

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А. БУНИНА»

И.Н. Зайцева, Н.А. Фортунова,  
С.С. Токарева, Н.А. Ярлыкова

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

## **ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Лабораторный практикум**

УДК 621.3  
ББК 3  
3 12

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина  
от 31. 01. 2019 г., протокол № 1

Рецензенты:

*С.Ю. Радин*, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии  
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина),

*С.В. Захаров*, начальник филиала РТРС «Липецкий ОРТПЦ» в г. Ельце

**И.Н. Зайцева, Н.А. Фортунова, С.С. Токарева, Н.А. Ярлыкова**

**3 12** Электротехника. Линейные цепи постоянного тока: лабораторный практикум. – Елец: «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2019. – 80 с.

В учебно-методическом пособии представлены требования к выполнению лабораторных работ и оформлению отчётов по ним, описание лабораторного стенда «Уралочка», техника безопасности при выполнении экспериментов. По каждой теме исследования даются рекомендации по подготовке к лабораторному занятию, основные теоретические положения и порядок выполнения экспериментальных исследований, в том числе с применением программы схемотехнического моделирования Multisim.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов направлений подготовки бакалавров: 11.03.01; 43.03.01; 09.03.01; 09.03.02; 10.03.01; 11.03.04, а также для студентов специальностей СПО, изучающих электротехнические дисциплины.

УДК 621.3  
ББК 3

© Елецкий государственный  
университет им. И.А. Бунина, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум предусматривает практическое освоение студентами экспериментальных и виртуальных методов исследования линейных электрических цепей постоянного тока, а также получение и закрепление навыков их расчёта.

Представленный лабораторный практикум предусматривает рациональное совмещение реальных экспериментов, выполняемых на лабораторном стенде «Уралочка», и виртуальных работ в среде схемотехнического моделирования *EWB* или *Multisim*.

Приводится описание конструкции стенда «Уралочка», приборов и оборудования, рассмотрены вопросы техники безопасности при проведении экспериментов.

Лабораторный практикум включает: методические указания по проведению восьми лабораторных работ по разделу «Линейные электрические цепи постоянного тока»; краткие теоретические сведения, необходимые для подготовки к работе; перечень контрольных вопросов и индивидуальных расчётных заданий для зачёта.

Приведён пример оформления отчётной документации по выполнению лабораторной работы.

## 1. Устройство лабораторного стенда «Уралочка»

Стенд собран на специальном столе, который в исходном (закрытом) состоянии используется как обычный стол для проведения аудиторных занятий. Для приведения стола в рабочее состояние необходимо специальным ключом вытянуть справа фиксатор барабана, повернуть барабан вверх и зафиксировать его в рабочем положении установкой штыря фиксатора в нижнее фиксирующее отверстие в правой стенке барабана. Проверить покачиванием барабана надёжность его фиксации. На рис.1 представлен внешний вид лабораторного стенда «Уралочка».



*Рис.1. Внешний вид лабораторного стенда «Уралочка»*

Измерительный блок представляет собой трёхфазный источник питания, на лицевой панели которого расположены измерительные приборы (мультиметры), гнезда для подключения к сменным блокам и необходимые органы управления. В рабочем положении лицевая панель измерительного блока расположена под углом к столешнице, что удобно для работы (рис.2). Сетевое питание – переменное напряжение 380/220В.

Выходные напряжения на клеммах лицевой панели измерительного блока:

- трёхфазное 54/32 В (без нагрузки);
- постоянного тока 32 В (без нагрузки) нестабилизированное;
- постоянного тока 1,3 ÷ 30В регулируемое, стабилизированное, с пульсацией при максимальной нагрузке не более 25 мВ.

Источник имеет защиту от короткого замыкания по выходу и от температурного перегрева с последующим самовосстановлением функционирования. Порог срабатывания защиты: по току  $2,5...2,8A$ , по температуре более  $+85^{\circ}C$ .



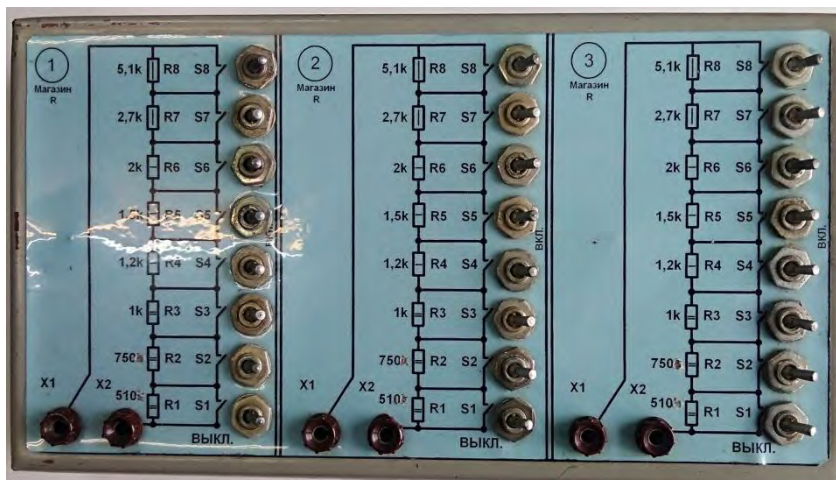
*Рис.2. Измерительный блок*

Максимальный рабочий ток источников напряжений не более  $1,5...1,8A$ . Выходные цепи источников напряжений защищены плавкими предохранителями с током срабатывания  $2A$ .

Сменные блоки для проведения лабораторных работ хранятся в левом отсеке стола, откуда извлекаются по мере необходимости для работы. Левый отсек стола закрыт откидной столешницей и зафиксирован в исходном состоянии фиксатором.

Стенд комплектуется сменными блоками.

**1.** Блок сопротивлений (магазин сопротивлений) – блок №1 (рис.3).



*Рис.3. Блок сопротивлений*



2. Переменный резистор на измерительном блоке  $0 \div 200 \text{ Ом}$ ,  $50 \text{ Вт}$ .
3. Источник ЭДС =  $30 \text{ В}$  – измерительный блок лабораторного стенда.
4. Блок конденсаторов (магазин ёмкостей) – блок №4 (рис.4).



Рис.4. Блок конденсаторов

5. Блок для снятия петли гистерезиса (магазин сопротивлений; катушка со сталью) – блок №5 (рис.5).

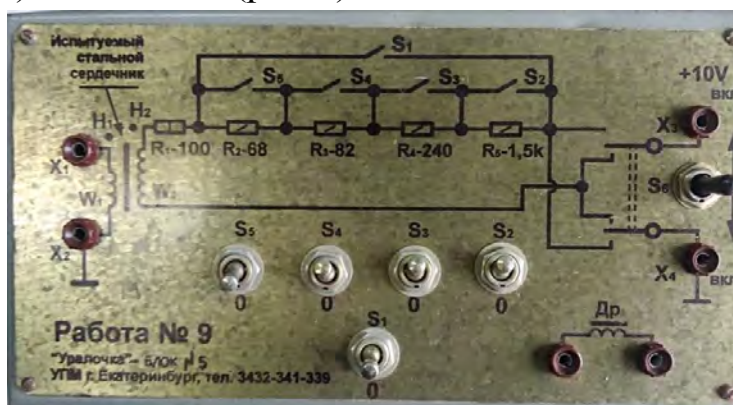


Рис.5. Блок для снятия петли гистерезиса

6. Блок линейных элементов (магазин сопротивлений; ключи  $S1 ; S2$ ) – блок №6 (рис.6).

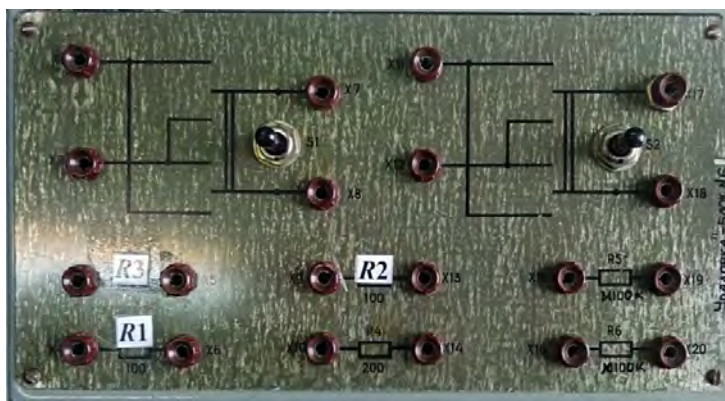
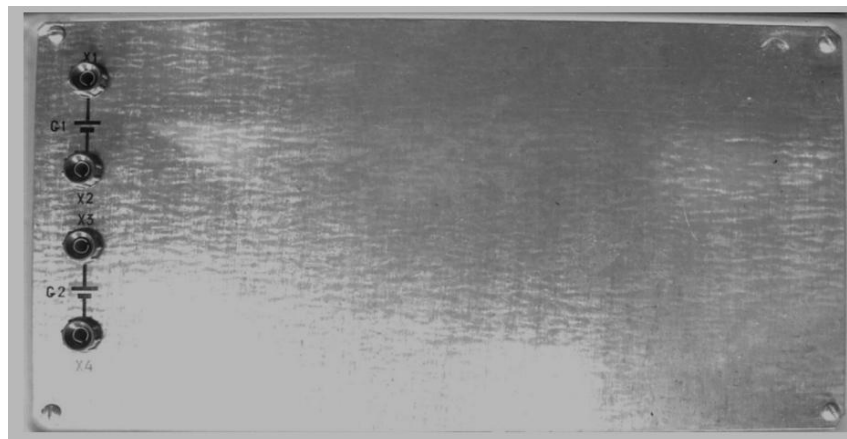


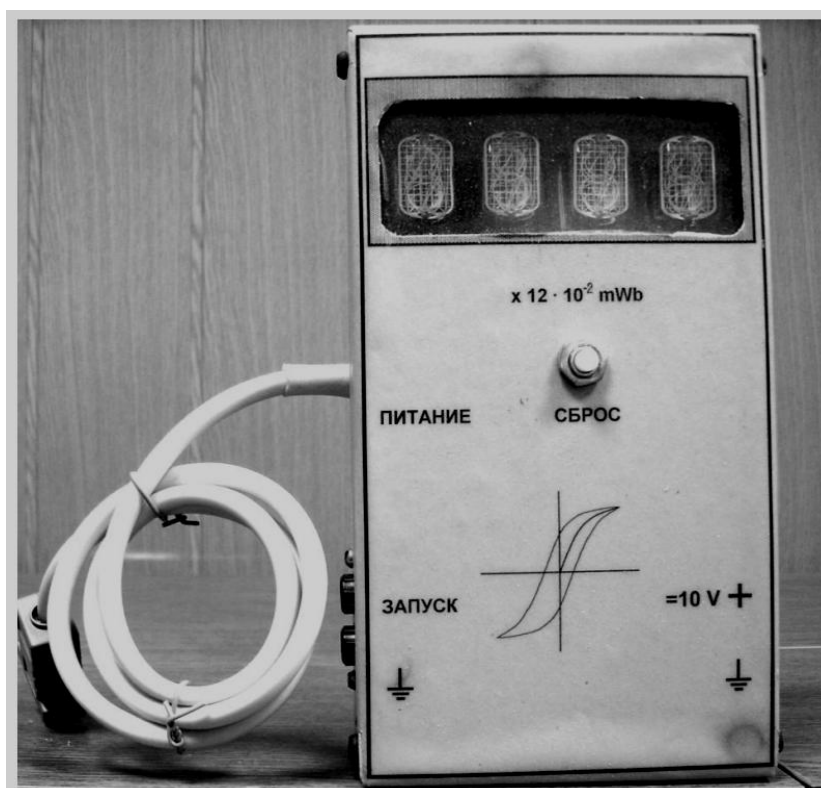
Рис.6. Блок линейных элементов

7. Блок сухих элементов (источник ЭДС = 4,5 В) – блок №7 (рис.7). Перед началом эксплуатации блока №7 необходимо снять днище блока, установить в контейнер 3 × 2 элементов типа «МАРС» с соблюдением полярности.



*Рис.7. Блок сухих элементов*

*Дополнительная комплектация общего назначения*  
➤ Милливеберметр (рис.8).



*Рис.8. Милливеберметр*

➤ Катушки индуктивности с сердечниками.

➤ Ваттметр (рис.9).



Рис. 9. Внешний вид ваттметра

➤ Соединительные провода – один комплект на каждый лабораторный стол.

➤ Реостат РПШ – 100 Ом, 2А.

Сменные блоки лабораторных работ смонтированы в отдельных типовых корпусах. Лабораторный стенд «Уралочка» предусматривает выполнение большого количества лабораторных работ, это обеспечивается универсальностью использования сменных блоков.

Назначение сменных блоков определяется схемой электрических соединений (см. «Руководство к лабораторным работам») и мнемосхемой на его лицевой панели. Мнемосхема облегчает сборку электрической схемы и её восприятие. Перечень сменных блоков приведён в «Паспорте» на стенд.

## 2. Вопросы техники безопасности в лаборатории при выполнении реального и виртуального экспериментов

Проведение реальных экспериментов на лабораторном стенде «Уралочка» предусматривает физическое исследование собранной электрической схемы цепи постоянного или переменного тока, а также исследование режимов работы трансформаторов, двигателей постоянного и переменного тока. В любом случае проведение эксперимента сопровождается подключением схемы, модуля или блока к одному или нескольким источникам электрической энергии. Следовательно, наиболее существенным



опасным фактором является возможное воздействие электрического тока на организм человека.

Электрический ток может нанести человеку травму при прямом прохождении через тело. Кроме того, человек может быть травмирован другими видами энергии, в которые превращается электричество. Защиту от поражения электрическим током рассчитывают по его предельно допустимому значению. Допустимым считается ток, при котором человек может самостоятельно освободиться от электрической цепи. В зависимости от назначения установки, режима её работы, частоты тока, длительности воздействия его на человека установлены значения предельно допустимого тока.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в Таблице 1.

Допустимые напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека (ГОСТ 12.1.038 – 82)

Таблица 1

Род тока	$U, В$	$I, мА$
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц не должны превышать значений, указанных в Таблице 2.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме (ГОСТ 12.1.038 – 82)

Таблица 2

Продолжительность воздействия $t, с$	Нормируемая величина		Продолжительность воздействия $t, с$	Нормируемая величина	
	$U, В$	$I, мА$		$U, В$	$I, мА$
От 0,01 до 0,08	220	220	0,6	40	40
0,1	200	200	0,7	35	35
0,2	100	100	0,8	30	30
0,3	70	70	0,9	27	27
0,4	55	55	1,0	25	25
0,5	50	50	Св. 1,0	12	2

Согласно ГОСТ Р 12.1.019 – 2009 ССБТ [3] электробезопасность должна обеспечиваться целым комплексом мероприятий:

1. Конструкцией электроустановки (лабораторного стенда).
2. Техническими способами и средствами защиты.
3. Организационными и техническими мероприятиями.

Содержание каждого пункта мероприятий следует определять для каждого лабораторного стенда индивидуально в зависимости от его назначения, физических процессов, протекающих при его работе, габаритов, месте установки и других факторов.

Конструкция лабораторного стенда должна быть выполнена с учётом требований правил устройства электроустановок [5].

Технические способы и средства защиты должны быть предусмотрены в процессе монтажа лабораторного оборудования, основными из которых являются:

1. Величина максимального напряжения в экспериментальной установке, род и частота электрического тока.

2. Способ получения питающих напряжений (осветительная сеть, аккумуляторы и т. п.)

3. Возможности приближения человека к токоведущим частям экспериментальной электроустановки на величину менее допустимого значения.

4. Виды работ в месте расположения экспериментальной установки (переключения, регулировка, монтаж и т. п.).

5. Характер возможного прикосновения человека к элементам цепи тока: однофазное (однополюсное) прикосновение, двухфазное (двухполюсное) прикосновение, прикосновение к металлическим нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением.

Примером технического средства защиты является разделительный трансформатор для гальванической развязки цепей питания лабораторной установки от осветительной сети.

К организационным мероприятиям относятся: периодические медосмотры, предусмотренная в организации система инструктажей персонала, система допуска к работе с лабораторным и другим оборудованием и т. п.

Кроме вопросов электробезопасности, в ходе проведения реального эксперимента следует отметить другие возможные вредные факторы, возникновение которых возможно в процессе работы с лабораторным оборудованием. К числу таких факторов можно отнести вибрацию, шум, электромагнитные и магнитные поля, запылённость и т. п. Возможность возникновения перечисленных выше факторов и степень их опасности для

человека выявляют посредством всестороннего анализа физических процессов в экспериментальной установке.

Проведение виртуального эксперимента подразумевает исследование работы электрической схемы средствами компьютерного моделирования с помощью пакетов прикладных программ *EWB*, *Multisim*, *Micro – Cap*. Работа с такими программами практически сводится к работе с персональным компьютером, который по своим техническим характеристикам должен соответствовать требованиям санитарных норм и правил СанПиН 2.2.2.542 – 96[1].

В данной ситуации можно выявить два основных вредных фактора, один из которых связан с излишней нагрузкой на органы зрения обучаемого, а второй обусловлен отсутствием физических нагрузок на опорно-мышечный аппарат.

Полностью нейтрализовать или частично компенсировать влияние выявленных вредных факторов можно путём организационных мероприятий.

Достаточно организовать работу студента таким образом, чтобы после 60 минут работы за монитором следовал перерыв на 15 минут для проведения рекомендованных комплексов упражнений для глаз и комплексов физкультурных упражнений [1].

Перед началом выполнения курса лабораторных работ студент должен пройти инструктаж по технике безопасности.

### 3. Правила сборки электрических схем

Перед сборкой электрической цепи (ЭЦ) необходимо определить все элементы, которые должны входить в неё в соответствии с принципиальной схемой: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, измерительные приборы, выключатели и переключатели, источники питания и др. Переключатели пределов измерений приборов должны быть установлены в положения, указанные в инструкционных картах. Особое внимание следует обратить на универсальный прибор – мультиметр, в котором наряду с переключателем пределов измерений имеется переключатель рода работы с положениями:

«*R*»– измерение сопротивлений;

« = *U*»– измерение постоянного напряжения;

«*~U*»– измерение переменного напряжения;

« = *I*»– измерение силы постоянного тока;

«*~I*»– измерение силы переменного тока.

При сборке ЭЦ необходимо придерживаться следующих правил:

- ✓ начинать сборку от зажимов источника питания;
- ✓ в первую очередь собирать главную цепь, состоящую из последовательно соединённых элементов: резисторов, катушек индуктивности, амперметров, токовых катушек ваттметров и т.д.;
- ✓ во вторую очередь подсоединять параллельно подключаемые элементы, в том числе вольтметры, катушки напряжения ваттметров, осциллограф и др.

Разборку ЭЦ следует начинать также от источника питания, предварительно отключив от схемы напряжение питания.

#### 4. Требования к оформлению отчёта по лабораторной работе

По окончании лабораторной работы каждый студент должен самостоятельно обработать результаты выполняемых им опытов и составить отчёт о проделанной лабораторной работе.

