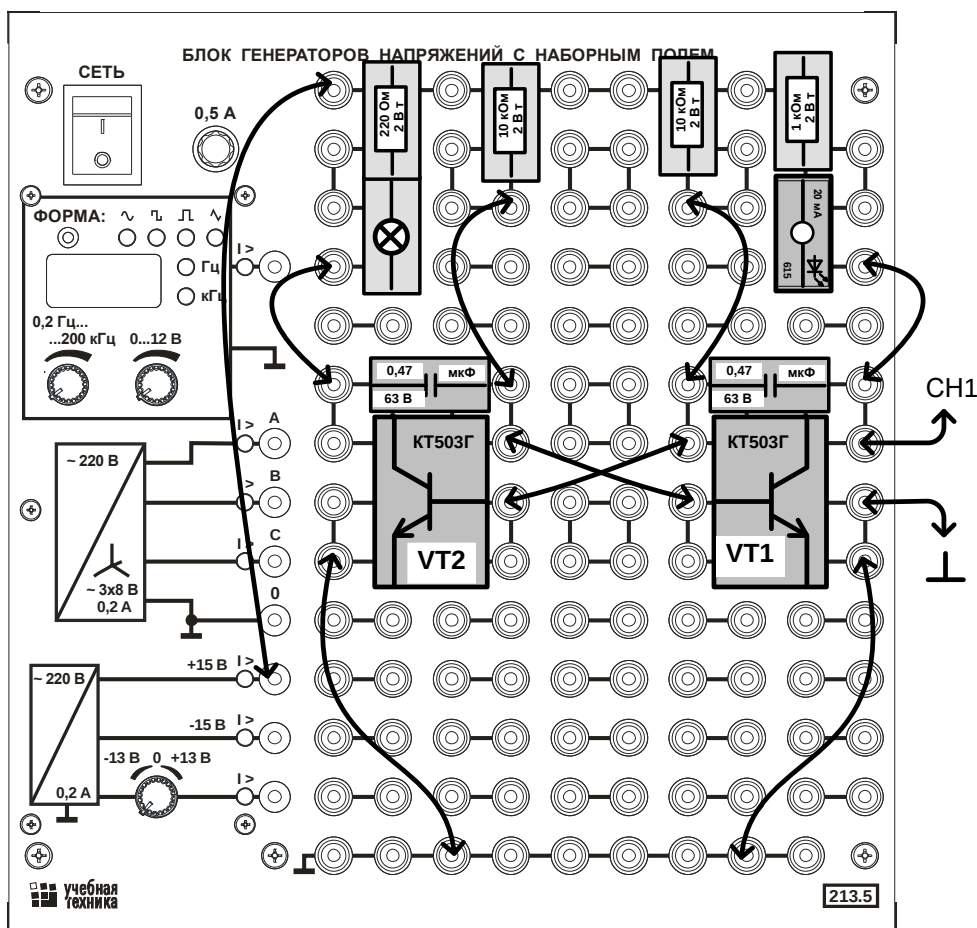


Рис. 7.16. Монтажная схема

- Соберите теперь схему ждущего одновибратора (Рис. 7.17 и 7.18). Включите питание и убедитесь, что светодиод включился, а лампочка не включилась.
- Кратковременно коснитесь наконечником провода А гнезда Б, соединённого с базой транзистора VT2 и убедитесь, что светодиод погас, а сигнальная лампочка включилась. Через некоторое время схема вернётся в первоначальное состояние.

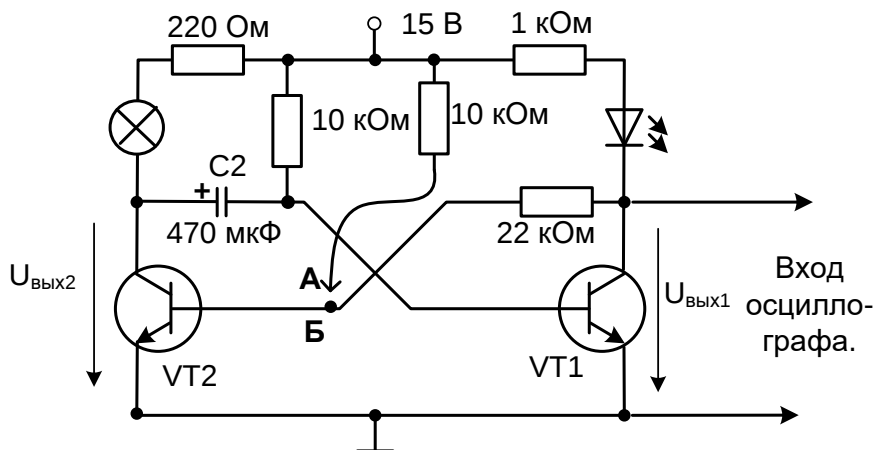


Рис. 7.17. Принципиальная схема одновибратора.