Отчёт должен, помимо названия университета и кафедры, номера и названия лабораторной работы, индекса учебной группы и фамилии студента на титульном листе, содержать следующие сведения:

- ✓ описание цели работы;
- ✓ краткие теоретические сведения;
- ✓ электрическую схему устройства;
- ✓ таблицы с записью результатов проведённых опытов и выполненных вычислений; расчётные формулы, по которым выполнялись вычисления;
- ✓ диаграммы и графики зависимостей;
- ✓ моделирование электрической схемы с помощью пакетов прикладных программ *EWB*, *Multisim*, *Micro – Cap* и др.;
- ✓ индивидуальное задание;
- ✓ выводы о результатах проведённой работы.

Все схемы, таблицы и графики, приводимые в отчёте, должны иметь наименования. Схемы соединений, таблицы, диаграммы и графики зависимостей следует выполнять карандашом с помощью линейки с обязательным соблюдением требований ГОСТ на условные обозначения элементов схем (Табл. 1) и на обозначения единиц измерения.

Отчёт должен содержать:

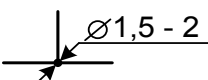
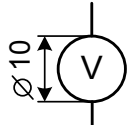
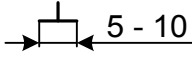
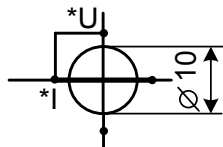
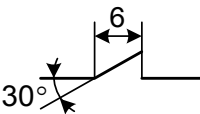
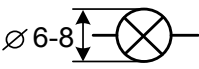
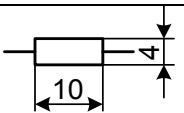
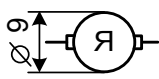
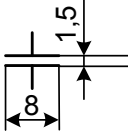
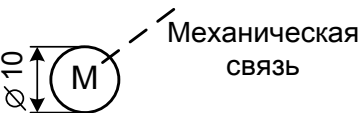
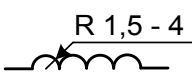
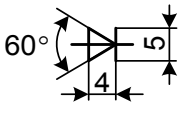
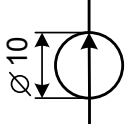
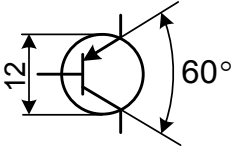
- ✓ титульный лист;
- ✓ схемы экспериментов и перечень использованного оборудования;
- ✓ таблицы с данными измерений;
- ✓ графики, векторные диаграммы;
- ✓ результаты вычислений и расчётные формулы;
- ✓ выводы.

Электрические схемы, векторные диаграммы и графики следует вычерчивать аккуратно карандашом, применяя чертёжные принадлежности или с применением программ для создания электрических схем *Microsoft Visio*, Компаси др. Векторные диаграммы строятся с соблюдением масштаба: выбранный масштаб указывается рядом с начерченной диаграммой. При вычерчивании электрических схем следует использовать условные обозначения в соответствии с ГОСТами (Таблица 3).

При построении графиков необходимо на осях координат указывать обозначения откладываемых величин и единицы их измерений. Вдоль осей координат наносят деления и представляют в масштабе числовые значения. Отчёт выполняется рукописно или в печатном виде на стандартных листах формата А4 (размеры 210x297 мм). Текст отчёта лабораторной работы оформляется в специальных рамках (см. ПРИЛОЖЕНИЯ). Нумерация страниц отчёта – сквозная (первой страницей является титульный лист).

Таблица 3

**Условные графические обозначения некоторых элементов схем**

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Соединение (ответвление проводов)		Прибор измерительный (амперметр, вольтметр)	
Корпус прибора, устройства		Прибор измерительный (ваттметр)	
Контакт замыкающий		Лампа накаливания	
Резистор, активное сопротивление		Обмотка якоря машины постоянного тока	
Конденсатор, емкость		Общее обозначение двигателя переменного тока	
Катушка индуктивности, индуктивность		Полупроводниковый диод	
Источник электродвижущей силы (ЭДС)		Биполярный транзистор p - n - p-типа	



Отчёт, подписанный студентом, с проставленной датой выполнения представляется преподавателю на следующем лабораторном занятии. При защите работы студент обязан объяснить любой выполненный опыт или расчёт и ответить на дополнительные вопросы преподавателя по данной теме. Студенты, не представившие отчёт и не получившие зачёт по предыдущей работе, к выполнению последующих работ не допускаются.

Обработка пропущенных лабораторных работ производится в дополнительное время по согласованию с преподавателем.

## 5. Основы работы с программным пакетом *Multisim*

*Multisim* – это средство разработки и моделирования электрических и электронных схем, их тестирования и эмуляции, позволяющее объединить процессы разработки электронных устройств и тестирования на основе технологии виртуальных приборов для учебных и производственных целей.

Рассмотрим программную среду программы *Multisim*. На рис.10 представлен интерфейс при открытии программы, который представляет собой поле для построения схем из представленных элементов и базы элементов и различных измерительных приборов.

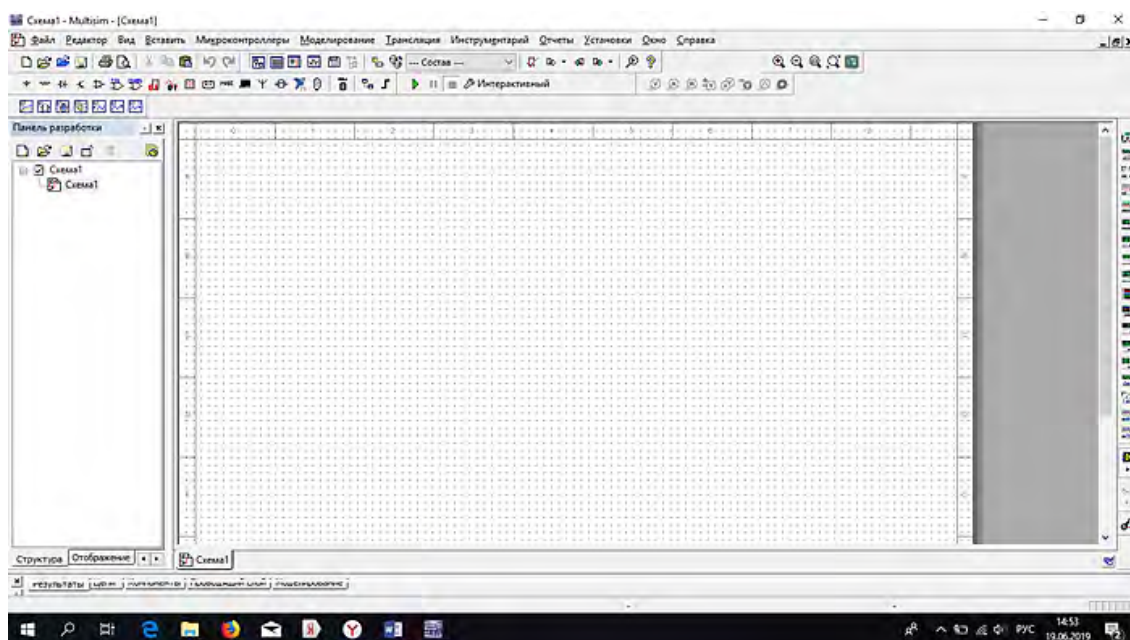


Рис.10. Интерфейс программы

С левой стороны расположено окно разработки, в котором отображаются проекты моделирования (рис.11).

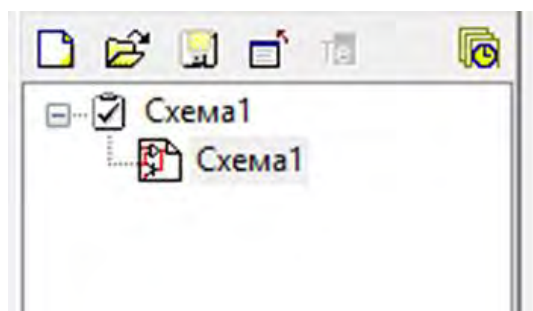


Рис.11. Окно разработки

Рассмотрим базу компонентов **Multisim**. Все группы компонентов расположены на верхней панели. Для выбора требуемого элемента необходимо нажать на группу, после чего открывается контекстное окно, в котором представлены имеющиеся элементы, объединённые по подгруппам (рис.12).



Рис.12. Базы данных компонентов

**1. Sources** (Источники). Содержит базу данных источников питания и заземлений.

**2. Basic** (Пассивные компоненты). Группа представлена основными элементами схемотехники: резисторы, ёмкостные и индуктивные элементы, ключи, трансформаторы, реле, коннекторы и т.д.

**3. Diodes** (Диоды). Содержит различные виды диодов: фотодиоды, диоды Шоттки, светодиоды и т.д.

**4. Transistors** (Транзисторы). Содержит различные виды транзисторов:

$p - n - p$ -,  $n - p - n$  - транзисторы, биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, КМОП –транзисторы и т.д.

**5. Analog** (Аналоговые компоненты). Содержит все виды усилителей: операционные, дифференциальные, инвертирующие и т.д.

**6. TTL** (Логика **TTL**). Содержит элементы транзисторно-транзисторной логики.

**7. CMOS** (Логика **CMOS**). Содержит элементы КМОП-логики.

**8. Misc Digital** (Цифровые компоненты). Содержит различные цифровые устройства.

**9. Analog Devices** (Аналого-цифровые компоненты). Группа представлена аналоговыми выключателями, таймерами, счётчиками и т.д.

**10. Indicators** (Индикаторы). Содержит измерительные приборы (вольтметры, амперметры), лампы, индикаторы различных видов и т.д.

**11. Power** (Компоненты питания). База содержит силовые регуляторы, выключатели, гаситель напряжения и другие компоненты.

**12. Misc** (Прочие компоненты). Группа включает в себя повышающие и вольтодобавочные преобразователи, электронные лампы и другие компоненты.

**13. AdvancedPeripherals** (Периферийные устройства). Группа включает жидкокристаллические индикаторы, цифровую клавиатуру и выводящий экран.

**14. RF** (ВЧ-компоненты). Содержит высокочастотные транзисторы, конденсаторы, туннельные диоды и другие компоненты.

**15. ElectroMechanical** (Электро-механические компоненты). Группа содержит синхронизированные контакты, датчики, регуляторы движения.

**16. Connectors** (Разъёмы). База представлена аудио- и видеоразъёмами, разъёмами питания, **USB** и др.

**17. MCU** (Микроконтроллеры). Эта группа содержит постоянное запоминающее устройство, оперативные запоминающие устройства, микроконтроллеры на гарвардской архитектуре.

**18. Шина** – проводник с низким сопротивлением.

На рис.13 представлен пример окна при выборе какого-либо компонента.

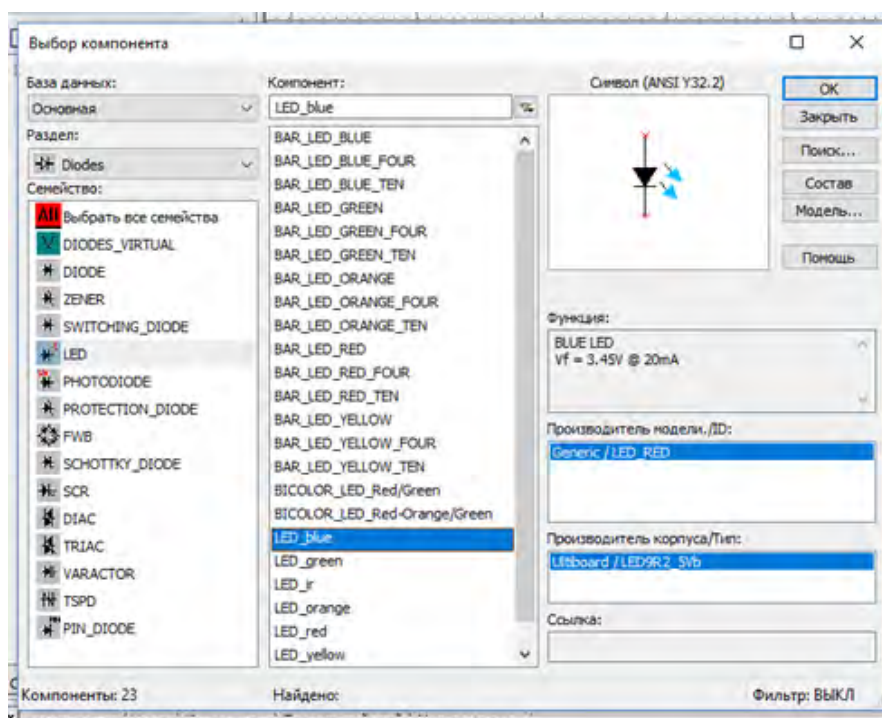
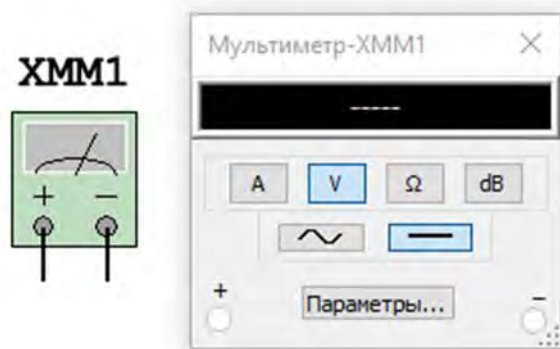


Рис.13. Пример выбора компонента

## ***Виртуальные приборы***

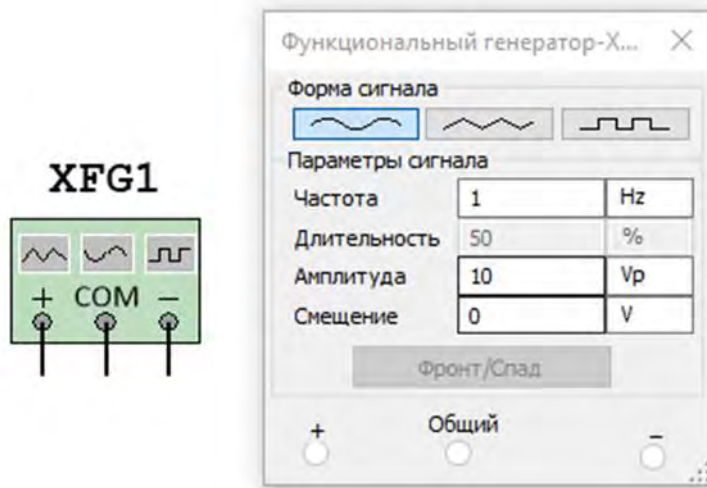
На крайней правой панели расположены приборы для подачи и снятия разнообразных сигналов и импульсов. Рассмотрим каждый прибор.

**1. Мультиметр** (рис.14). Прибор необходим для измерения постоянного тока и напряжения, сопротивления и затухания между узлами схемы. Выбор диапазона измерения осуществляется автоматически. Внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным, но их можно изменить.



*Рис.14. Мультиметр*

**2. Функциональный генератор** (рис.15). Источник напряжения, предназначенный для преобразования аналоговых сигналов в синусоидальную, прямоугольную и треугольную форму.



*Рис.15. Функциональный генератор*

**3. Ваттметр** (рис.16). Прибор для измерения мощности и коэффициента мощности.

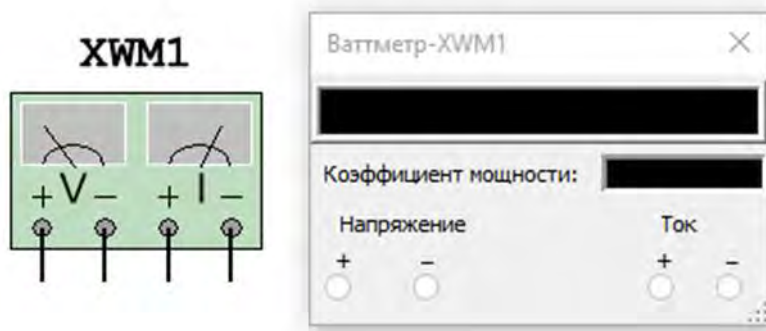


Рис.16. Ваттметр

4. **Осциллограф** (рис. 17). **Multisim** снабжена несколькими вариациями осциллографа, которыми можно управлять как настоящими. Они позволяют устанавливать параметры временной развёртки и напряжения, выбирать тип и уровень запуска измерений. Данные осциллографов можно посмотреть после эмуляции с помощью самописца (**Grapher**) из меню Вид\Плоттер (**View/Grapher**).

В Multisim есть следующие осциллографы:

- ✓ 2- канальный;
- ✓ 4- канальный;
- ✓ осциллограф смешанных сигналов **Agilent 54622D**;

✓ 4-канальный цифровой осциллограф с записью **Tektronix TDS 2024**.



Рис.17. Осциллограф



**5. Плоттер Бode** (рис.18) – это построитель частотных характеристик. Отображает относительный фазовый или амплитудный отклик входного и выходного сигналов, что удобно при анализе свойств полосовых фильтров.

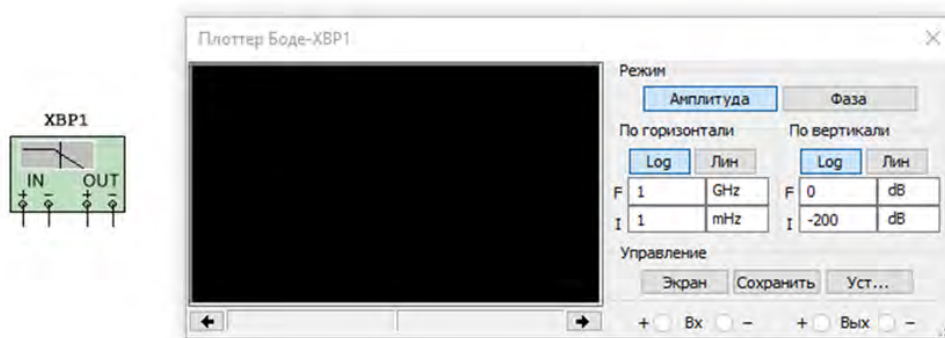


Рис.18. Плоттер Бode

**6. Частотомер** (рис.19) – прибор для определения частоты периодического процесса или частот гармонических составляющих спектра сигнала. Предназначен для анализа цепей по переменному и постоянному току.

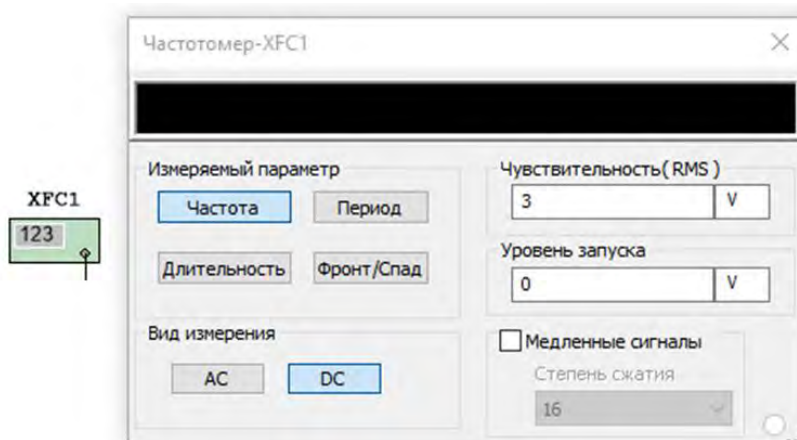


Рис.19. Частотомер

**7. Генератор слов** (рис. 20). Позволяет производить анализ цифровых схем, генерирует 32-разрядные двоичные слова и отправляет цифровые слова или битовый шаблон в схему моделируемой микросхемы.

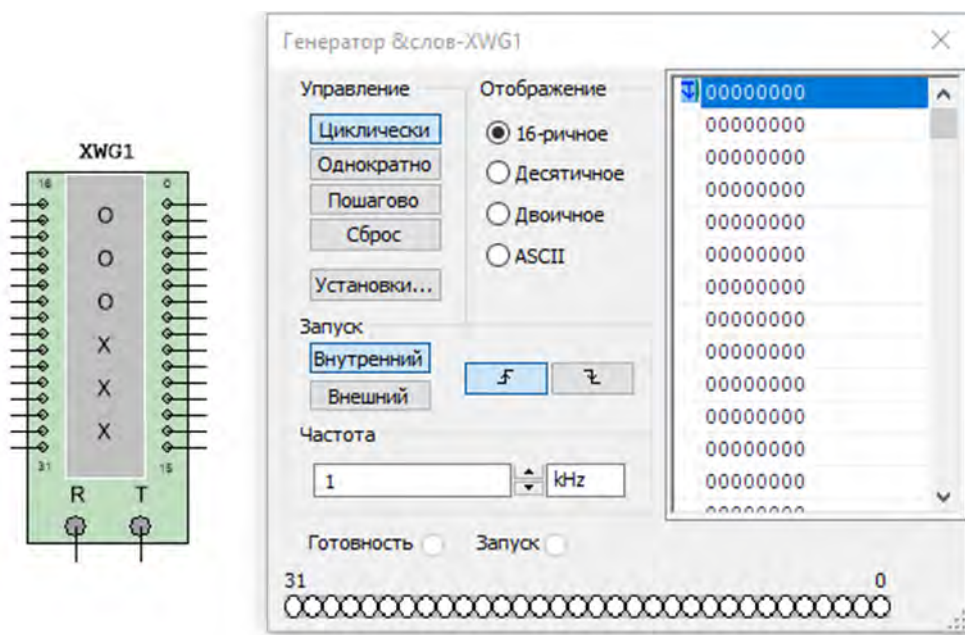


Рис.20. Генератор слов

**8. Логический преобразователь** (рис. 21). Один из виртуальных приборов, который не имеет реального аналога. Позволяет вводить и преобразовывать таблицы истинности посредством Булевой алгебры и преобразований логических выражений.

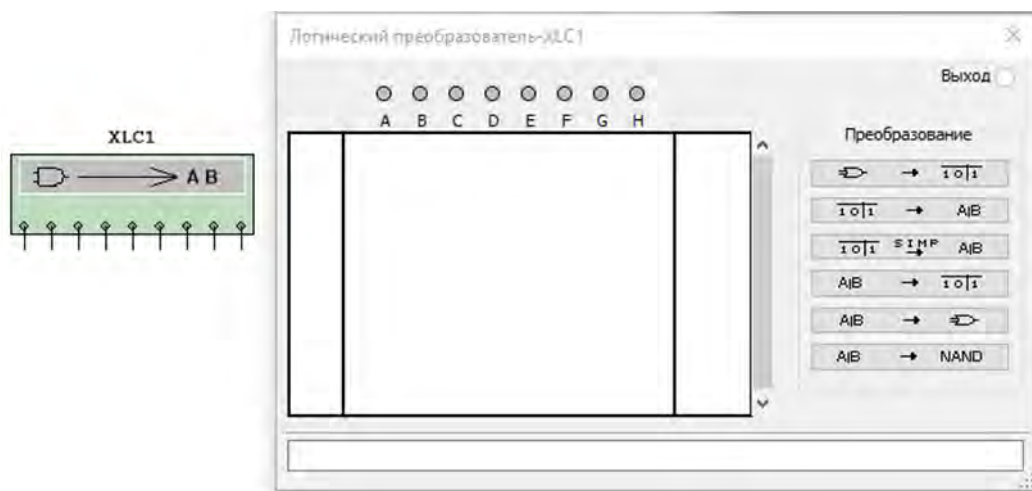


Рис. 21. Логический преобразователь

**9. Логический анализатор** (рис. 22). Отслеживает состояние логических элементов цифровых устройств и выявляет неисправности.

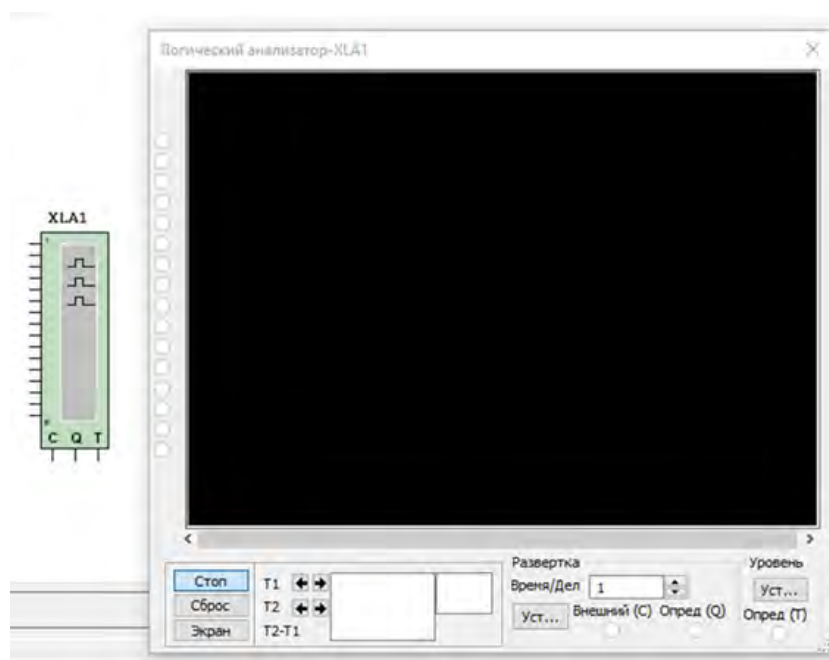


Рис.22. Логический анализатор

**10. Характериограф** (рис. 23).



Рис. 23. Характериограф

Кривые на экране отображают характеристики радиоэлектронных устройств. Также прибор оснащён курсором для проведения измерений в любой точке графика. Курсор при необходимости можно перемещать при помощи левой кнопки мыши. Измеряет вольт-амперные характеристики диодов,  $p-n-p$  и  $n-p-n$  транзисторов, **PMOS** и **NMOS** устройств. Подключается непосредственно к исследуемому устройству.

**11. Измеритель нелинейных искажений** (рис. 24). Прибор для измерения коэффициента нелинейных искажений и сигналов в радиотехнических и электронных устройствах.

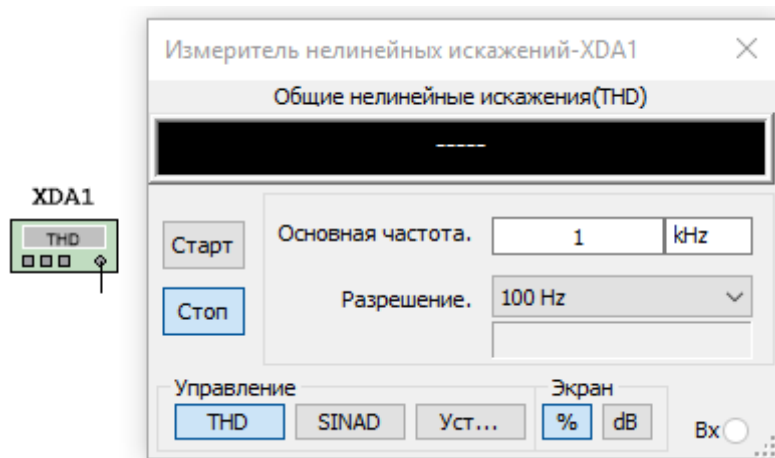


Рис. 24. Измеритель нелинейных искажений

**12. Анализатор спектра** (рис. 25). Прибор для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электрических (электромагнитных) колебаний в полосе частот. Для настройки прибора необходимо выбрать предел по амплитуде и частотный диапазон.

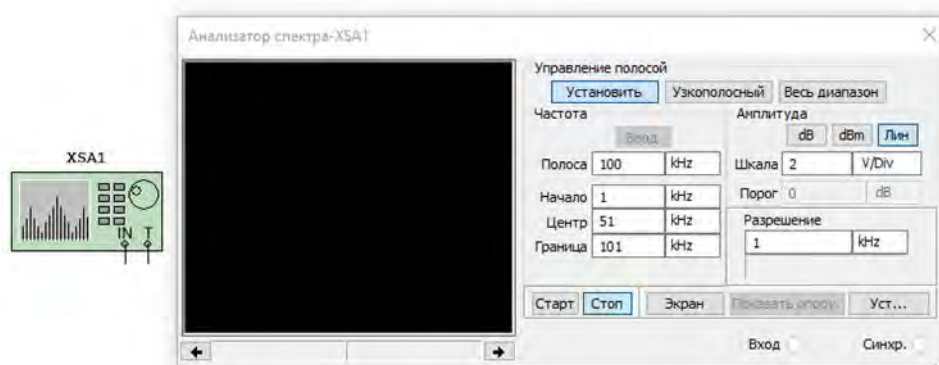


Рис. 25. Анализатор спектра

**13. Панорамный анализатор** (рис. 26). Прибор для анализа электрических цепей в обобщённом виде – в виде четырёхполюсников, имеющих два входа и два (четыре) полюса. К четырёхполюсникам могут быть отнесены усилители (активные четырёхполюсники), трансформаторы, длинные линии, фильтры.

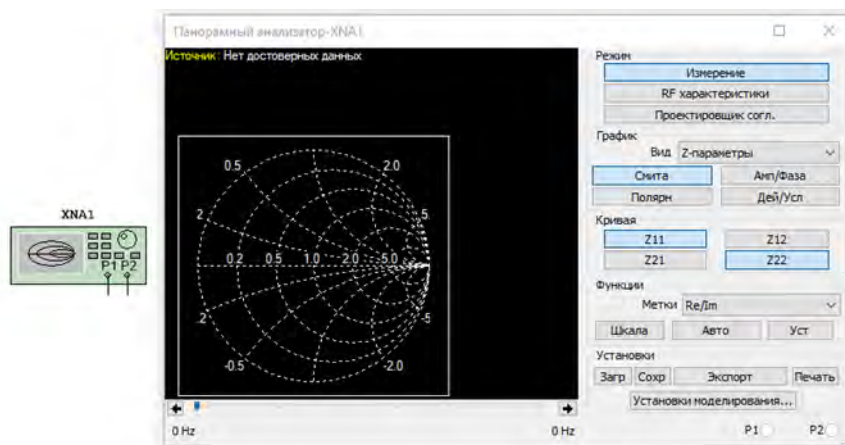


Рис. 26. Панорамный анализатор

### Анализ электрических цепей в программе *Multisim*

Программа *Multisim* предусматривает несколько режимов анализа данных эмуляции.

#### Основные виды анализа:

1. **DC** – анализ цепи постоянного тока.

Из теории электрических цепей следует, что анализ цепей постоянного тока осуществляется для резистивных схем. При проведении такого анализа конденсаторы заменяют разрывом, катушки индуктивности – коротким замыканием, сопротивление постоянному току нелинейных элементов заменяют сопротивлением элемента в рабочей точке.

2. **AC** – анализ цепей переменного тока. Построение частотных характеристик по сути и является анализом цепей на переменного тока.

3. **Transient**– анализ переходных процессов. Этот вид анализа определяет форму выходного сигнала, то есть строит график зависимости формы выходного сигнала от времени. Для того чтобы произвести анализ данных, необходимо в верхней панели выбрать вкладку «Моделирование» (рис. 27). В открывшемся окне выбрать пункт «Анализ и моделирование».

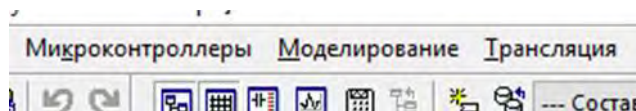


Рис.27. Моделирование

На экране появится список доступных анализов (рис.28). Для каждого вида анализа необходимо установить параметры и выбрать выходные каналы.



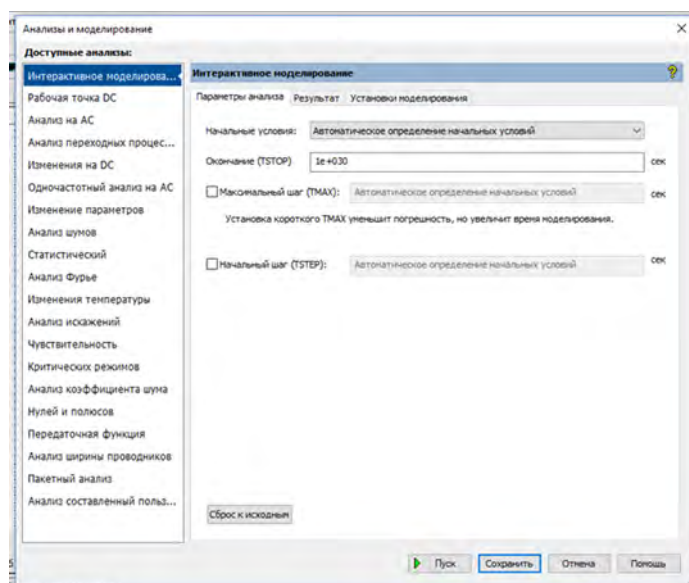


Рис. 28. Доступные анализы и их параметры

### **Общие правила моделирования**

1. Для корректного моделирования требуется, чтобы схема содержала хотя бы один элемент заземления (**Ground**).

2. Проводники и контакты устройства, которые встречаются в одной точке, считаются соединёнными. При соединении трёх концов так же, как и четырёх, используется символ соединения «узел».

3. Обязательно необходим источник сигнала, который выдаёт входной сигнал.

## **6. Методические рекомендации по проведению лабораторного практикума**

### **6.1 Лабораторная работа № 1.**

#### **Неразветвлённая цепь постоянного тока. Делитель напряжения.**

Цель работы. Изучение особенностей последовательного соединения резисторов. Исследование делителя напряжения.

#### **Оборудование:**

- ✓ Источник ЭДС– 1 шт.
- ✓ амперметр (0– 0,5)А – 1 шт.
- ✓ вольтметр (0– 25)В – 1 шт.
- ✓ вольтметр (0– 50)В – 1 шт.
- ✓ вольтметр (0– 100)В – 1 шт.
- ✓ резисторы – 3 шт.

### Основные теоретические положения

Распределение напряжения между последовательно соединёнными участками электрической цепи используется в **делителях напряжения и потенциометрах**. На рис.29.а показан делитель напряжения, состоящий из двух сопротивлений:  $R_1$  и  $R_2$ . Напряжение источника  $U$  делится на две части:  $U_1$  и  $U_2$ . Каждое из них можно использовать для работы различных приёмников энергии. В качестве потенциометра может быть применён обычный ползунковый реостат. На рис.29.б показана схема включения потенциометра в цепь.

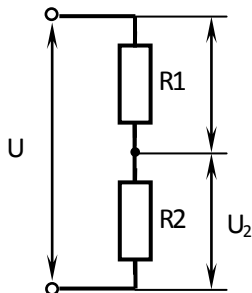


Рис. 29.а.

Делитель напряжения

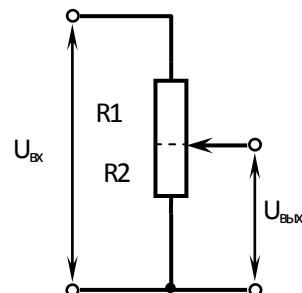


Рис.29.б.

Реостат

Полное сопротивление потенциометра делится подвижным контактом на две части: напряжения на этих частях  $U_1$  и  $U_2$  прямо пропорциональны сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$ . Напряжение, подводимое к последующему элементу схемы, можно плавно изменять от нуля до максимума, равного напряжению источника  $U$ .

Делители напряжения широко используются в электронных схемах, например, для питания схем на транзисторах. Транзисторы в общем случае требуют два источника питания: применение делителей напряжения позволяет обходиться одним источником.

Можно предложить много других вариантов применения делителя напряжения. Например, если в качестве  $R_2$  взять резистор с регулируемым сопротивлением, то получим схему с управляемым выходом. Входное напряжение и сопротивление верхней части резистора могут представлять собой, скажем, выход усилителя, а сопротивление нижней части – вход последующего каскада. В этом случае можно определить, что поступит на вход последнего каскада.

### Экспериментальная часть

1. Записать технические характеристики измерительных приборов.
2. Изучить и собрать электрическую цепь (рис. 30).

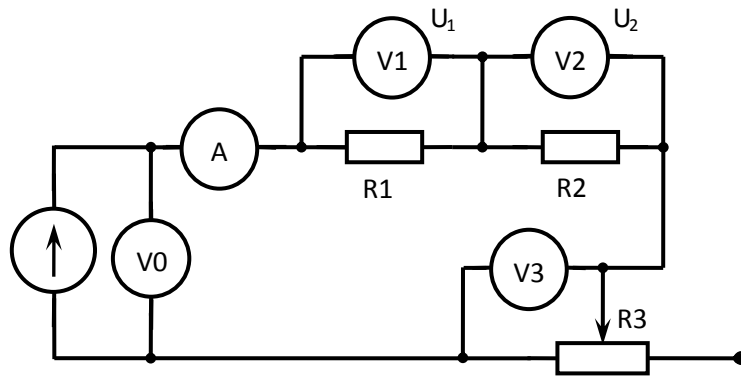


Рис. 30. Пример экспериментальной электрической схемы

3. Включить стенд и подать напряжение в схему от источника  $E$  30 В. Для четырёх-пяти значений напряжения, устанавливаемых через 5 В, снять показания приборов и записать в Таблицу 4. Сопротивление резистора  $R_3$  установить  $40 \div 60$  Ом.

4. Произвести расчёты.

**Расчётные формулы:**

$$R = U / I;$$

$$P = I_2 \cdot R;$$

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 = U / I;$$

$$P = I_2 \cdot R_{\text{общ}} = U \cdot I$$

5. Убедиться, что  $U_1 / U_2 = R_1 / R_2$

Таблица 4.

Таблица измерений и расчётов

№п/	Измерения					Расчёты									
	$U$	$I$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{\text{общ}}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P$	$U_1/U_2$	$R_1/R_2$
	В	А	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	–	–
1															
2															
3															
4															

6. По данным таблицы построить графики зависимостей  $U = f(I)$ ;  $U_1 = f(I)$ ;  $U_2 = f(I)$ ;  $U_3 = f(I)$ .