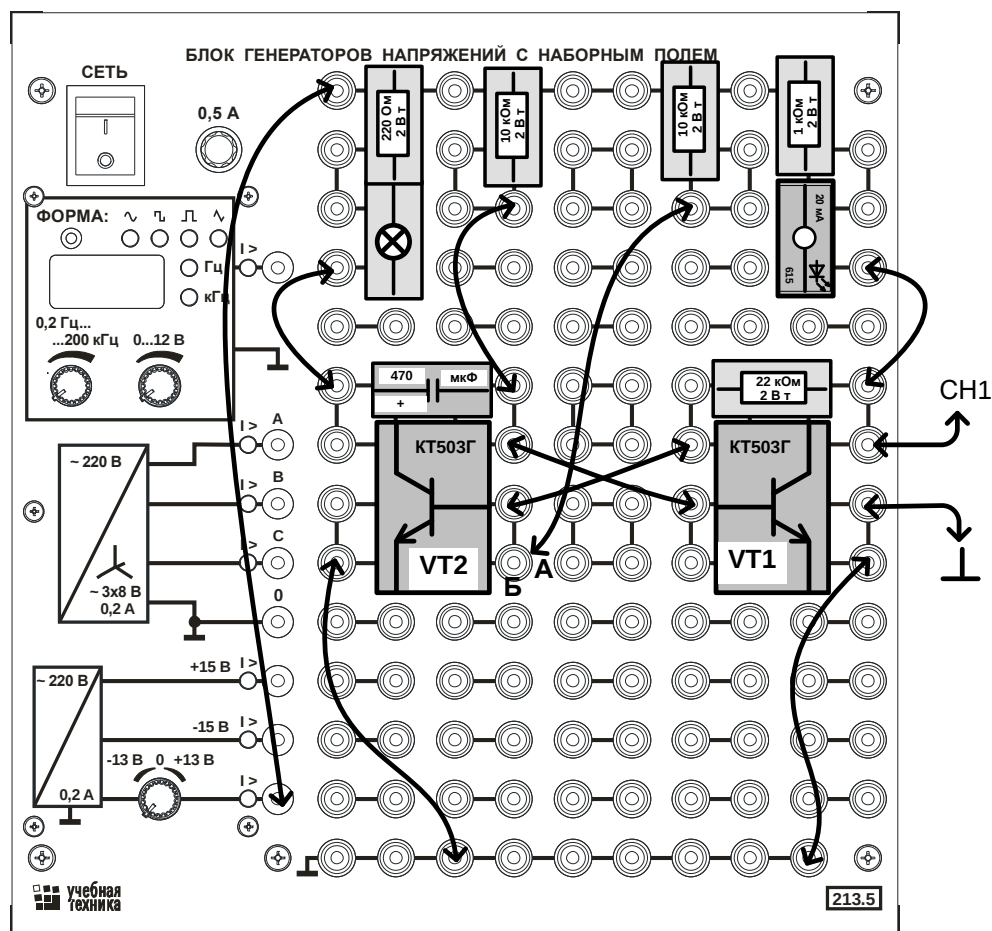


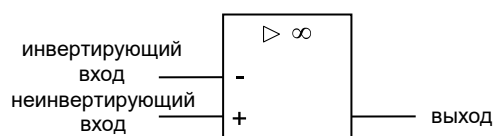
Рис. 7.18. Монтажная схема.

#### 4. Исследование цепей с операционными усилителями

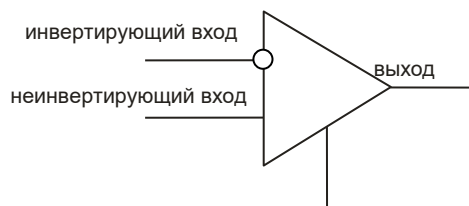
##### Общие сведения

Операционный усилитель представляет собой идеальный усилитель с высокоомным дифференциальным входом (два входных вывода) и очень высоким коэффициентом усиления. Многие электронные устройства, выполняемые на транзисторах, могут быть также реализованы на операционных усилителях.

условное обозначение:



или



При подаче сигнала на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с приращениями входного сигнала. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала имеет обратный знак (противоположный по фазе). При подаче сигналов на оба входа сигнал на выходе равен

$$U_{\text{вых}} = v (U_1 - U_2),$$

где  $v \rightarrow \infty$  – коэффициент усиления операционного усилителя;  
 $U_1$  и  $U_2$  – сигналы на неинвертирующем и инвертирующем входах соответственно.

Входное сопротивление операционного усилителя очень велико ( $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ ), поэтому входной ток при расчете считается равным нулю.

Выходное сопротивление операционного усилителя весьма мало ( $R_{\text{вых}} \rightarrow 0$ ), поэтому ток нагрузки усилителя практически не влияет его выходное напряжение.

Инвертирующий вход часто используется для введения в операционный усилитель внешних обратных связей.

Инвертирующий усилитель представляет собой устройство, которое преобразует входное напряжение в выходное напряжение противоположной полярности. В случае синусоидального напряжения

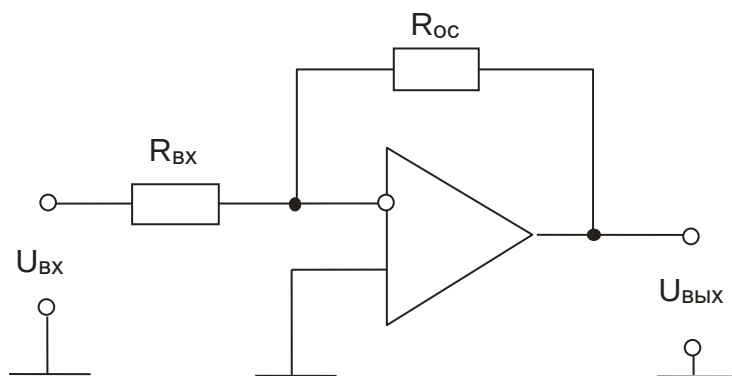


Рис. 7.19

образуется фазовременной сдвиг  $180^\circ$  между входным и выходным сигналами. Инвертирующий усилитель может быть использован для усиления или ослабления входного сигнала. Его принципиальная схема показана на рис. 7.19.

Коэффициент усиления равен

$$v = - U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = - R_{\text{ос}} / R_{\text{вх}}.$$

Для упрощения расчетов делаются следующие допущения:

- В рабочем диапазоне усилителя разность потенциалов между двумя входами равна 0;
- Входной ток усилителя равен 0.

Коэффициент усиления  $\nu = -1$  (когда  $R_{OC} = R_{BX}$ ), то есть амплитуды входного и выходного сигналов равны.

В операционном усилителе без инвертирования входное и выходное напряжения имеют одинаковую полярность, то есть фазовый сдвиг по напряжению равен  $0^\circ$ .

Как показано на принципиальной схеме (рис. 7.20), входное напряжение подается на неинвертирующий вход. В диапазоне модуляции усилителя разность потенциалов между двумя входами равна 0. Коэффициент усиления вычисляется по формуле:

$$\nu = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = 1 + R_{OC} / R_{BX}.$$

На операционных усилителях возможно построение множества других устройств, преобразующих величину и форму сигналов или генерирующих сигналы различной формы.