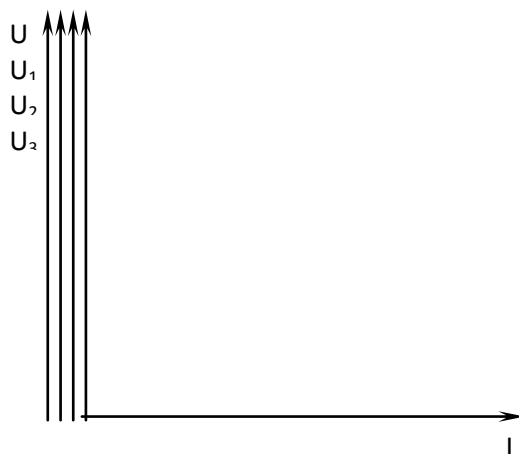


Рис. 31. Координатные оси для построения графиков

**Контрольные вопросы:**

1. Какие свойства последовательного соединения резисторов используются в делителе напряжения?
2. Привести примеры применения делителя напряжения.
3. Назначение, принцип работы и устройство реостата.
4. Вывести формулу для входного напряжения  $U_{вх}$  делителя при заданных значениях напряжения на  $R_2$  и отношении  $k = R_1 / R_2$

**6.2. Лабораторная работа №2.**

**Разветвлённая цепь постоянного тока**

Цель работы. Проверка на опыте особенностей параллельного соединения резисторов. Проверка 1-го закона Кирхгофа.

**Оборудование:**

- ✓ источник ЭДС – 1 шт.
- ✓ амперметр (0– 0,5)А – 1 шт.
- ✓ амперметр (0– 1)А – 1 шт.
- ✓ амперметр (0– 2,5)А – 1 шт.
- ✓ вольтметр (0– 50)В – 2 шт.
- ✓ резисторы – 3 шт.

**Основные теоретические положения**

Точка электрической цепи называется **узлом**, если в ней соединяются три или большее число ветвей (проводов) (рис. 32).

При постоянных токах в цепи ни в одной из её точек не могут накапливаться заряды, так как это вызвало бы изменение потенциалов точек цепи. Следовательно, электрические заряды, притекающие к какому-либо узлу в единицу времени, равны зарядам, утекающим от этого узла в ту же

единицу времени. Это положение выражает **первый закон Кирхгофа**, который формулируется так: **сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, выходящих из него.**

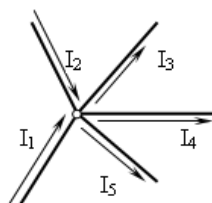


Рис.32. Электрический узел

Например, для узла А можно записать:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5,$$

или, преобразовав уравнение, получим:

$$I_1 + I_2 + (-I_3) + (-I_4) + (-I_5) = 0;$$

а в общем виде

$$\Sigma I = 0,$$

т.е. **алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.** При этом токи, направленные от узла, условно считаются отрицательными.

**Параллельным соединением резисторов** – приёмников энергии называется соединение, при котором зажим каждого из приёмников присоединён к одной точке электрической цепи (рис.33), а другой зажим каждого из тех же приёмников присоединён к другой точке цепи. Таким образом, между двумя узлами приёмников образуются параллельные ветви.

Напряжения на приёмниках одинаково и равно напряжению между узлами:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

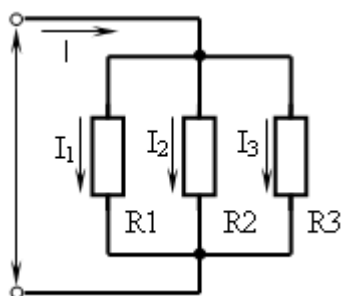


Рис. 33. Параллельное соединение резисторов



Токи в приёмниках (в данном случае в резисторах) определяются по закону Ома:

$$I_1 = U / R_1 = U \cdot g_1;$$

$$I_2 = U / R_2 = U \cdot g_2;$$

$$I_3 = U / R_3 = U \cdot g_3,$$

где  $g = 1/R$  – проводимость; единица измерения проводимости электрической цепи – **Сименс**(См).

Отсюда следует, что:

$$I_1 : I_2 : I_3 = 1/R_1 : 1/R_2 : 1/R_3 = g_1 : g_2 : g_3$$

**т.е. токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей, или обратно пропорционально их проводимостям.**

Разветвление из нескольких резисторов можно заменить эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{ЭКВ}}$ , которое определяется равенством тока  $I$  в эквивалентном сопротивлении и в разветвлении  $\Sigma I$  при одном и том же напряжении на зажимах:

$$R_{\text{ЭКВ}} = U/I = U/(I_1 + I_2 + I_3),$$

откуда эквивалентная проводимость

$$1/R_{\text{ЭКВ}} = (I_1 + I_2 + I_3)/U = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 = g_1 + g_2 + g_3 = g_{\text{ЭКВ}}$$

Преобразовав последнее уравнение, можно получить выражение для эквивалентного сопротивления при разветвлённой цепи. Например, для двух параллельно включённых резисторов:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

Для трёх параллельно включённых резисторов:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 / (R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3)$$

При  $n$  параллельных ветвях с одинаковыми сопротивлениями резисторов  $R_1$  эквивалентное сопротивление разветвлённой цепи  $R_{\text{ЭКВ}} = R_1/n$

### **Экспериментальная часть**

1. Записать технические характеристики измерительных приборов;
2. Изучить и собрать электрическую цепь (рис.34);
3. Включить стенд и подать напряжение в схему от источника  $E$  порядка  $20 \div 30$  В.

4. четырёх-пяти значений напряжения (устанавливаемых через  $4 \div 5$  В) снять показания приборов и записать в Таблицу 5.

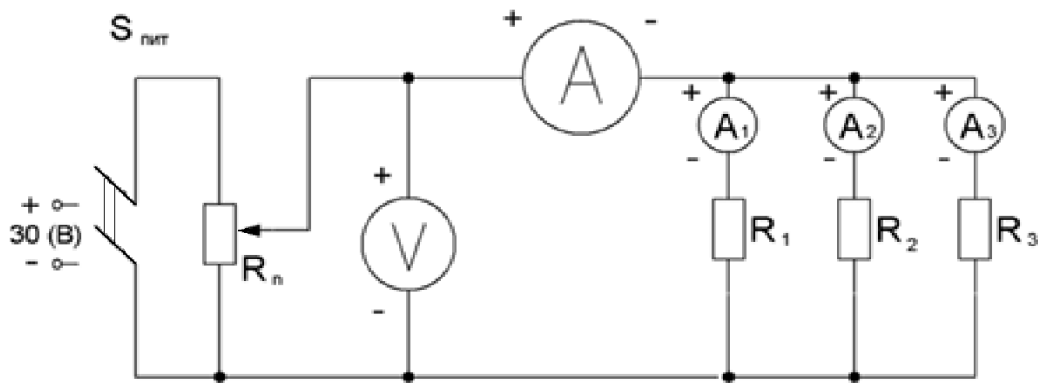


Рис. 34. Схема эксперимента электрическая принципиальная

5. Расчётные формулы:

$$g_i = I_i/U;$$

$$P_i = U \cdot I_i;$$

$$P_{\text{общ}} = U \cdot I = P_1 + P_2 + P_3$$

6. Убедиться, что:

$$g_1 + g_2 + g_3 = (I_1/U) + (I_2/U) + (I_3/U);$$

$$I = U \cdot (g_1 + g_2 + g_3);$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3;$$

$$g_1/g_2 = I_1/I_2$$

Таблица 5

Таблица измерений и расчётов

№ п/п	Измерения					Расчёты									
	U	I	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>3</sub>	g	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P	I <sub>1</sub> /I <sub>3</sub>	g <sub>1</sub> /g <sub>3</sub>
	В	А				Ом <sup>-1</sup>				Вт				-	-
1															
2															
3															
4															

7. По данным таблицы построить графики (рис.35) зависимостей

$$I = f(U): I_1 = f(U); I_2 = f(U); I_3 = f(U);$$

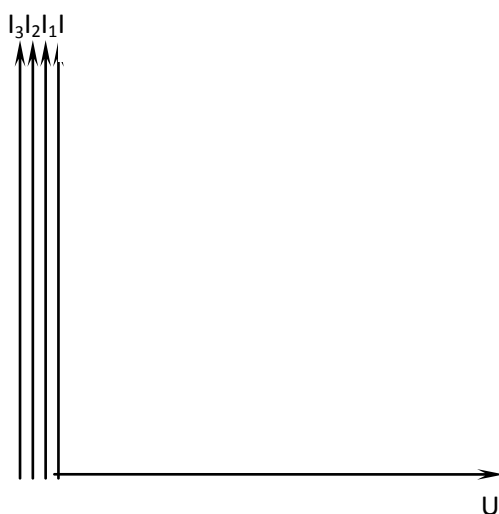


Рис. 35. Координатные оси для построения графиков

*Контрольные вопросы:*

1. Как с помощью закона Ома находить ток, напряжение и сопротивление в параллельных ветвях?
2. Объяснить различия в протекании тока в последовательных и параллельных ветвях.
3. Объяснить различия падения напряжения в последовательных и параллельных ветвях.
4. Объяснить разницу полного сопротивления в последовательных и параллельных ветвях.
5. Как можно рассчитать мощность источника напряжения тока при параллельном соединении приёмников (цепей)?
6. Что такое проводимость электрической цепи и в каких единицах измеряется?
7. Вывести формулу эквивалентного сопротивления 4-х параллельно соединённых резисторов, если величины сопротивлений этих резисторов заданы.
8. Задано эквивалентное сопротивление трёх параллельно соединённых резисторов и известны значения сопротивлений двух из них. Вывести формулу для определения величины сопротивления третьего резистора.
9. Четыре одинаковых сопротивления были подключены к источнику напряжения сначала последовательно, а затем параллельно. Как изменится мощность, потребляемая этими цепями от источника? Увеличится или уменьшится, и во сколько раз?
10. Три одинаковых резистора параллельно подключены к источнику напряжения, затем параллельно к ним был подключён ещё один резистор

с сопротивлением, в три раза меньшим. Как изменится ток, протекающий через источник в новой цепи? Увеличится или уменьшится, и во сколько раз?

### 6.3. Лабораторная работа № 3.

#### Анализ сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы. Практическое освоение основных методов расчёта сложных электрических цепей постоянного тока.

#### Оборудование:

- ✓ источник напряжения – 2 шт.
- ✓ амперметр (0–0,5)А – 3 шт.
- ✓ вольтметр (0–50)В – 2 шт.
- ✓ резисторы – 3 шт.

#### Основные теоретические положения

**Сложной электрической цепью** называют разветвлённую цепь, содержащую не менее двух источников питания, действующих в разных ветвях (рис. 1.1). Под анализом электрической цепи подразумевается определение токов (напряжений) на её участках при заданных параметрах источников и приёмников.

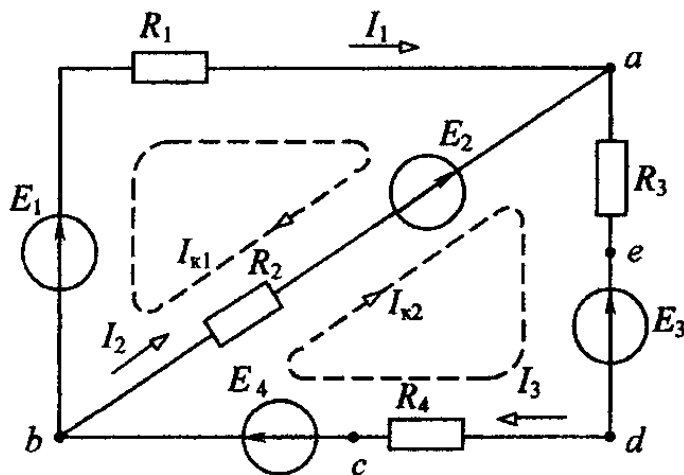


Рис. 36. Схема сложной электрической цепи

Методы расчёта сложных цепей основаны на использовании законов Ома и Кирхгофа.

Закон Ома применяют для простой одноконтурной цепи

$$I = \frac{\pm \Sigma E}{\Sigma R} \quad (1)$$

или для участка цепи.

Например, для пассивного участка цепи  $dc$ (рис.36):

$$I_3 = U_{dc}/R_4 \quad (2)$$

Обобщённый закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, выражается уравнением:

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R_{\Sigma}} \quad (3)$$

при записи которого выбирают положительное направление тока, после чего ЭДС  $E$  и напряжение  $U$  на зажимах участка цепи берут со знаком «плюс», если их направления совпадают с направлением тока, и со знаком «минус», когда их направления противоположны направлению тока.

Например, для электрической цепи, изображённой на рис. 36:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1}; I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2}; I_3 = \frac{-E_3 + E_4 + U_{ab}}{R_3 + R_4} \quad (4)$$

**Первый закон Кирхгофа:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_1^n I_k = 0 \quad (5)$$

**Второй закон Кирхгофа:** алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжения на всех участках контура:

$$\sum_1^m E_k = \sum_1^l R_k I_k \quad (6)$$

В общем случае токи сложной электрической цепи могут быть определены в результате совместного решения уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Количество уравнений ( $m$ ) должно быть равно количеству неизвестных токов цепи.

**Порядок расчёта:**

1. Произвольно намечают направления токов ветвей, и если цепь имеет  $n$  узлов, то по первому закону Кирхгофа записывают  $(n - 1)$  уравнений, так как уравнение для  $n$ -го узла является следствием предыдущих.

2. Произвольно намечают направления обхода контуров и по второму закону Кирхгофа записывают  $m - (n - 1)$  уравнений. При этом контуры выбирают так, чтобы каждый из них содержал хотя бы одну неучтенную ранее ветвь;

3. Решая систему  $m$  уравнений, находят токи. Если значения некоторых токов отрицательные, то действительные направления их будут противоположны первоначально выбранным.

Для электрической цепи рис. 1.1  $n = 2, m = 3$ , и поэтому расчёт токов цепи осуществляется путём решения следующей системы уравнений:

$$0 = I_1 + I_2 - I_3;$$



$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 ;$$

$$E_2 - E_3 + E_4 = R_2 I_2 + (R_3 + R_4) I_3 .$$

**Метод контурных токов** позволяет уменьшить общее число уравнений на  $(n - 1)$  и свести систему к числу  $m - (n - 1)$  уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа.

**Последовательность расчёта:**

1. Цепь разбивают на отдельные контуры и в каждом контуре произвольно выбирают направление условно действующего контурного тока, замыкающегося только в данном контуре.

2. Выбрав обход контуров совпадающим с направлением контурных токов, для каждого контура записывают уравнение по второму закону Кирхгофа, при этом учитывают падения напряжения на элементах рассматриваемого контура и от соседних контурных токов.

3. Решая полученную систему уравнений, находят контурные токи.

4. Действительные токи ветвей определяются алгебраическим суммированием контурных токов, протекающих в них.

Например, для электрической цепи, схема которой приведена на рис.1.1, получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} E_1 - E_2 = (R_1 + R_2) I_{k1} - R_2 I_{k2} \\ E_2 - E_3 + E_4 = -R_2 I_{k1} + (R_2 + R_3 + R_4) I_{k2} \\ I_{k1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} ; I_{k2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} \end{cases}$$

Действующие токи в ветвях:

$$I_1 = I_{k1}; \quad I_2 = I_{k2} - I_{k1}; \quad I_3 = I_{k2}.$$

**Метод наложения** основан на принципе наложения, согласно которому в линейной электрической цепи, содержащей несколько источников питания, токи ветвей рассматривают как алгебраическую сумму токов, вызываемых в этих ветвях действием каждой ЭДС в отдельности.

**Последовательность расчёта:**

1. В цепи поочередно оставляют по одному источнику питания и получают расчётные схемы, число которых равно числу источников питания (внутренние сопротивления исключённых источников оставляют в цепи);

2. Определяют токи всех ветвей расчётных схем, используя методы преобразования цепей;

3. Действительные токи ветвей находят суммированием (наложением) соответствующих токов расчётных схем с учётом их направлений.

Эффективен этот метод для расчёта цепей, содержащих небольшое число источников.

### Экспериментальная часть

1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.37, используя резисторы:  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 200 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 50 \text{ Ом}$  (рис.38).

2. Установить на зажимах источников указанные преподавателем напряжения  $E_1$ ,  $E_2$ .

3. Измерить токи ветвей.

4. Результаты измерений записать в табл.6.

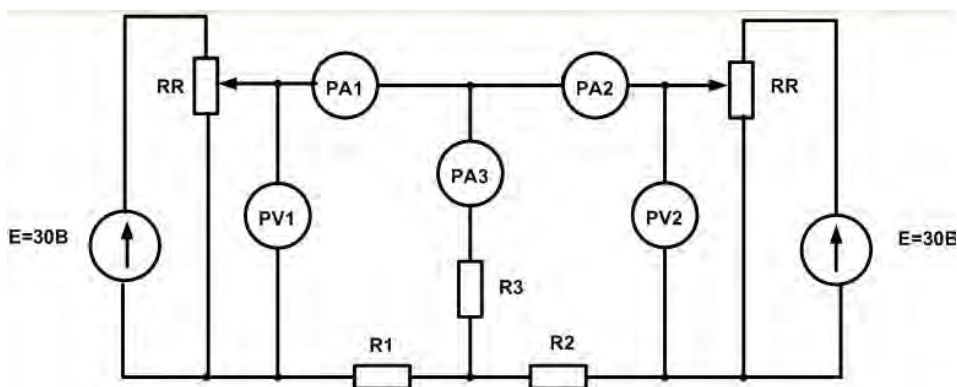


Рис. 37. Экспериментальная электрическая цепь



Рис. 38. Сборка электрической цепи на стенде «Уралочка»

Таблица 6

№ изм.	Измерения								Вычисления			Метод расчёта
	$E_1, В$	$E_2, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	
1.												Законы Кирхгофа
												Метод контурных токов
2.												Законы Кирхгофа
												Метод контурных токов
3.												Законы Кирхгофа
												Метод контурных токов
4.												Законы Кирхгофа
												Метод контурных токов

### Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
2. Как составляются уравнения и сколько независимых уравнений можно составить по первому и второму законам Кирхгофа для данной цепи?
3. В чём сущность методов контурных токов и наложения? Какова последовательность расчёта электрических цепей этими методами?
4. Когда целесообразно применять метод наложения?

### 6.4. Лабораторная работа № 4.

#### Измерение потенциалов в электрической цепи, построение потенциальной диаграммы

Цель работы. Измерение потенциалов точек в электрической цепи и сравнение их с расчётными значениями; построение потенциальной диаграммы по результатам опыта и расчёта.

#### Оборудование:

- ✓ источник электроэнергии – 2 шт.
- ✓ амперметр (0–0,5) А – 1 шт.
- ✓ вольтметр (0–25/100) В – 1 шт.
- ✓ резисторы – 4 шт.

## Основные теоретические положения

### Определение потенциалов

Источник электроэнергии имеет ЭДС и обладает внутренним сопротивлением  $r_{вн}$ . В расчётных схемах цепей источник можно изображать эквивалентной схемой с последовательным соединением ЭДС  $E$  и внутреннего сопротивления  $r_{вн}$  (если сопротивление внешней цепи значительно больше  $r_{вн}$ ). Внешнее сопротивление  $R$  (нагрузка) подключается к зажимам источника, которые на рис.39 обозначены буквами  $A$  и  $B$ .