### *Экспериментальная часть*

#### **Задание**

Построить кривые зависимости выходного напряжения от входного при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи для инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

#### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь, как показано на принципиальной схеме (рис. 7.21) и монтажной схеме (рис. 7.22). С помощью мультиметра измерьте величины выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{OC}$  и входных напряжениях  $U_{ВХ}$  согласно табл. 7.8.

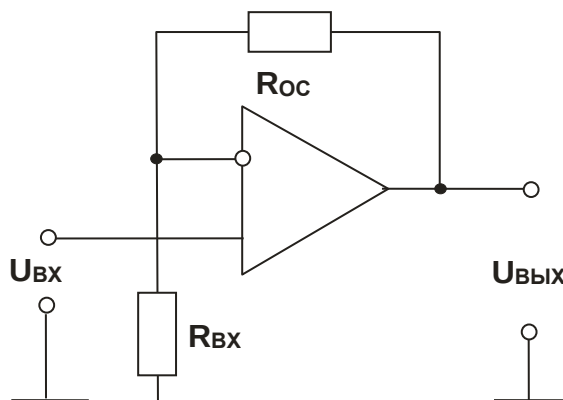


Рис. 7.20

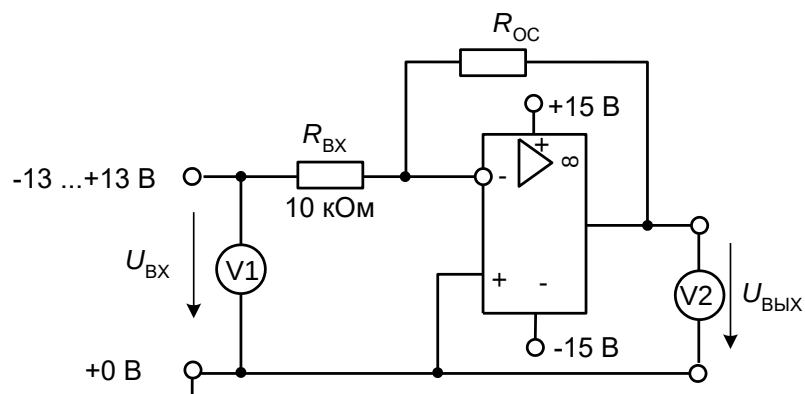


Рис. 7.21. Принципиальная схема операционного усилителя.

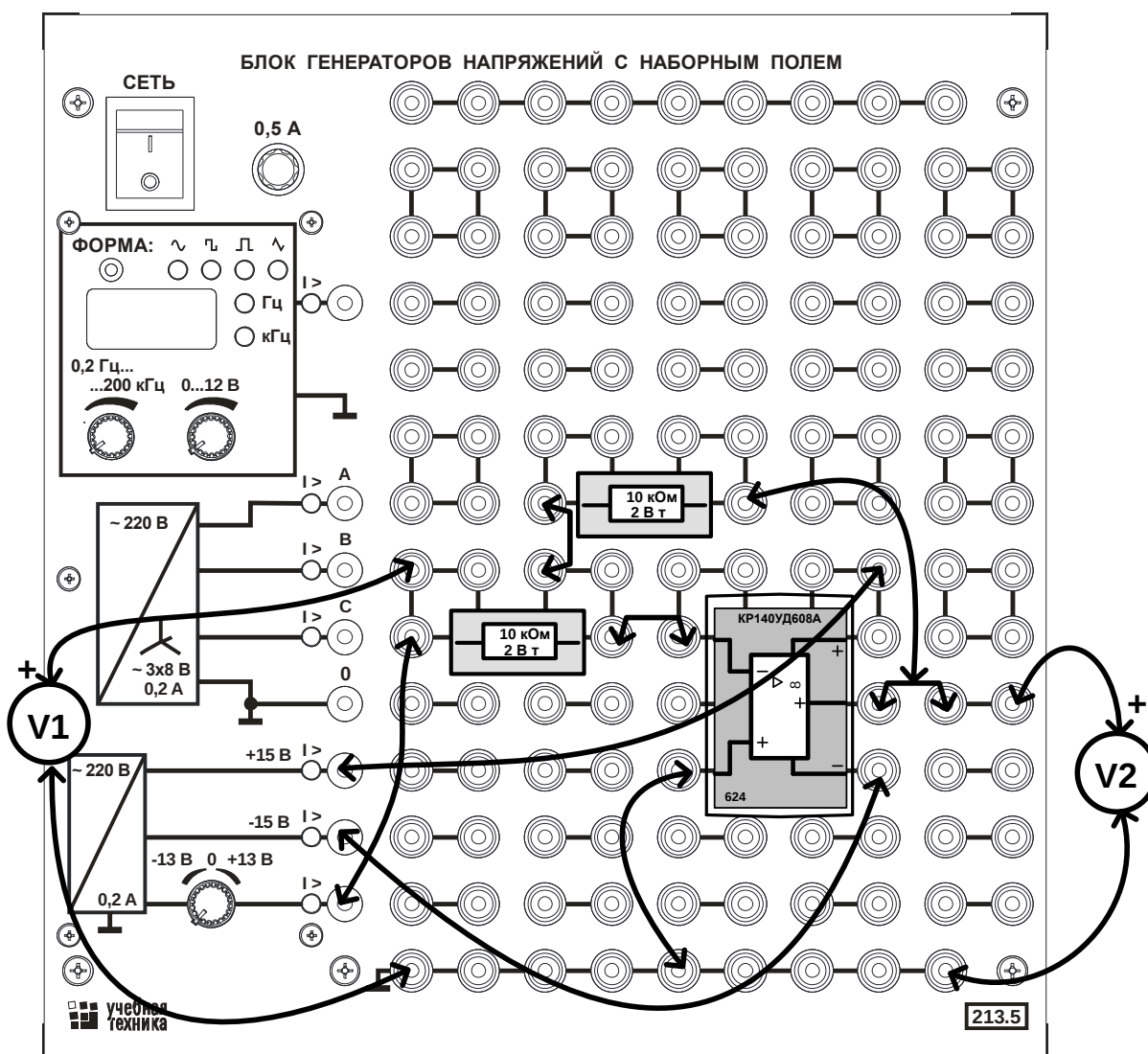


Рис. 7.22. Монтажная схема.

Таблица 7.8

| $U_{ВХ}, В$                    | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|----|
| $U_{ВЫХ}$ при $R_{OC}= 10$ кОм |     |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |
| $U_{ВЫХ}$ при $R_{OC}= 22$ кОм |     |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |
| $U_{ВЫХ}$ при $R_{OC}= 47$ кОм |     |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |

- На графике (рис. 7.23) постройте кривые зависимостей  $U_{ВЫХ}(U_{ВХ})$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{OC}$ .

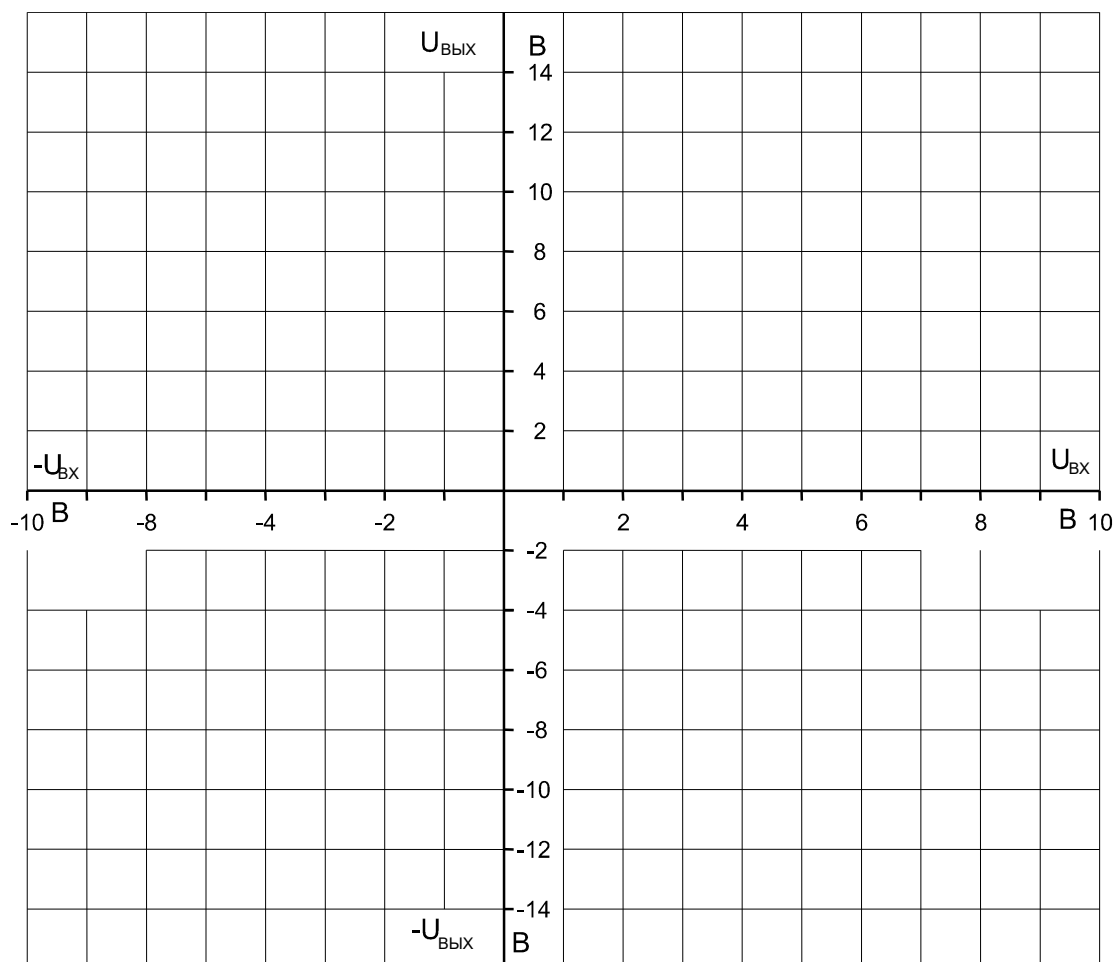


Рис. 7.23

- Соберите цепь неинвертирующего усилителя (рис. 7.24 и 7.25).

Используя мультиметр, измерьте выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи  $R_{\text{ОС}}$  и входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  согласно таблице 7.9.

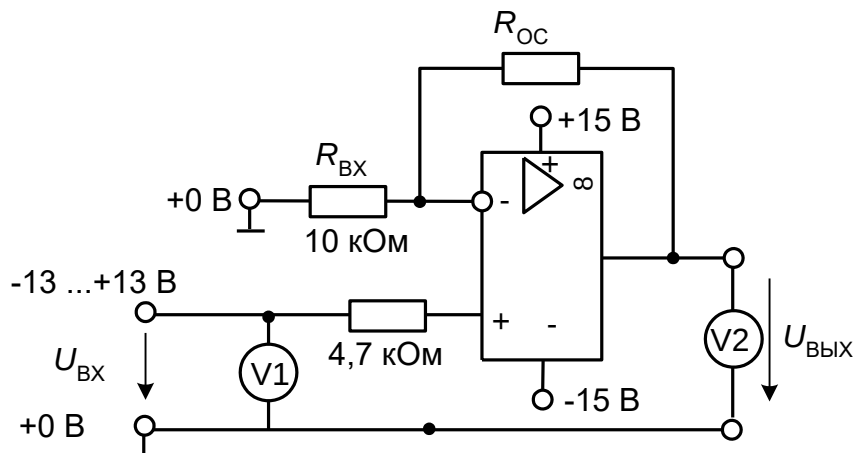


Рис. 7.24. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя.