В образовавшейся замкнутой цепи возникает ток:

$$I = E / (r_{вн} + R) \quad (7)$$

Этот ток не изменится, если потенциал одной из точек (например, точки  $A$ ) принять равным нулю  $\varphi_A$  (раньше говорили «заземлить»). При этом величины, входящие в (7), останутся прежними. Определим потенциал точки  $B$   $-\varphi_B$ . Ток проходит от точки  $A$  к точке  $B$ , и в сопротивлении  $R$  направлен от точки с более высоким потенциалом к точке с меньшим потенциалом. По закону Ома для пассивного элемента цепи  $\varphi_A - \varphi_B = I \cdot R$ . Отсюда потенциал точки  $B$   $\varphi_B = \varphi_A - I \cdot R$ . Значит, при переходе через сопротивление по направлению тока происходит уменьшение потенциала на значение  $I \cdot R$ . На внутреннем сопротивлении источника ЭДС потенциал снижается также в направлении тока, т.е.  $\varphi_C = \varphi_B - I \cdot r_{вн}$

ЭДС источника:  $E = \varphi_A - \varphi_C$ . Отсюда  $\varphi_A = \varphi_C + E$ . Из этого следует, что при переходе через источник электроэнергии по направлению ЭДС (от отрицательного к положительному полюсу) происходит увеличение потенциала на величину ЭДС источника, а при переходе от положительного к отрицательному полюсу – уменьшение.

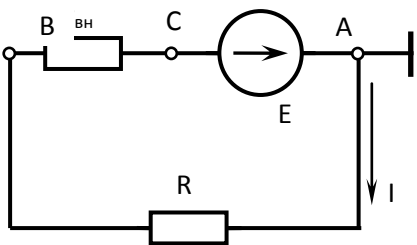


Рис.39.

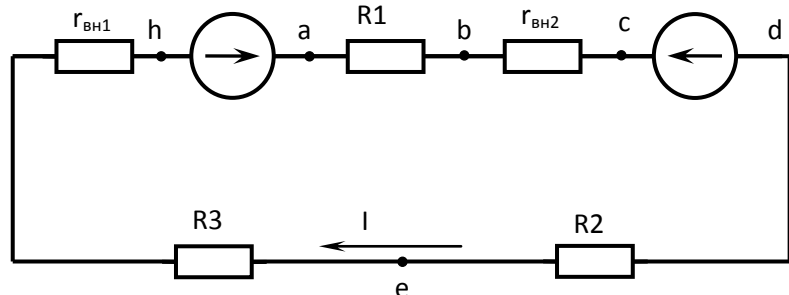


Рис.40.

### **Расчёт потенциалов**

Неразветвлённая цепь может содержать несколько ЭДС и сопротивлений (рис.40). В этом случае для определения тока алгебраическую сумму всех ЭДС нужно разделить на сумму всех сопротивлений в цепи:

$$I = \Sigma(E) / \Sigma(R)(8)$$

Пусть цепь на рис.40 имеет следующие параметры:  $E_1 = 120$  В;  $E_2 = 30$  В;  $r_{вн1} = r_{вн2} = 5$  Ом;  $R_1 = R_2 = 10$  Ом;  $R_3 = 15$  Ом. ЭДС  $E_1$  направлена по часовой стрелке, а  $E_2$  – против. Но так как  $E_1 > E_2$ , то ток совпадает по направлению с ЭДС  $E_1$ . Ток равен:

$$I = (E_1 - E_2) / (r_{вн1} + r_{вн2} + R_1 + R_2 + R_3) = 2 \text{ А}$$

Приняв  $\varphi_A = 0$ , определим потенциалы всех точек цепи:

$$\varphi_B = \varphi_A - I \cdot R_1 = 0 - 2 \cdot 10 = -20 \text{ В};$$

$$\varphi_C = \varphi_B - I \cdot r_{вн2} = -20 - 2 \cdot 5 = -30 \text{ В};$$

$$\varphi_D = \varphi_C - E_2 = -30 - 30 = -60 \text{ В};$$

$$\varphi_E = \varphi_D - I \cdot R_2 = -60 - 2 \cdot 10 = -80 \text{ В};$$

$$\varphi_G = \varphi_E - I \cdot R_3 = -80 - 2 \cdot 15 = -110 \text{ В};$$

$$\varphi_H = \varphi_G - I \cdot r_{вн1} = -110 - 2 \cdot 5 = -120 \text{ В};$$

$$\varphi_A = \varphi_H + E_1 = -120 + 120 = 0$$

*Примечание.* В реальной цепи отсутствуют точки С и Н. Они введены в расчёт для удобства и графического изображения.

### **Построение потенциальной диаграммы**

Распределение потенциалов вдоль контура цепи можно изобразить графически на **потенциальной диаграмме**. Для её построения (рис.41) по оси абсцисс в масштабе откладывают сопротивления участков в последовательности их обхода, а по оси ординат – значения потенциалов.



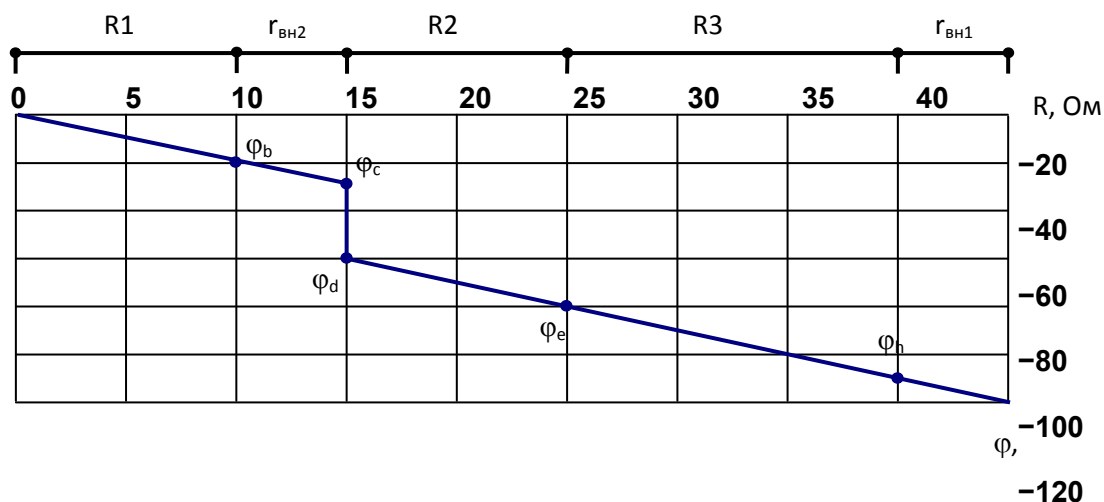


Рис. 41. Потенциальная диаграмма

При обходе контура по часовой стрелке от заземлённой точки А (рис. 40) проходят сопротивления  $R_1, r_{вн2}, R_2, r_{вн1}$ . В этом порядке сопротивления отложены по оси абсцисс. Выше этой оси откладываются положительные потенциалы. В данном примере контур обходят по направлению движения тока. Поэтому на всех сопротивлениях потенциал снижается. В первом источнике он возрастает на величину ЭДС  $E_1$ , а во втором – уменьшается на величину ЭДС  $E_2$ .

Диаграмма для всех сопротивлений имеет вид наклонной прямой, а для источника ЭДС – вид вертикальной прямой. Потенциал любой точки электрической цепи равен напряжению между этой точкой и землёй, для измерения потенциала пользуются вольтметром, один зажим которого присоединяют к заземлённой точке, а другой – к точке, потенциал которой необходимо измерить.

### Экспериментальная часть

1. Записать технические характеристики измерительных приборов.
2. Установить и измерить ЭДС источников электрической энергии  $E_1$  и  $E_2$ ; измерить внутренние сопротивления источников; выбрать четыре резистора с известными номиналами. Данные записать в Таблицу 7.

Таблица 7.

Таблица измерений

$E_1$	$E_2$	$r_{01}$	$r_{02}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

3. Собрать и изучить схему электрической цепи (рис.42.)

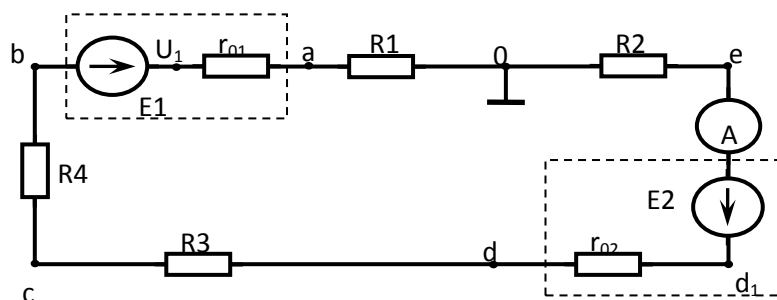


Рис. 42.

4. Замкнуть тумблер SA, вольтметром поочерёдно измерить потенциалы точек и записать показания в Таблицу 8.

Таблица 8.

Таблица показаний

Точка	<i>a</i>	<i>a</i> <sub>1</sub>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>d</i> <sub>1</sub>	<i>e</i>	0
Обозначение	$\varphi_a$	$\varphi_{a1}$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_{d1}$	$\varphi_e$	$\varphi_0$
Значение (В)								

5. Определить потенциалы точек расчётным путём. Результаты расчёта потенциалов внести в Таблицу 9.

Таблица 9.

Таблица вычислений

Точка	<i>a</i>	<i>a</i> <sub>1</sub>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>d</i> <sub>1</sub>	<i>e</i>	0
Обозначение	$\varphi_a$	$\varphi_{a1}$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_{d1}$	$\varphi_e$	$\varphi_0$
Значение (В)								

6. По полученным опытными и расчётными данными построить потенциальные диаграммы  $\varphi = f(R)$  в одной системе координат (рис. 43).

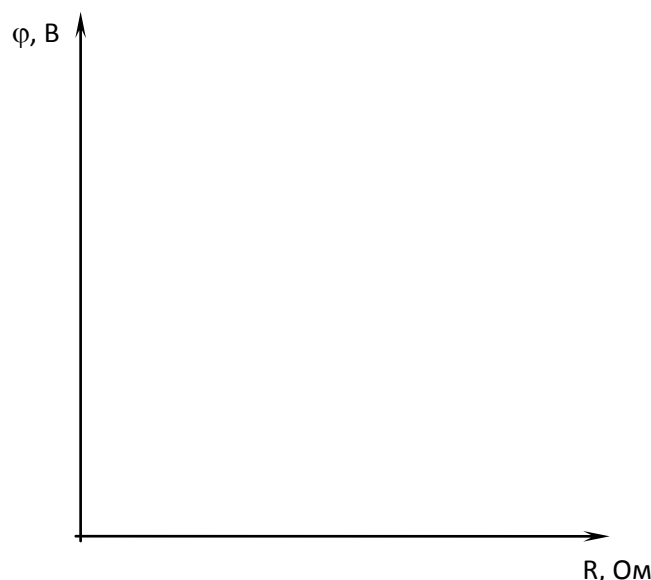


Рис. 43. Координатные оси для построения графика потенциальной диаграммы

**Контрольные вопросы:**

1. Как определяется ток в цепи с последовательным соединением нагрузок?
2. Что представляет собой потенциальная диаграмма электрической цепи? Привести примеры её применения.
3. Потенциал какой точки электрической цепи целесообразно принимать за ноль?
4. Как изменяется потенциал цепи при переходе через источник энергии против направления ЭДС?
5. Как изменяется потенциал цепи при переходе через сопротивление по направлению тока?

**6.5. Лабораторная работа № 5.**

**Изучение метода узлового напряжения**

Цель работы. Опытная проверка метода узлового напряжения.

**Оборудование:**

- ✓ источник электроэнергии – 2 шт.
- ✓ амперметр (0 ÷ 0,5) А – 3 шт.
- ✓ вольтметр (0 ÷ 25) В – 1 шт.
- ✓ вольтметр (0 ÷ 100) В – 1 шт.

## Основные теоретические положения

### Определение узлового напряжения и токов

Потребители электроэнергии обычно соединяются параллельно. Часто общая мощность включённых потребителей становится больше той, которую может отдать в сеть источник энергии. В таких случаях для увеличения потребляемой мощности при сохранении неизменного напряжения дополнительные источники энергии включаются параллельно друг другу. При этом получается сложная электрическая цепь, представленная на рис.44. В ней имеется два узла: А и В, к которым подключаются источники с ЭДС  $E_1, E_2$  и  $E_3$ . Сопротивления  $r_1, r_2$  и  $r_3$  приняты за внутренние сопротивления источников, а сопротивление  $R$  – за эквивалентное сопротивление всех приёмников энергии. Напряжение между узлами А и В называется **узловым напряжением**. Оно равно разности потенциалов узловых точек, т.е.  $U = \varphi_A - \varphi_B$ .

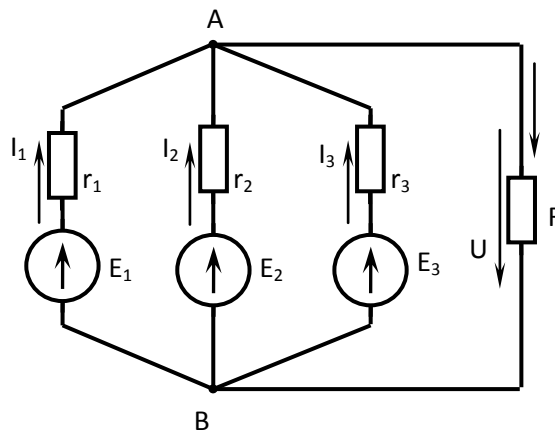


Рис. 44. Сложная электрическая цепь

Для расчёта таких цепей обычно пользуются методом узлового напряжения. Выведем формулу этого напряжения.

Если ЭДС  $E_1, E_2$  и  $E_3$  больше узлового напряжения, то все источники ЭДС работают в режиме генератора, а токи  $I_1, I_2$  и  $I_3$  направлены к узлу А.

При этом ток приёмников по первому закону Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (9)$$

Для контура, образованного первой ветвью с сопротивлением  $r_1$  и четвёртой ветвью с сопротивлением  $R$ , составим уравнение по второму закону Кирхгофа:  $E_1 = I_1 \cdot r_1 + U$ . Отсюда ток первого источника:

$$I_1 = (E_1 - U) / r_1 = (E_1 - U) \cdot g_1, \quad (10)$$

где  $g_1 = 1/r_1$  – проводимость первой ветви.

Аналогично токи второго и третьего источников:

$$I_2 = (E_2 - U) \cdot g_2 \quad (11)$$

$$I_3 = (E_3 - U) \cdot g_3 \quad (12)$$

Ток приёмников энергии

$$I = U/R = U \cdot G \quad (13)$$

Подставив в (9) выражения для токов (10)...(13), получим:

$$(E_1 - U) \cdot g_1 + (E_2 - U) \cdot g_2 + (E_3 - U) \cdot g_3 = U \cdot G$$

Раскрывая скобки и преобразовывая последнее выражение, находим  $U$ :

$$U = (E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2 + E_3 \cdot g_3) / (g_1 + g_2 + g_3 + G).$$

В общем виде это выражение будет иметь вид:

$$U = (\Sigma E \cdot g) / \Sigma g \quad (14)$$

Если какая-либо из ЭДС (рис. 44) имеет противоположное направление, то в (14) она войдёт с отрицательным знаком. Таким образом, узловое напряжение равно алгебраической сумме произведений ЭДС на проводимости соответствующих ветвей, делённой на сумму проводимостей ветвей. Обычно бывают заданы все ЭДС и сопротивления.

Находят токи методом узлового напряжения следующим образом:

1. По (14) определяют узловое напряжение;
2. Пользуясь (10)... (13), определяют токи в ветвях.

### ***Анализ расчётных формул***

Проведя анализ формул (9)... 14), можно сделать следующие выводы:

1. При параллельном соединении источники имеют одинаковые токи ( $I_1 = I_2 = I_3$ ), если они имеют одинаковые ЭДС ( $E_1 = E_2 = E_3$ ) и внутренние сопротивления ( $r_1 = r_2 = r_3$ ) или проводимости

$$(g_1 = g_2 = g_3).$$

2. При равных ЭДС, но различных внутренних сопротивлениях наибольший ток имеет источник с меньшим внутренним сопротивлением, т.е. с большей проводимостью.

3. Если ЭДС источника равна узловому напряжению  $U$ , то его ток  $I = (E - U) \cdot g = 0$ .

4. Если ЭДС источника окажется ниже узлового напряжения, то ток в его ветви будет направлен навстречу ЭДС. В этом случае источник работает в режиме потребителя энергии (например, при зарядке аккумуляторов).

5. Если увеличить ЭДС первого источника, то возрастут его ток  $I_1 = (E_1 - U) \cdot g_1$  и узловое напряжение. В результате этого снизятся токи других источников.

### Экспериментальная часть

1. Записать технические характеристики измерительных приборов.
2. Измерить ЭДС исследуемых источников электрической энергии.
3. Измерить сопротивлений резисторов омметром.
4. Собрать и изучить схему электрической цепи (рис.45)

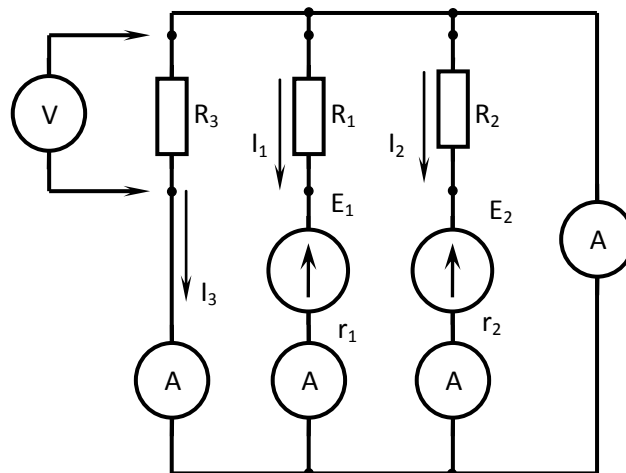


Рис. 45. Экспериментальная электрическая цепь

5. Вольтметром  $V_1$  измерить напряжение на резисторах  $R_1, R_2$ , и  $R_3$ .
6. ЭДС источника  $E_2$  установить порядка  $(45 \div 60)$  В.
7. Значения внутренних сопротивлений  $r_{01}$  и  $r_{02}$  – по указанию преподавателя.
8. Результаты наблюдений записать в Таблицу 10.



Таблица измерений и расчётов

Измерения											Расчёты						
$E_1$	$E_2$	$r_{01}$	$r_{02}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{AB}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	
В	В	Ом	Ом	А	А	А	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт	Ом	Ом	Ом	
																	МУН
																	МКТ

9. Произвести расчёт токов методом узлового напряжения (МУН).

10. Произвести расчёт токов методом контурных токов (МКТ).

Результаты аналитических расчётов токов двумя способами записать в таблицу 10.

### Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяется параллельное соединение источников электроэнергии?

2. Как можно определить внутреннее сопротивление источника напряжения?

3. В чём сущность метода узлового напряжения?

4. Как определяются токи в ветвях по методу узлового напряжения, если заданы значения ЭДС и сопротивлений, входящих в эти ветви?

5. Какие существуют ещё методы расчёта цепей с параллельными ветвями?

6. Цепь состоит из четырёх параллельных ветвей. Три из них содержат источник ЭДС и сопротивления, четвёртая – только сопротивление. В одной из ветвей с ЭДС ток направлен противоположно ЭДС. Что надо сделать, чтобы направление тока совпадало с направлением ЭДС?

Как изменятся токи в остальных ветвях?

7. Как определяется эквивалентная проводимость нескольких параллельных ветвей? Значения сопротивлений ветвей известны.

## 6.6. Лабораторная работа № 6.

### Преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду

Цель работы. Опытная проверка метода узлового напряжения.

#### **Оборудование:**

1. Источник электрической энергии постоянного тока (= 30 В).
2. Магазины сопротивлений (резисторов) – 3 шт.
3. Мультиметр – 3 шт.
4. Реостат (потенциометр).

#### **Основные теоретические положения**

На рис. 46 дана электрическая цепь с одним источником, широко применяемая в области электрических измерений. Особенностью этой цепи является наличие в ней соединений, называемых «треугольником» и «звездой».

*Треугольником сопротивлений* называется замкнутый контур с тремя узлами. В схеме на рис.46.два треугольника с сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4, R_5, R_3$ . Причём, нет ни одного элемента, который был бы соединён с другим последовательно или параллельно.

*Звездой сопротивлений* называют соединение трёх ветвей, имеющих общий узел.

На рис.46 звезду сопротивлений образуют ветви с сопротивлениями  $R_2, R_3, R_5$  и  $R_1, R_3, R_4$ . Любой треугольник сопротивлений можно заменить эквивалентной звездой. В результате замены получается другая схема, позволяющая упростить расчёт. Например, схема рис. 46 после замены треугольника сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$  эквивалентной звездой  $R_A, R_B, R_C$  упрощается (рис.47) и содержит только последовательно и параллельно соединённые участки.

Эквивалентность треугольника и звезды сопротивлений заключается в том, что их замена не изменяет потенциалов узловых точек (на рис.46 точек А, В, С), являющихся вершинами треугольника и эквивалентной звезды. Не изменяются также токи, напряжения и мощности в остальной части схемы, не затронутой преобразованием. Для перехода от треугольника сопротивлений к эквивалентной звезде пользуются следующими формулами:

$$\begin{aligned}R_A &= R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2 + R_3); \\R_B &= R_2 \cdot R_3 / (R_1 + R_2 + R_3); \\R_C &= R_1 \cdot R_3 / (R_1 + R_2 + R_3)\end{aligned}\quad (15)$$

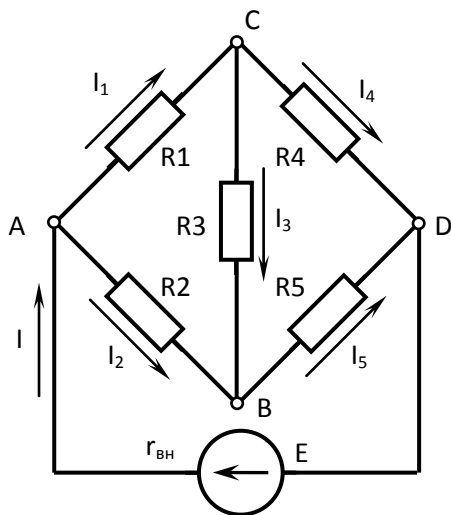


Рис. 46

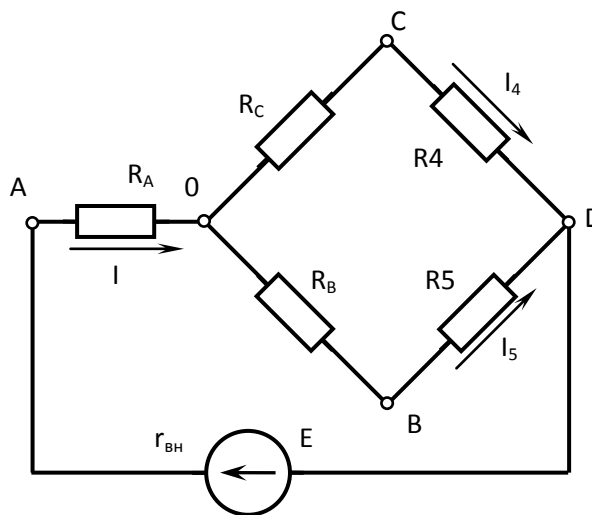


Рис. 47

Сопротивление  $R_A$  луча А равно произведению двух сопротивлений треугольника, сходящихся в узле А, делённому на сумму всех сопротивлений треугольника. Так же определяются сопротивления  $R_B$  и  $R_C$ .

Теперь в схеме на рис.47 легко рассчитать токи  $I$ ,  $I_4$  и  $I_5$ , которые не изменились после замены треугольника эквивалентной звездой. Остальные токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  находят из уравнений по законам Кирхгофа, составленных для исходной схемы (рис. 46).

В некоторых схемах целесообразна замена трёхлучевой звезды эквивалентным треугольником. Тогда пользуются следующими формулами:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_A + R_C + R_A \cdot R_C / R_B; \\ R_2 &= R_A + R_B + R_A \cdot R_B / R_C; \\ R_3 &= R_C + R_B + R_C \cdot R_B / R_B \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, сопротивление стороны эквивалентного треугольника равно сумме сопротивлений двух лучей звезды, присоединённых к тем же вершинам, что и сторона треугольника, и их произведения, делённого на сопротивление третьего луча звезды.

### Экспериментальная часть

1. Определить размещение приборов на столе.
2. Собрать электрическую схему цепи (рис. 48).
3. Подключить резисторы заданных величин сопротивления  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ ,  $R_4$  и  $R_5$ .
4. Определить цену деления приборов.

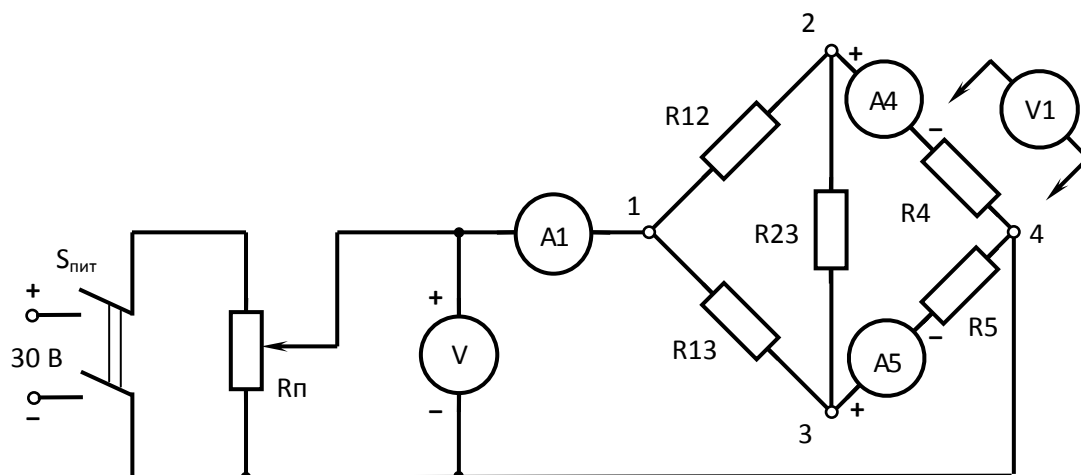


Рис. 48

5. Включить тумблером  $S_{\text{пит}}$  блок питания постоянного напряжения. При 4-х значениях напряжения  $U_1$  переносным вольтметром измерить напряжения между узловыми точками  $U_{12}, U_{23}, U_{13}$  и  $U_{14}$ , снять показания амперметров. Результаты записать в Табл. 11.

6. Отключить блок питания, вычислить по формулам сопротивления резисторов эквивалентной звезды  $R_1, R_2, R_3$  и записать в Табл. 11.

7. Собрать электрическую схему (рис. 49) и подключить на магазинах резисторов вычисленные значения сопротивления эквивалентной «звезды»  $R_1, R_2, R_3$

8. Включить тумблером  $S_{\text{пит}}$  блок питания, установить поочередно заданные ранее значения напряжений.

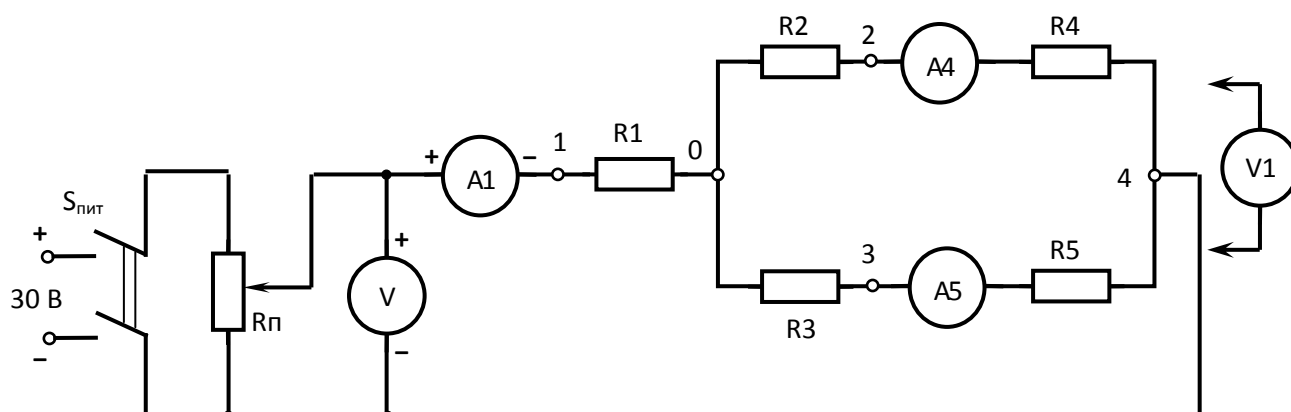


Рис. 49

9. Убедиться, что показания амперметров (для каждого  $U_1$ ) остались прежними.

10. Измерить переносным вольтметром напряжения между узловыми точками  $U_{12}, U_{23}, U_{13}$  и  $U_{14}$ . Убедиться, что показания для каждого  $U_1$

остались прежними, что свидетельствует о правильности определения сопротивлений эквивалентной звезды.

**11.** Измерить переносным вольтметром напряжения на  $R_1, R_2, R_3$ . Результаты записать в Табл. 11.

**12.** По измеренным напряжениям  $U_1, U_2, U_3$  и токам (для каждого случая) на основании закона Ома для участка цепи определить  $R_1, R_2, R_3$  и записать в графу «Опыт» Табл. 11.

**13.** Полученные результаты вычисления и опыта сравнить.

**14.** Сделать выводы по работе.

**Расчётные формулы:**

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1}; R_2 = \frac{U_2}{I_2}; R_3 = \frac{U_3}{I_3}.$$

Измерения по схеме на рис. 48 и определение сопротивлений эквивалентной звезды произвести с использованием Таблицы 11.

Таблица 11

Таблица измерений и вычислений

№ П/П	Установлено				Измерено							Вычислено			Опыт		
	$U_1$	$R_{12}$	$R_{23}$	$R_{13}$	$I_1$	$I_4$	$I_5$	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{14}$	$U_{23}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
	В	Ом	Ом	Ом	А	А	А	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1																	
2																	
3																	
4																	

Измерения по схеме на рис.49. и определение относительных отклонений по сравнению со схемой на рис.48.

Таблица измерений и вычислений

	Измерено							Вычислено						
	$U_1$	$I_1$	$I_4$	$I_5$	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{14}$	$U_{23}$	$\Delta I_1$	$\Delta I_4$	$\Delta I_5$	$\Delta U_{12}$	$\Delta U_{13}$	$\Delta U_{14}$
	В	А	А	А	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1														
2														
3														
4														

**Контрольные вопросы:**

1. Какое соединение резисторов называется соединением «звездой», какое – «треугольником»?

2. Что называется эквивалентной заменой?

3. Напишите формулу для эквивалентной замены сопротивлений «треугольника» сопротивлениями «звезды».

4. Напишите формулу эквивалентной замены сопротивлений «звезды» сопротивлениями «треугольника».

5. Какое условие должно обязательно соблюдаться при замене сопротивлений «треугольника» сопротивлениями «звезды» (или наоборот)?

**6.7. Лабораторная работа № 7.****Изучение принципа наложения токов**

Цель работы. Опытная проверка метода расчёта электрических цепей по принципу наложения токов.

**Оборудование:**

- ✓ источники электрической энергии – 2 шт.;
- ✓ магазины сопротивлений (резисторов) – 3 шт.
- ✓ мультиметры – 3 шт.
- ✓ перекидные ключи – 2 шт.



## Основные теоретические положения

Метод наложения токов применяется для определения токов в цепи, в которой одновременно действуют несколько ЭДС. Этот метод применим только для линейных цепей. Сущность метода наложения (*метода суперпозиции*) заключается в том, что **ток в любой ветви цепи с постоянными сопротивлениями равен алгебраической сумме частичных токов, создаваемых в этой ветви каждой из ЭДС в отдельности**. Например, ток  $I_3$  (рис.50,а) равен алгебраической сумме двух токов:  $I'_3$ (рис.50, б), возникающего в ветви  $R_3$  от действия только ЭДС  $E_1$ , и  $I''_3$ (рис.50, в), возникающего в этой же ветви от действия ЭДС  $E_2$ . При расчёте цепей по методу наложения поступают следующим образом.

*абв*

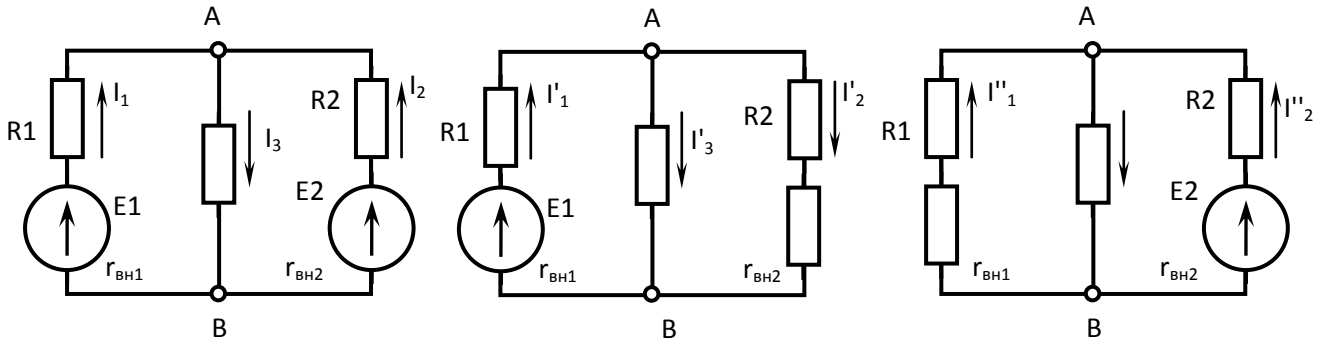


Рис. 50.

В схеме оставляют первый источник электрической энергии с ЭДС  $E_1$ ; остальные источники отключают, оставляя в схеме их внутренние сопротивления. Обычно получается цепь с последовательно-параллельным соединением сопротивлений, в этой цепи легко определить так называемые **частичные токи, вызванные** действием только первого источника ЭДС. Их обозначают  $I'_1$ ;  $I'_2$ ;  $I'_3$  и т. д.

Затем в схеме оставляют только второй источник энергии с ЭДС  $E_2$ ; остальные источники исключают, оставляя в схеме их внутренние сопротивления. В результате расчёта определяют частичные токи от действия второго источника ЭДС:  $I''_1$ ;  $I''_2$ ;  $I''_3$  и т. д.

Аналогично производят расчёты для всех ЭДС схемы.

Алгебраически сложив частичные токи, определяют действительные значения токов на каждом участке сложной цепи, когда все ЭДС действуют одновременно. Знак, который ставится перед частичным током при алгебраическом сложении, зависит от того, совпадает ли направление этого тока с выбранным за положительное направление этого тока или противоположно ему.

Метод наложения может быть использован для анализа режимов работы электрических цепей при изменении их параметров. Покажем это на примере цепи на рис. 50.

Допустим, что при определённых параметрах цепи установились токи  $I_1, I_2$  и  $I_3$ . Требуется определить характер изменения этих токов при увеличении ЭДС  $E_1$  до значения  $E'_1$

Такое изменение ЭДС равносильно включению в первую ветвь дополнительной ЭДС  $E_{\text{доп}} = E'_1 - E_1$ . Для анализа режимов удалим из цепи все источники, кроме источника с ЭДС  $E_{\text{доп}}$ , и определим действительные направления дополнительных токов от этого источника. Легко установить, что дополнительные токи в первой и в третьей ветвях совпадут по направлению с токами в этих ветвях  $I_1$  и  $I_3$ , а дополнительный ток во второй ветви будет направлен противоположно току  $I_2$ . Следовательно, с увеличением ЭДС  $E_1$  токи  $I_1$  и  $I_3$  будут возрастать, а ток  $I_2$  сначала уменьшится, и при некотором значении ЭДС  $E_1$  окажется равным нулю, а при дальнейшем увеличении  $E_1$  изменит своё направление и по абсолютному значению будет возрастать.

### Экспериментальная часть

1. Определить размещение приборов на столе.
2. Собрать электрическую схему цепи (рис. 51)
3. Определить цены делений приборов.
4. Подключить резисторы заданных величин сопротивлений.
5. При нейтральном (отключённом) положении ключей SA1 и SA2 переносным вольтметром измерить ЭДС источников и записать результаты в табл. 13.

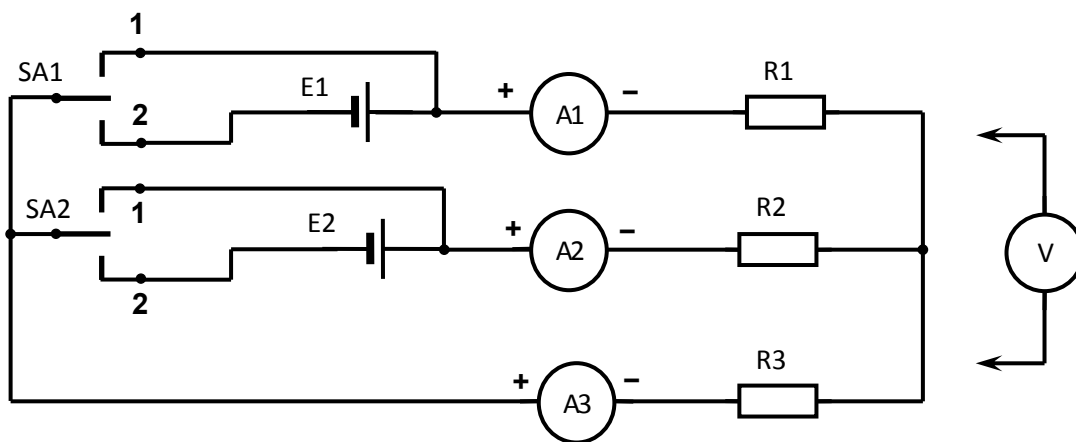


Рис. 51

6. Перевести ключи SA1 и SA2 в положение 2: записать в табл.13 величины токов  $I_1, I_2$  и  $I_3$ . в строку «Из опыта», проверив при этом баланс токов:  $I_3 = I_1 + I_2$ .