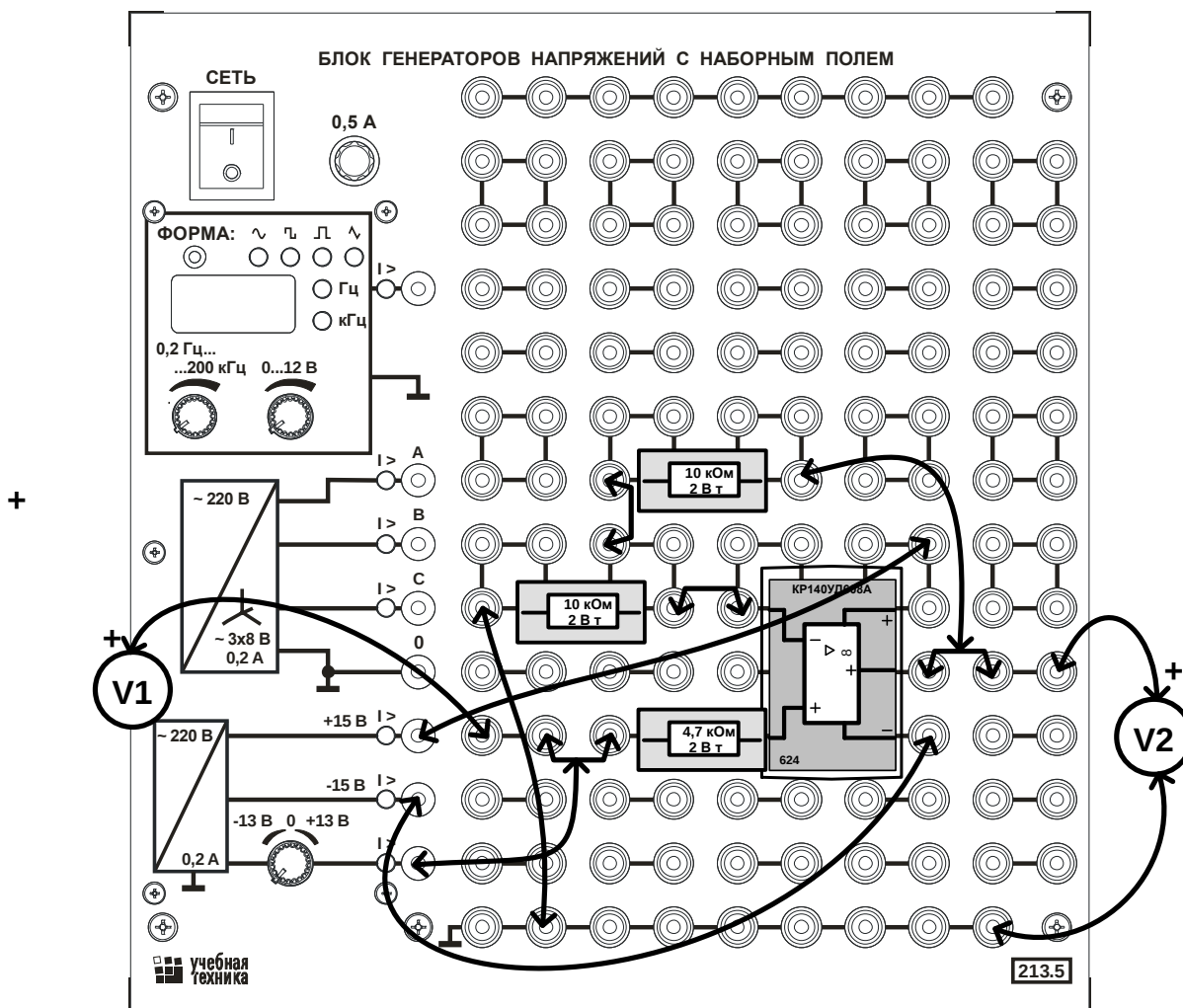


Рис.7.25. Монтажная схема.

- На графике (рис. 7.26) постройте зависимости выходного

напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{\text{ОС}}$ .

Таблица 7.9

| $U_{\text{ВХ}}, \text{В}$                                           | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|---------------------------------------------------------------------|-----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|----|
| $U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$<br>при<br>$R_{\text{ОС}}=10 \text{ кОм}$ |     |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |
| $U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$<br>при<br>$R_{\text{ОС}}=22 \text{ кОм}$ |     |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |
| $U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$<br>при<br>$R_{\text{ОС}}=47 \text{ кОм}$ |     |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |

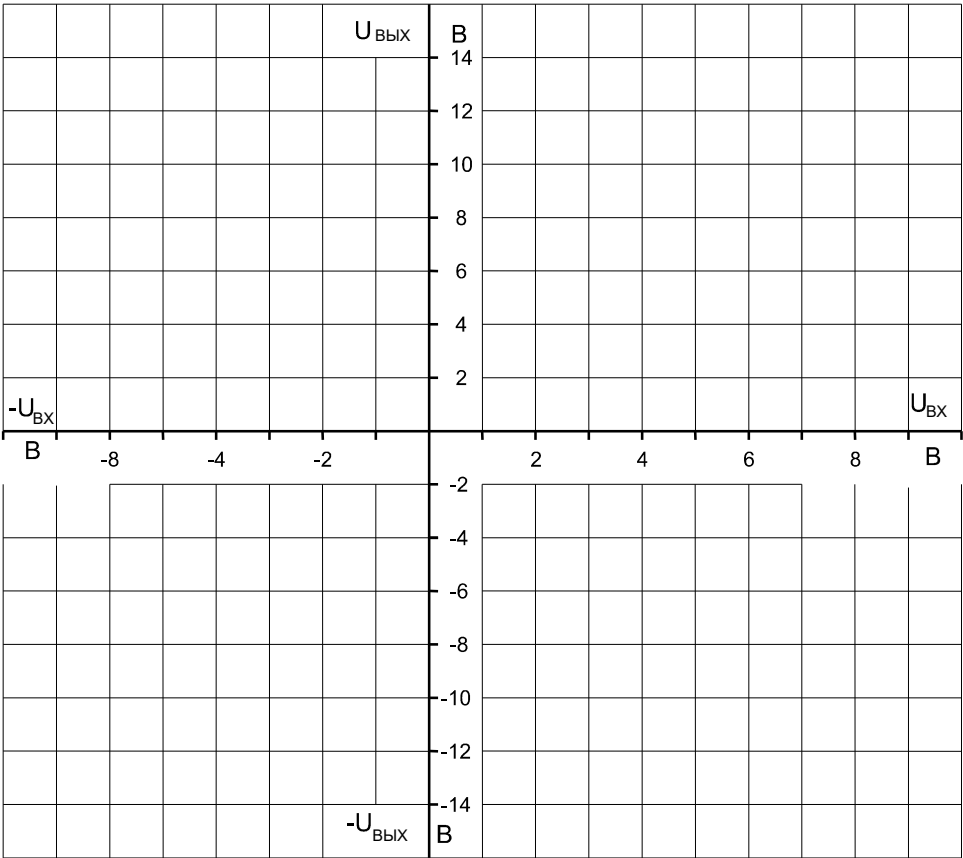


Рис. 7.26

***Вопросы к лабораторной работе № 6:***

1. Определение р-п перехода, вольтамперная характеристика р-п перехода.
2. Определение биполярного транзистора. Схемы включения транзистора.
3. Применение транзисторов. Электрические схемы, использующие биполярные транзисторы.
4. Принцип работы транзистора. Модель Эберса-Молла.
5. Анализ статических характеристик транзистора в схеме с общей базой.
6. Анализ статических характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.
7. Назовите основные параметры транзистора, их определение физический смысл.
8. Режимы работы транзистора. Распределение потенциалов на контактах транзистора для различных режимов работы в схеме с общим эмиттером.
9. Физический смысл и методы вычисления  $h$ -параметров биполярного транзистора.
10. Основные схемы включения транзисторов. Механизм усиления по току в схеме с ОЭ.
11. Основные параметры схем с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором. Применение этих схем.
12. Изобразить принципиальную схему усилителя низкой частоты с общим эмиттером. Объяснить назначение всех элементов схемы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

#### Цель работы

Изучение принципа действия и методов испытания однофазного трансформатора, определение его основных параметров.  
Расчёт рабочих характеристик однофазного трансформатора в различных режимах.

#### Исследование работы однофазного трансформатора

##### *Общие сведения*

Трансформатор представляет собой статическое (т.е. без подвижных частей) устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в ток другого напряжения той же частоты. Он состоит из замкнутого магнитопровода, на котором расположены две или более катушки (обмотки). В двухобмоточном трансформаторе к одной из обмоток (первичной) подводится напряжение от источника питания, к другой (вторичной) подключается нагрузка. Если числа витков этих катушек соответственно  $w_1$  и  $w_2$ , то их отношение называется коэффициентом трансформации ( $K_T$ ). На холостом ходу (при разомкнутой вторичной обмотке) это отношение равно также отношению напряжений на первичной и вторичной обмотках. При коротком замыкании вторичной обмотки оно равно обратному отношению токов в обмотках. Таким образом:

$$K_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1X}}{U_{2X}} = \frac{I_{2K}}{I_{1K}},$$

где  $U_{1X}$  и  $U_{2X}$  – первичное и вторичное напряжения холостого хода, а  $I_1$  и  $I_2$  – первичный и вторичный токи короткого замыкания.

Если  $w_1 > w_2$ , то трансформатор называется понижающим, так как он понижает напряжение ( $U_2 < U_1$ ), если же  $w_1 < w_2$ , то повышающим.

Испытания трансформатора обычно включают три опыта: опыт холостого хода (ХХ), опыт короткого замыкания (КЗ) и снятие нагрузочной (внешней) характеристики  $U_2(I_2)$ . Схемы этих опытов показаны на рис. 8.1а, б и в. Схема первичной цепи в этих опытах не меняется, а к вторичной обмотке в опыте ХХ подключается вольтметр, в опыте КЗ – амперметр, а в нагрузочном режиме – вольтметр, амперметр и нагрузочный резистор.

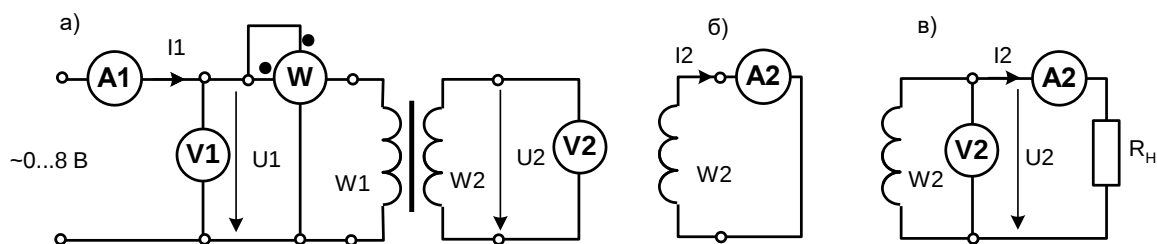


Рис. 8.1.

Опыт холостого хода проводится при номинальных напряжениях. Индуктивности катушек трансформатора с замкнутым магнитопроводом очень велики, поэтому трансформатор потребляет от источника питания лишь небольшой ток, называемый током намагничивания. Однако он сдвинут относительно напряжения не точно на  $90^\circ$ , как следовало бы ожидать для индуктивности, а на несколько меньший угол. Это означает, что при холостом ходе трансформатор потребляет, хотя и небольшую активную мощность. Эта мощность расходуется на перемагничивание магнитопровода и на потери от вихревых токов, возникающих в сердечнике. В обмотках трансформатора мощность практически не потребляется так как в первичной ток очень мал, а во вторичной вообще равен нулю.

Из опыта холостого хода определяют ток холостого хода (обычно в % от номинального тока), коэффициент трансформации.

Опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении питания. Оно должно быть таким, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи. При коротком замыкании напряжения на первичной обмотке трансформатора мало, а на вторичной вообще равно нулю. Напряжение на первичной обмотке обусловлено лишь активными сопротивлениями провода обмоток и реактивными сопротивлениями рассеяния. Потерь в сердечнике при таком низком напряжении практически нет.

Из опыта короткого замыкания определяют напряжение короткого замыкания (падение напряжения на обмотках, обычно в % от номинального напряжения), потери мощности в обмотках и также коэффициент трансформации.

В нагрузочном режиме с увеличением тока нагрузки ( $I_2$ ) напряжение изменяется вследствие увеличения падений напряжения в обмотках трансформатора. Вид этой характеристики зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная, ёмкостная или смешанная). При активной, индуктивной и активно-индуктивной нагрузке с увеличением тока нагрузки  $I_2$  напряжение  $U_2$  уменьшается, при ёмкостной, и активно-ёмкостной – может и возрасть.

При возрастании тока нагрузки изменяется также коэффициент полезного действия трансформатора:  $\eta = P_2/P_1$ , где  $P_2$  – мощность, потребляемая нагрузкой, а  $P_1$  – мощность, отдаваемая источником. При холостом ходе  $I_2 = 0$  и  $P_2 = 0$ , поэтому и  $\eta = 0$ . При коротком замыкании  $U_2 = 0$   $I_2 = I_{2\text{ ном}}$ , но  $U_2 = 0$ , поэтому также  $P_2 = 0$  и  $\eta = 0$ . Значит, при увеличении тока нагрузки  $\eta$  сначала возрастает, затем проходит через максимум и затем снова падает. Трансформаторы конструируют обычно таким образом, чтобы максимальный  $\eta$  имел место при нагрузке несколько меньше номинальной, так как чаще всего он работает с нагрузкой ниже номинальной.

При построении нагрузочной характеристики и графика изменения  $\eta$  по оси абсцисс откладывают ток нагрузки в % от номинального тока, а по оси ординат – вторичное напряжение в % от номинального напряжения и  $\eta$  также в %.

В данной работе снимаются характеристики трансформатора с разъемным сердечником и сменными катушками. Номинальные параметры этого трансформатора приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

| W   | U <sub>н</sub> , В | I <sub>н</sub> , мА | R, Ом | S <sub>н</sub> , ВА |
|-----|--------------------|---------------------|-------|---------------------|
| 100 | 2,33               | 600                 | 0,9   | 1,4                 |
| 300 | 7                  | 200                 | 4,8   | 1,4                 |
| 900 | 21                 | 66,7                | 37    | 1,4                 |

### Экспериментальная часть

#### Задание

Проделать опыты холостого хода и короткого замыкания и определить основные параметры трансформатора, снять нагрузочную характеристику и зависимость  $\eta$  от нагрузки.

#### Порядок выполнения работы

- Соберите трансформатор с числом витков  $w_1 = 300$ ,  $w_2 = 100$ , 300 или 900 по указанию преподавателя.
- Соберите цепь по монтажной схеме (рис. 8.2). нагрузочный резистор пока не включайте.
- Включите генератор, установите на его выходе напряжение 7 В, сделайте измерения при холостом ходе ( $R_H = \infty$ ) и запишите результаты в табл. 8.2. Вычислите коэффициент трансформации  $U_1/U_2$ , ток холостого хода  $I_{ХХ}\%$  и тоже запишите их значения в табл. 8.2