7. Ключ SA1 оставить в положении 2, а ключ SA2 перевести в положение 1, после чего записать значения частичных токов  $I'_1; I'_2; I'_3$  в строку «Из опыта».

8. Ключ SA1 перевести в положение 1, а ключ SA2– в положение 2: записать значения частичных токов  $I''_1; I''_2; I''_3$  в строку «Из опыта».

9. По измеренным частичным токам определить методом наложения значения полных токов  $I_1, I_2$  и  $I_3$ , результаты записать во вторую строку таблицы.

10. Третья графа заполняется на основании аналитического расчёта, результаты аналитического расчёта сравниваются с опытными данными.

Таблица13.

Таблица измерений и расчётов

Способ определения величин	$E_1$	$E_2$	$I'_1$	$I'_2$	$I'_3$	$I''_1$	$I''_2$	$I''_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
	В	В	А	А	А	А	А	А	А	А	А
Из опыта											
Наложение измеренных токов											
Расчётные											

**Контрольные вопросы:**

1. Какой ток называют «частичным»?
2. Что требуется сделать в схеме, чтобы определить один из частичных токов?
3. Чему равен ток ветви?

**6.8. Лабораторная работа № 8.**

**Опытная проверка расчёта тока в диагонали мостовой схемы по методу эквивалентного генератора**

Цель работы. Опытная проверка метода расчёта электрических цепей по принципу эквивалентного генератора.

### Оборудование:

- ✓ мультиметр – 3 шт;
- ✓ магазин сопротивлений (резисторов) – 1 шт;
- ✓ резисторы моста;
- ✓ ключи – 2 шт.

### Основные теоретические положения

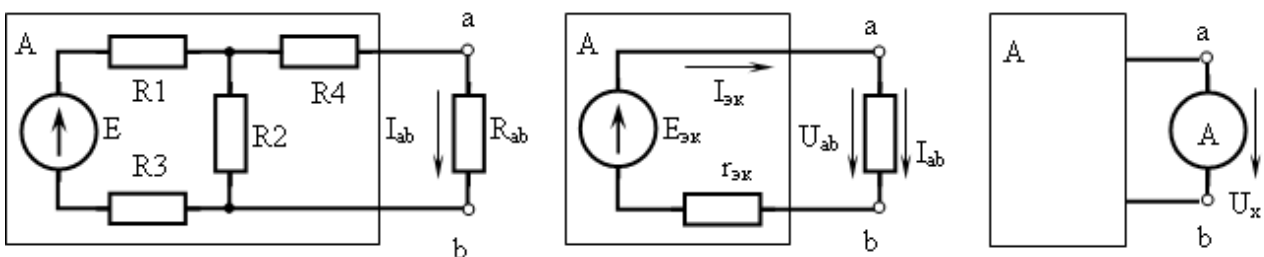
Метод эквивалентного генератора целесообразно применять в тех случаях, когда нет необходимости знать режимы всех элементов сложной цепи, но ставится задача исследовать режим работы одной определённой ветви. В этом случае мы имеем дело с двухполюсником. *Двухполюсником* называется цепь, которая соединяется с внешней цепью через два вывода (полюса). Различают активные и пассивные двухполюсники. *Активные* двухполюсники содержат источники электрической энергии, а *пассивные* их не содержат.

#### Обоснование метода

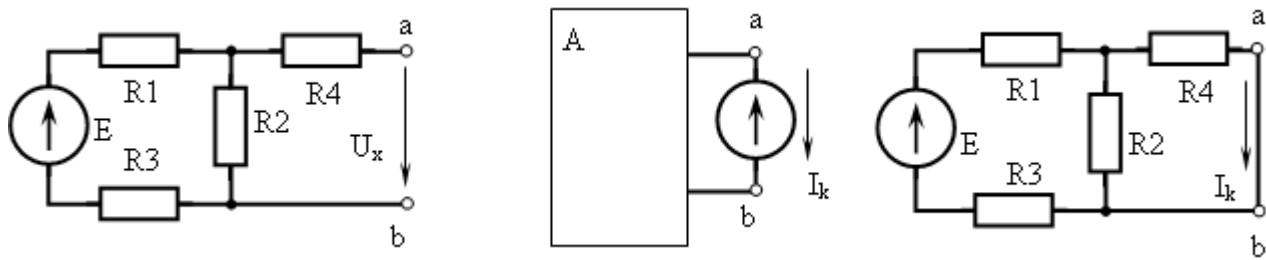
Исследуемая ветвь с сопротивлением  $R_{ab}$  (рис. 52, а) присоединяется к остальной части схемы в двух точках  $a$  и  $b$ . Эту часть схемы можно рассматривать относительно исследуемой ветви как источник с некоторой ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}}$  и некоторым эквивалентным внутренним сопротивлением (рис. 52,б). Такой условный источник электрической энергии называется *эквивалентным генератором*, или активным двухполюсником (А). Ток в исследуемой ветви можно найти из эквивалентной схемы (рис. 52,б) по закону Ома:

$$I_{ab} = E_{\text{ЭКВ}} / (r_{\text{ЭКВ}} + R_{ab}) \quad (17)$$

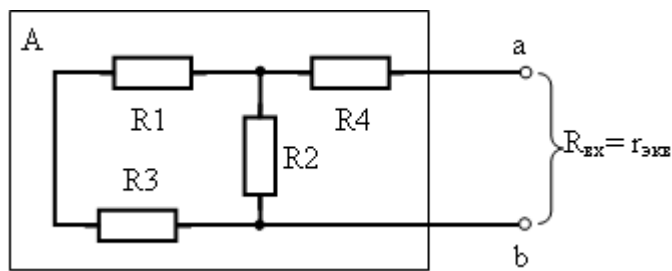
Таким образом, решение задачи по определению тока  $I_{ab}$  сводится к определению ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}}$  эквивалентного генератора и его внутреннего сопротивления  $r_{\text{ЭКВ}}$ , которое называется также *входным сопротивлением* активного двухполюсника.



а) б) в)



2) д) е)



ж)

Рис. 52

После определения  $E_{\text{ЭКВ}}$  и  $r_{\text{ЭКВ}}$ , дальнейшее исследование работы ветви  $ab$  при изменении сопротивления  $R_{ab}$  не требует громоздких вычислений, так как  $E_{\text{ЭКВ}}$  и  $r_{\text{ЭКВ}}$  остаются постоянными. Ток в ветви определяется по выражению (17) для любого значения  $R_{ab}$

### Определение ЭДС и внутреннего сопротивления эквивалентного генератора

Для определения этих величин рассматриваются два крайних режима эквивалентного генератора: **режим холостого хода** и **режим короткого замыкания**. Отсоединим исследуемую ветвь  $R_{ab}$  в точках  $a$  и  $b$ . Тогда эквивалентный генератор будет находиться в режиме холостого хода, Напряжение холостого хода  $U_x$  на внешних зажимах  $a$  и  $b$  согласно схеме на рис. 52,б, будет равно эквивалентной ЭДС:  $E_{\text{ЭКВ}} = U_x$

Напряжение холостого хода  $U_x$  можно измерить (рис.52,в) или рассчитать. Для рассматриваемой цепи:

$$U_x = I \cdot R_2 = E \cdot R_2 / (R_1 + R_2 + R_3) \quad (18)$$

Сопротивление  $R_4$  в расчёт не вошло, так как при отключенном  $R_{ab}$  ток в сопротивлении  $R_4$  также равен нулю.

Эквивалентное сопротивление  $r_{\text{ЭКВ}}$  определяют, используя режим короткого замыкания (рис.52,д и е). Ток короткого замыкания  $I_k$  выражается отношением:

$$I_k = E_{\text{ЭКВ}} / r_{\text{ЭКВ}}$$

$$\text{отсюда } r_{\text{ЭКВ}} = E_{\text{ЭКВ}} / I_{\text{К}} = U_{\text{X}} / I_{\text{К}} \quad (19)$$

Для измерения тока  $I_{\text{К}}$  можно применить схему на рис.52,д, если короткое замыкание между точками  $a$  и  $b$  реальной цепи не вызывает опасного увеличения тока в её элементах. При наличии такой опасности измеряют ток нагрузки  $I_{ab}$  и падение напряжения  $U_{ab}$  в нагрузочном сопротивлении  $R_{ab}$ , тогда внутреннее сопротивление:

$$r_{\text{ЭКВ}} = (E_{\text{ЭКВ}} - U_{ab}) / I_{ab} = (E_{\text{ЭКВ}} - U_{ab}) / I_{ab}$$

Внутреннее сопротивление генератора можно определить аналитически. Для получения расчётной схемы нужно все ЭДС активного двухполюсника принять равным нулю, замкнув накоротко точки цепи, к которым присоединены источники этих ЭДС. Тогда активный двухполюсник превращается в пассивный. Возможность этого приёма следует из схемы на рис. 52,б: при  $E_{\text{ЭКВ}} = 0$  сопротивление  $r_{\text{ЭКВ}}$  является входным сопротивлением этой схемы. В рассматриваемом примере по схеме на рис.52,ж:

$$r_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ВХ}} = (R_1 + R_3) \cdot R_2 / (R_1 + R_2 + R_3) + R_4$$

### Экспериментальная часть

1. Определить размещение приборов на столе.
2. Собрать электрическую схему цепи (рис.53), подключив сопротивления в плечах моста  $R_1 \dots R_4$  и в диагонали моста  $R_5$  со значениями, заданными преподавателем.
3. Включить источник постоянного напряжения. При отключённом ключе  $SA2$  и включённом  $SA1$  проверить правильность включения амперметра в схему.

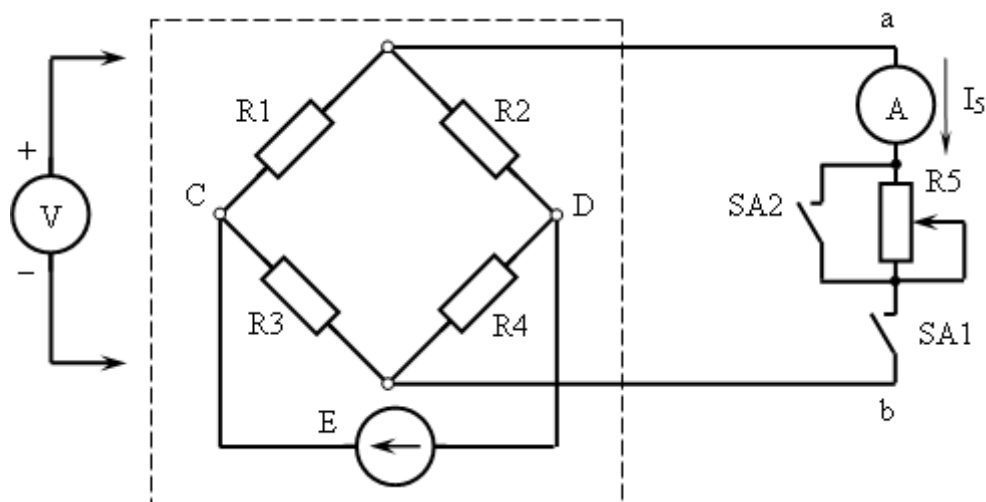


Рис. 53



4. При отключённых ключах SA1 и SA2 переносным вольтметром измерить ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}}$  эквивалентного генератора между точками *a* и *b* или на контактах разомкнутого ключа SA1. Результаты записать в Табл. 14.

Таблица 14.

Таблица измерений и расчётов

№ п/п	$E_{\text{ЭКВ}}$	$I_{\text{кз}}$	$r_{\text{ЭКВ}}$	$R_5$	$I_5, \text{A}$		$P_5$
	В	А	Ом	Ом	Измер.	Вычисл.	Вт
1							
2							
3							
4							

5. Включить ключи SA1 и SA2, измерить ток короткого замыкания  $I_{\text{кз}}$ . Результаты записать в табл. 14 .

6. Зная ЭДС эквивалентного генератора  $E_{\text{ЭКВ}}$  и ток  $I_{\text{кз}}$ , определить его внутреннее сопротивление  $r_{\text{ЭКВ}}$ . Результат записать в табл. 14.

7. При четырёх заданных преподавателем значениях  $R_5$  измерить ток  $I_5$ .

Результаты записать в табл. 14.

8. Вычислить ток  $I_5$  по формуле  $I_5 = E_{\text{ЭКВ}} / (R_5 + r_{\text{ЭКВ}})$ , записать в табл. 14. Результаты, полученные опытом и расчётом, сравнить.

9. Аналитически определить  $E_{\text{ЭКВ}}$  и  $r_{\text{ЭКВ}}$ .

**Расчётные формулы:**

$$r_{\text{ЭКВ}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) + R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4)$$

$$U_{ab} = E_{\text{ЭКВ}} = E \cdot (R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3) / [(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)]$$

*Примечание.* При равенстве произведений значений сопротивлений противоположных сторон моста напряжение между точками *a* и *b* равно нулю. Следовательно, в этом случае равен нулю и ток  $I_5$

10. Построить графики зависимостей  $I_5 = f(R_5)$  и  $P_5 = f(R_5)$

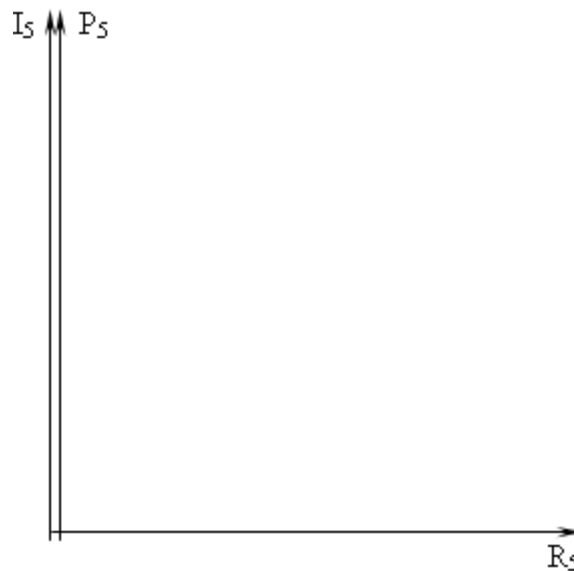


Рис. 54. Координатные оси для построения графиков

11. Сделать выводы по работе.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что называют двухполюсником?
2. Какой двухполюсник называют активным, а какой пассивным?
3. По какой формуле определяют ток ветви методом эквивалентного генератора?
4. Как практически определяется ЭДС и внутреннее сопротивление двухполюсника?

## **7. Индивидуальные задания**

### **7.1 Примеры решения задач**

**ЗАДАЧА 1.** Определить величины и направления токов во всех ветвях схемы по методу контурных токов.

1. Вычертить заданную схему (рис.55), выписать заданные величины ЭДС и сопротивлений;
2. Выбрать независимые контуры, задаться в них произвольными направлениями контурных токов;
3. Составить систему уравнений для контурных токов по второму закону Кирхгофа; решить данную систему уравнений относительно неизвестных контурных токов;
4. Определить значения токов в ветвях схемы через найденные контурные токи;
5. Произвести проверку правильности расчёта токов путём составления уравнения баланса мощностей цепи.

Дано:  $E_1 = 40\text{В}$ ;  $E_2 = 30\text{В}$ ;  $R_1 = 5\ \Omega$ ;  $R_2 = 15\ \Omega$ ;  $R_3 = 15\ \Omega$ ;  
 $R_4 = 10\ \Omega$ ;  $R_5 = 10\ \Omega$ .

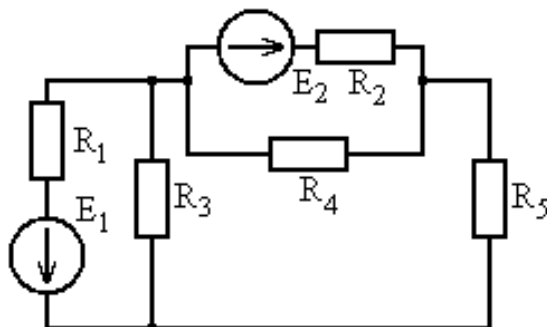


Рис. 55

**Решение:**

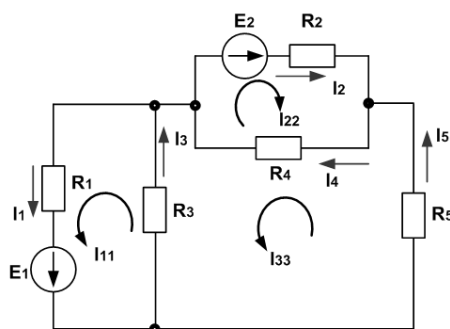


Рис. 56

Выбираем три независимых контура. Первый включает в себя источник ЭДС  $E_1$  и сопротивления нагрузки  $R_1$  и  $R_3$ . Второй контур содержит источник  $E_2$  и сопротивления нагрузки  $R_2$  и  $R_4$ . Третий контур (без источника ЭДС) содержит три сопротивления нагрузки  $R_3$ ,  $R_4$  и  $R_5$ . Задаёмся положительными направлениями контурных токов  $I_{11}$ ,  $I_{22}$  и  $I_{33}$

Запишем в общем виде уравнения по методу контурных токов для трёх независимых контуров:

$$\begin{aligned} I_{11} \cdot R_{11} + I_{12} \cdot R_{12} + I_{33} \cdot R_{13} &= E_1 \\ I_{21} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} + I_{23} \cdot R_{23} &= E_2 \\ I_{11} \cdot R_{31} + I_{22} \cdot R_{32} + I_{33} \cdot R_{33} &= 0 \end{aligned}$$

Здесь:  $R_{11}$  – сумма сопротивлений, входящих в 1-й контур:

$$R_{11} = R_1 + R_3 = 5 + 15 = 20\ \Omega.$$

$R_{22}$  – сумма сопротивлений, входящих во 2-й контур:

$$R_{22} = R_2 + R_4 = 15 + 10 = 25\ \Omega.$$

Аналогично:

$$R_{33} = R_3 + R_4 + R_5 = 15 + 10 + 10 = 35 \text{ Ом.}$$

Сопротивления смежных ветвей

$$R_{12} = R_{21} = 0; R_{13} = R_{31} = -R_3 = -15 \text{ Ом;}$$

$$R_{23} = R_{32} = R_4 = 10 \text{ Ом;}$$

После подстановки исходных данных получаем систему трёх уравнений

$$20 \cdot I_{11} + 0 \cdot I_{22} - 15 \cdot I_{33} = 40$$

$$0 \cdot I_{11} + 25 \cdot I_{22} + 10 \cdot I_{33} = 30$$

$$-15 \cdot I_{11} + 10 \cdot I_{22} + 35 \cdot I_{33} = 0$$

Решаем систему методом определителей:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 20 & 0 & -15 \\ 0 & 25 & 10 \\ -15 & 10 & 35 \end{vmatrix} = 20 \cdot 25 \cdot 35 - 15 \cdot 15 \cdot 25 - 10 \cdot 10 \cdot 20 = 9875$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 40 & 0 & -15 \\ 30 & 25 & 10 \\ 0 & 10 & 35 \end{vmatrix} = 40 \cdot 25 \cdot 35 - 15 \cdot 30 \cdot 10 - 10 \cdot 10 \cdot 40 = 26500$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 20 & 40 & -15 \\ 0 & 30 & 10 \\ -15 & 0 & 35 \end{vmatrix} = 20 \cdot 30 \cdot 35 - 15 \cdot 40 \cdot 10 - 15 \cdot 30 \cdot 15 = 8250$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 20 & 0 & 40 \\ 0 & 25 & 30 \\ -15 & 10 & 0 \end{vmatrix} = 40 \cdot 25 \cdot 15 - 10 \cdot 30 \cdot 20 = 9000$$

Определяем значения контурных токов:

$$I_{11} = \Delta_1 / \Delta = 26500 / 9875 = 2,6835 \text{ А;}$$

$$I_{22} = \Delta_2 / \Delta = 8250 / 9875 = 0,8354 \text{ А;}$$

$$I_{33} = \Delta_3 / \Delta = 9000 / 9875 = 0,9114 \text{ А.}$$

Значения  $I_{11}$ ,  $I_{22}$  и  $I_{33}$  получились положительными, т.е. их направления были приняты правильно.