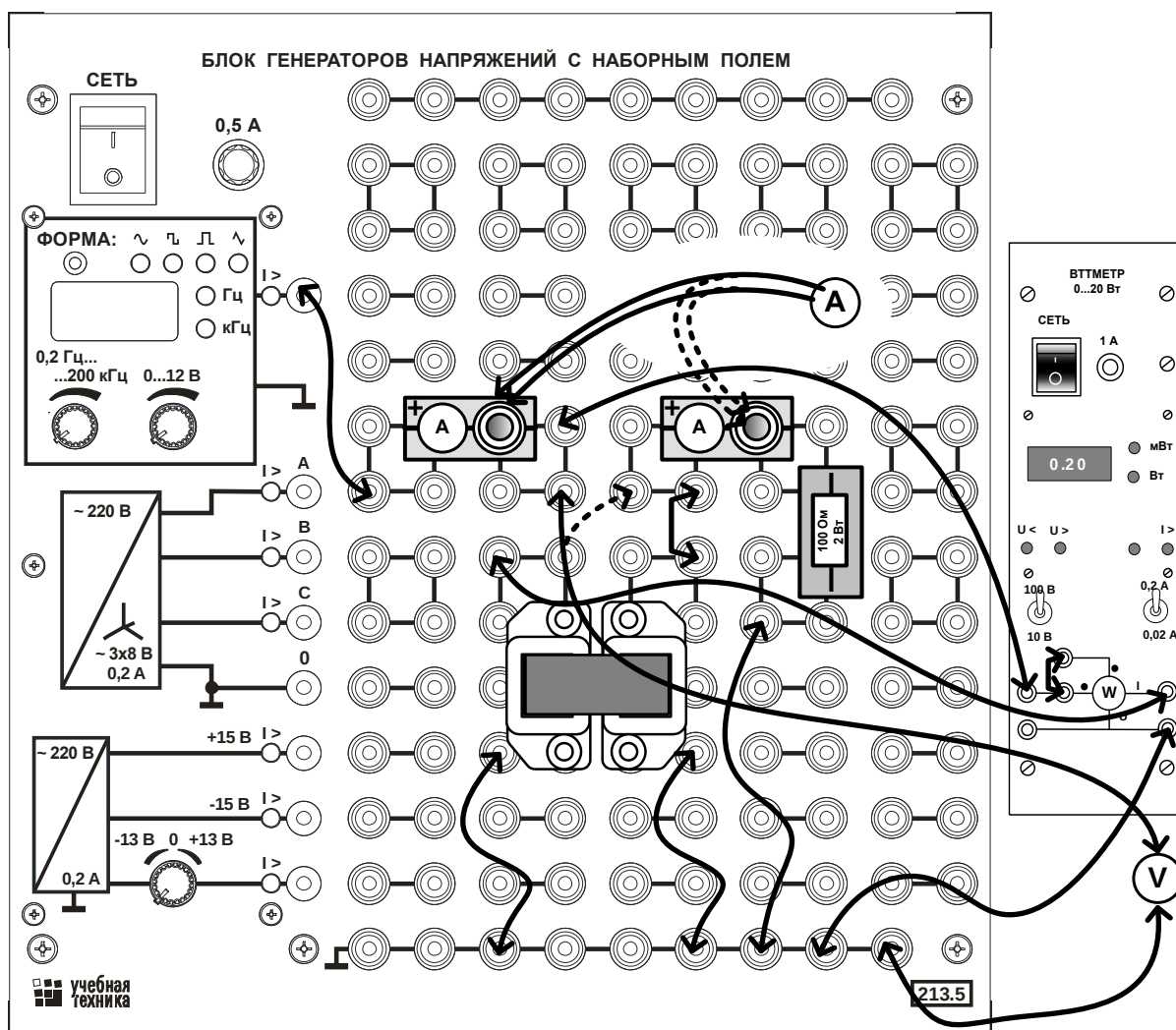


Рис. 8.2. Монтажная схема

- Проведите опыт короткого замыкания. Для этого вставьте перемычку вместо  $R_H$ . Отрегулируйте напряжение источника так, чтобы первичный ток стал равен номинальному току (200 мА) обмотки 300 витков. Запишите результаты измерений в табл. 8.2. Вычислите коэффициент трансформации  $I_2/I_1$ , напряжение короткого замыкания  $U_{K3}\%$  и тоже запишите в таблицу.

Таблица 8.2

| Опыт | $U_1$ ,<br>В | $U_2$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>мА | $I_2$ ,<br>мА | $P_1$ ,<br>Вт | $\varphi_1$ ,<br>град. | $U_1/U_2$ | $I_2/I_1$ | $U_{K3}$ ,<br>% | $I_{XX}$ ,<br>% |
|------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| ХХ   |              |              |               | -             |               |                        |           | -         | -               |                 |
| КЗ   |              | -            |               |               |               |                        | -         |           |                 | -               |

- Снимите нагрузочную характеристику трансформатора. Для этого включайте поочередно сопротивления нагрузки, указанные в табл. 8.3 (с учётом примечания к табл.) и делайте измерения с первичной и с вторичной стороны трансформатора.
- Рассчитайте  $P_2 = U_2 \cdot I_2$ ,  $I_2 / I_{2\text{НОМ}}$ ,  $U_2 / U_{2\text{НОМ}}$ ,  $\eta$  и постройте графики на рис. 8.3. (Номинальные параметры обмоток указаны в табл. 8.1)

Таблица 8.3.

| $R_H$ ,<br>Ом | $U_2$ ,<br>В | $I_2$ ,<br>мА | $P_1$ ,<br>мВт | $P_2$ ,<br>мВт | $U_2$<br>/ $U_{2\text{НОМ}}$ ,<br>% | $I_2$<br>/ $I_{2\text{НОМ}}$ ,<br>% | $\eta$ ,<br>% |
|---------------|--------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| х.х.          |              |               |                |                |                                     |                                     |               |
| 330           |              |               |                |                |                                     |                                     |               |
| 220           |              |               |                |                |                                     |                                     |               |
| 100           |              |               |                |                |                                     |                                     |               |
| 47            |              |               |                |                |                                     |                                     |               |
| 22            |              |               |                |                |                                     |                                     |               |

**Примечание:** В табл. 8.3 указаны значения сопротивлений  $R_H$  для случая, когда  $w_1 = w_2 = 300$  витков. При  $w_2 = 900$  витков их надо увеличить, а при  $w_2 = 100$  – уменьшить в 10 раз.

#### **Вопросы к лабораторной работе №7:**

1. Как устроен и на каком принципе работает трансформатор?
2. Какими уравнениями связаны напряжения и токи первичной и вторичной обмоток?
3. Как проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания и каким образом по их результатам определяют потери мощности в трансформаторе?
4. Как вычислить магнитный поток в сердечнике?
5. Почему в качестве номинальной мощности трансформатора задается полная мощность в кВА?
6. Как определяется КПД трансформатора?
7. Определить потери мощности в однофазном трансформаторе при номинальной активной нагрузке, если  $S_H = 50\text{кВА}$ ;  $\eta = 0,967$ .
8. Напряжение на зажимах вторичной обмотки однофазного трансформатора при номинальной нагрузке составило 220В. Вычислить напряжение  $U_2$  при холостом ходе, если  $\Delta U_2 \% = 4\%$ .

## Литература

1. Общая электротехника с основами электроники, Учебное пособие для студентов неэлектротехнических специальностей / И. А. Данилов, П. М. Иванов – ФГУП Издательство «Высшая школа» , 2005
2. Основы теории цепей. Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. –М.: Энергоатом издат, 1989.
3. Синдеев Ю. Г. Электротехника с основами электроники. Учебное пособие для учащихся профессиональных лицеев, студентов колледжей. Ростов н/Д: Феникс, 2013.
4. Основы электротехники электроники Учебник для высшего профессионального образования,/ В. Т. Еременко – ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», 2012.
5. Электротехника и электроника: Учебник для среднего профессионального образования / Б. И. Петленко, Ю. М. Иньков, А. В. Крашенинников и др.; Под ред. Б.И. Петленко. – М.: Изд. Центр «Академия», 2004.
6. Частоедов Л. А. Электротехника: Учебное пособие для студентов техникумов и колледжей. – М.: Маршрут, 2006.
7. Прошин В. М. Лабораторно-практические работы по электротехнике: Учебное пособие для образовательных учреждений начального профессионального образования. – М.: Изд. Центр «Академия», 2004.