Определяем токи в ветвях:

Токи во внешних ветвях контуров равны соответствующим контурным токам:

$$I_1 = I_{11} = 2,6835 \text{ А;}$$

$$I_2 = I_{22} = 0,8354 \text{ А;}$$

$$I_5 = I_{33} = 0,9114 \text{ А.}$$

Токи в смежных ветвях контуров равны алгебраической сумме контурных токов:

$I_3 = I_{11} - I_{33} = 2,6835 - 0,9114 = 1,7722$  А, по направлению  $I_3$  совпадает с  $E_1$ .

$I_4 = I_{22} + I_{33} = 0,8354 + 0,9114 = 1,7468$  А, по направлению  $I_4$  совпадает с  $E_2$ .

Определяем мощности источников:

В обоих источниках токи, протекающие в них, совпадают по направлению с ЭДС, т. е. они работают в активном режиме.

$$P_{\text{ист } 1} = E_1 \cdot I_1 = 40 \cdot 2,6835 = 107,342 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ист } 2} = E_2 \cdot I_2 = 30 \cdot 0,8354 = 25,063 \text{ Вт};$$

$$\Sigma P_{\text{ист}} = P_{\text{ист } 1} + P_{\text{ист } 2} = 107,342 + 25,063 = 132,405 \text{ Вт}$$

Определяем мощности, рассеиваемые в нагрузках:

$$P_1 = I_{21} \cdot R_1 = 2,6835 \cdot 5 = 36,01 \text{ Вт}$$

$$P_2 = I_{22} \cdot R_2 = 0,8354 \cdot 15 = 10,469 \text{ Вт}$$

$$P_3 = I_{23} \cdot R_3 = 1,7722 \cdot 15 = 47,108 \text{ Вт}$$

$$P_4 = I_{24} \cdot R_4 = 1,7468 \cdot 10 = 30,514 \text{ Вт}$$

$$P_5 = I_{25} \cdot R_5 = 0,9114 \cdot 10 = 8,306 \text{ Вт}$$

$$\Sigma P_{\text{пр}} = 36,01 + 10,469 + 47,108 + 30,514 + 8,306 = 132,405 \text{ Вт}$$

Проверка баланса мощностей:

Должно выполняться равенство

$$\Sigma P_{\text{ист}} = \Sigma P_{\text{пр}}; \quad 132,405 \text{ Вт} = 132,405 \text{ Вт}.$$

Таким образом, баланс мощностей выполняется.

**ЗАДАЧА 2.** Дано:  $E_1 = 42$  В;  $E_5 = 24$  В;  $r_1 = 4$  Ом;  $r_2 = 4$  Ом;  
 $r_3 = 2$  Ом;  $r_4 = 4$  Ом;  $r_5 = 4$  Ом (рис. 57).

Определить токи методом узловых потенциалов.

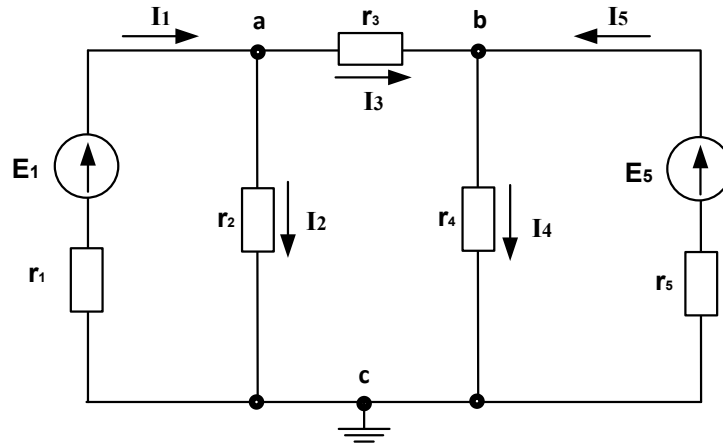


Рис. 57

**Решение:**

Потенциал какого-либо узла схемы принимаем за ноль (потенциал точки  $c$ ,  $\varphi_c = 0$ ).

Произвольно выбираем положительные направления токов (рис. 57).

Для отдельных ветвей электрической цепи применяем закон Ома, учитывая, что  $\varphi_c = 0$ :

$$\varphi_a = \varphi_c - r_1 I_1 + E_1; \text{ следовательно, } I_1 = (E_1 - \varphi_a) g_1;$$

$$\varphi_a = \varphi_c + r_2 I_2; \text{ следовательно, } I_2 = \varphi_a g_2;$$

$$\varphi_b = \varphi_a - r_3 I_3; \text{ следовательно, } I_3 = (\varphi_a - \varphi_b) g_3;$$

$$\varphi_b = \varphi_c + r_4 I_4; \text{ следовательно, } I_4 = \varphi_b g_4;$$

$$\varphi_b = \varphi_c - r_5 I_5 + E_5; \text{ следовательно, } I_5 = (E_5 - \varphi_b) g_5,$$

$$\text{где } g_1 = \frac{1}{r_1}; g_2 = \frac{1}{r_2}; g_3 = \frac{1}{r_3}; g_4 = \frac{1}{r_4}; g_5 = \frac{1}{r_5}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа записываем уравнения:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$(E_1 - \varphi_a) g_1 - \varphi_a g_2 - (\varphi_a - \varphi_b) g_3 = \frac{1}{r_3}.$$

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

$$(\varphi_a - \varphi_b) g_3 - \varphi_b g_4 + (E_5 - \varphi_b) g_5 = 0$$

(20)

Преобразуем уравнение системы (20) и подставим численные значения:

$$\left. \begin{aligned} (g_1 + g_2 + g_3) \varphi_a - g_3 - \varphi_B &= E_1 g_1 \\ -g_3 \varphi_a + (g_3 + g_4 + g_5) \varphi_B &= E_5 g_5 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Так как  $g_1 = 0,25 \text{ См}$ ;  $g_2 = 0,25 \text{ См}$ ;  $g_3 = 0,5 \text{ См}$ ;

$g_4 = 0,25 \text{ См}$ ;  $g_5 = 0,25 \text{ См}$ ,

то:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a - 0,5 \varphi_B &= 12 \\ -0,5 \varphi_a + \varphi_B &= 6 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Решаем систему уравнений (22):

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -0,5 \\ -0,5 & 1 \end{vmatrix} = 0,75 \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 12 & -0,5 \\ 6 & 1 \end{vmatrix} = 15; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 12 \\ -0,5 & 6 \end{vmatrix} = 12.$$

Следовательно:

$$\varphi_a = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{15}{0,75} = 20; \quad \varphi_B = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{12}{0,75} = 16.$$

Определяем токи в ветвях:

$$I_1 = (E_1 - \varphi_a) g_1 = (48 - 20) \cdot 0,25 = 7 \text{ А}$$

$$I_2 = \varphi_a \cdot g_2 = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ А}$$

$$I_3 = (\varphi_a - \varphi_B) g_3 = (20 - 16) \cdot 0,5 = 2 \text{ А}$$

$$I_4 = \varphi_a \cdot g_4 = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ А}$$

$$I_5 = (E_5 - \varphi_a) g_5 = (24 - 20) \cdot 0,25 = 1 \text{ А}$$

Составляем баланс мощностей:

$$E_1 \cdot I_1 + E_5 I_5 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5;$$

$$48 \cdot 7 + 24 \cdot 1 = 72 \cdot 4 + 25 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 25 \cdot 4 + 1 \cdot 4;$$

Построим потенциальную диаграмму  $\varphi(R)$  по точкам:

$$\varphi_c = 0; R = 0; \varphi_a = 20 \text{ В}; R_a = r_1 = 4 \text{ Ом}; \varphi_B = 16 \text{ В};$$

$$R_b = r_1 + r_3 = 6 \text{ Ом}; \varphi_c = 0;$$

$$R_c = 0; R_c = r_1 + r_3 + r_5 = 10 \text{ Ом}.$$



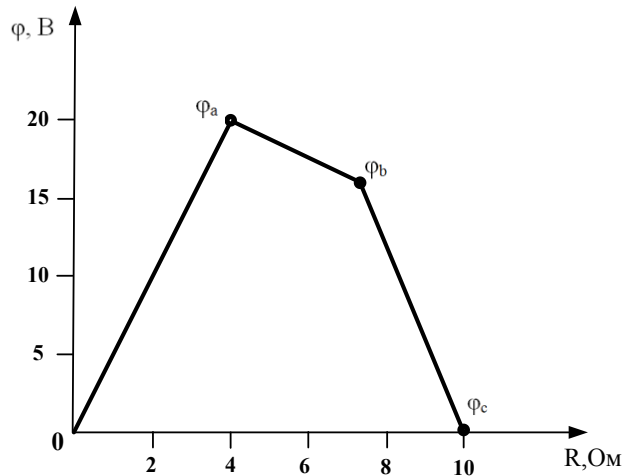


Рис. 58.

**7.2. Задачи для индивидуального решения.  
Расчёт разветвлённой цепи постоянного тока с одним  
источником энергии**

По заданному варианту выбрать из табл. 15 значения сопротивлений и напряжение  $U$  на входе цепи. По рис. 59 выбрать согласно варианту расчётную схему.

Таблица 15.

**Исходные данные**

Вариант	$U, В$	Сопротивление, Ом					
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
1	120	8	7	9	7	6	15
2	70	8	7	6	8	12	13
3	140	9	17	18	14	15	16
4	60	16	12	11	9	18	14
5	150	10	15	16	17	9	7
6	100	11	13	19	14	8	9
7	80	15	11	14	13	7	12
8	90	16	12	10	15	14	8
9	130	10	9	11	12	16	7
0	80	12	7	8	10	18	14

Вычислить токи в ветвях, напряжение на каждом из сопротивлений цепи и составить баланс мощности.

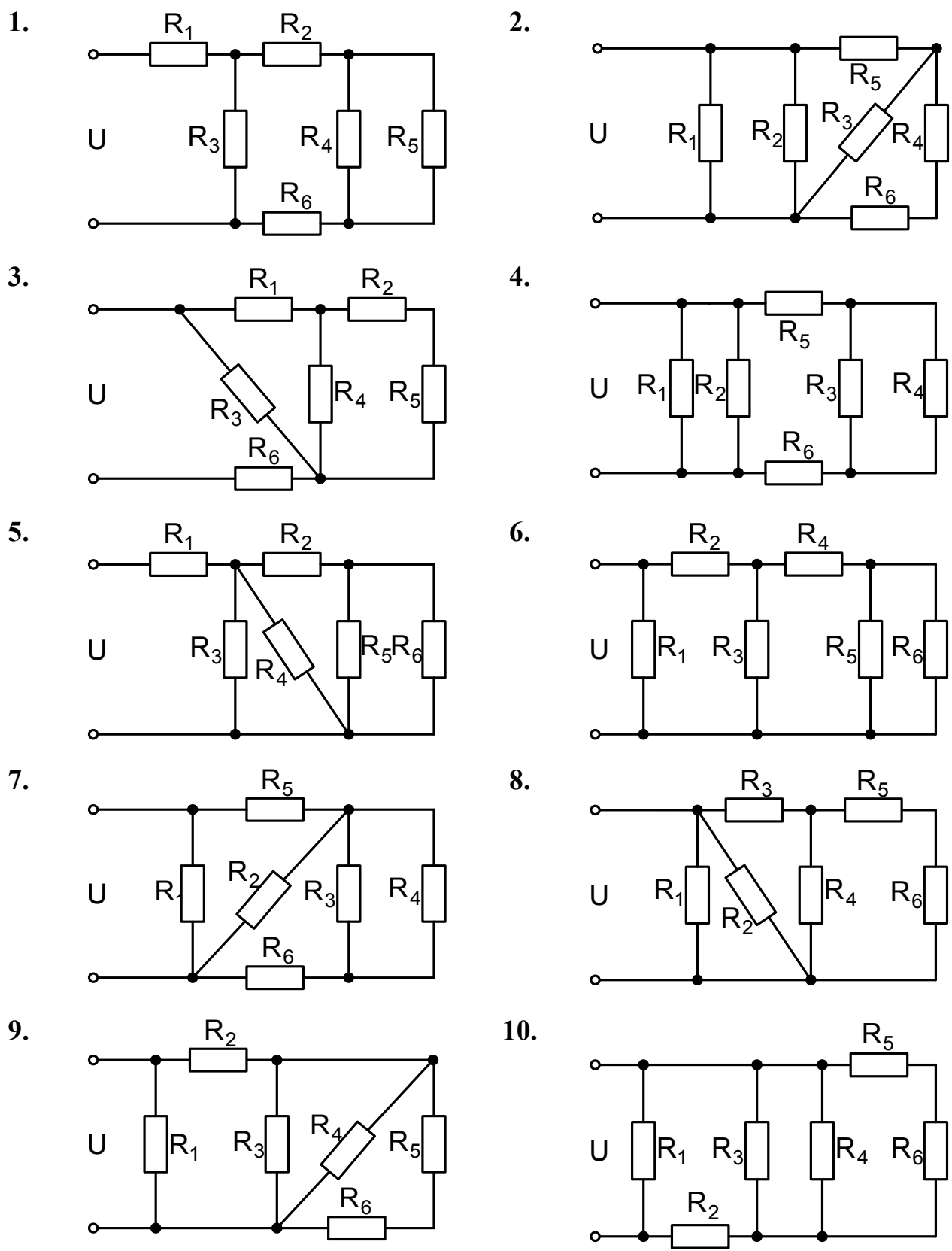
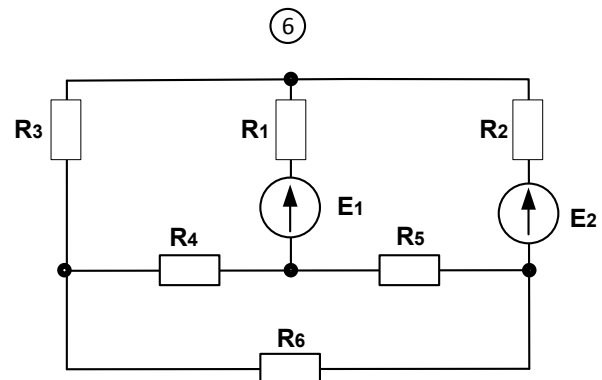
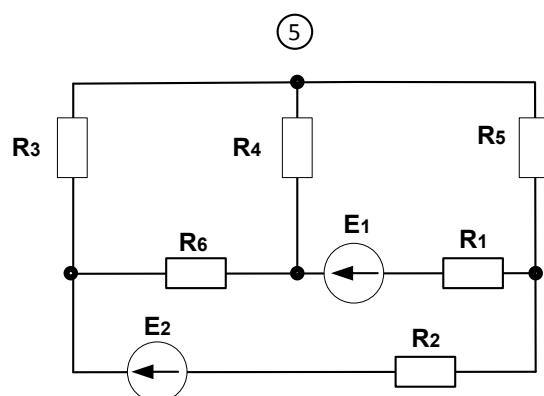
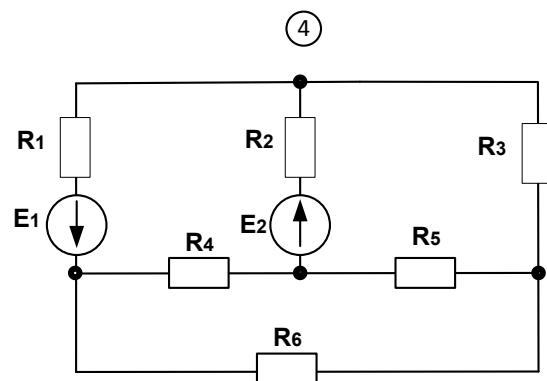
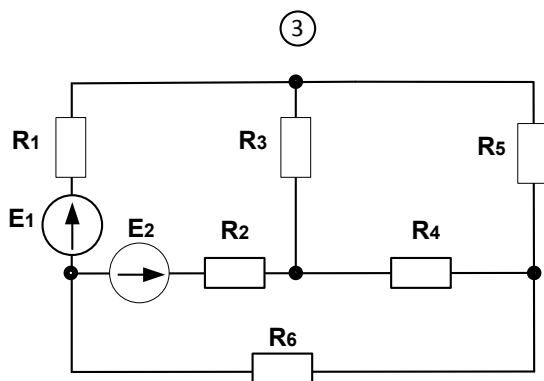
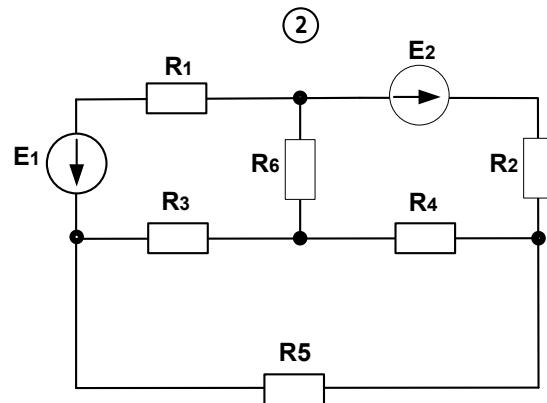
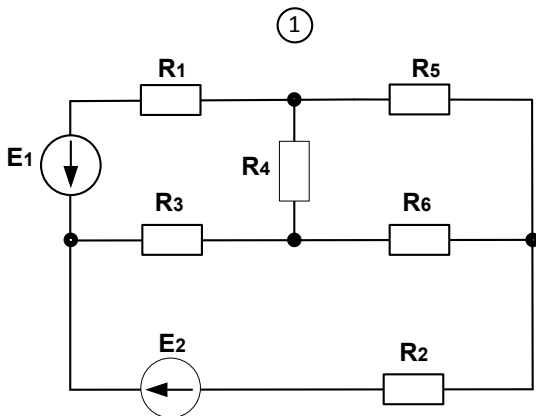


Рис. 59. Варианты схем для расчёта

## Расчёт разветвлённой линейной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии

Для выбранной электрической цепи, представленной на рис. 60/(1 ... 10) выполнить следующее:

1. Составить уравнения для определений токов путём непосредственного применения законов Кирхгофа. Решать систему не следует.
2. Определить токи в ветвях методом контурных токов.
3. Определить режимы работы активных элементов и составить баланс мощностей.



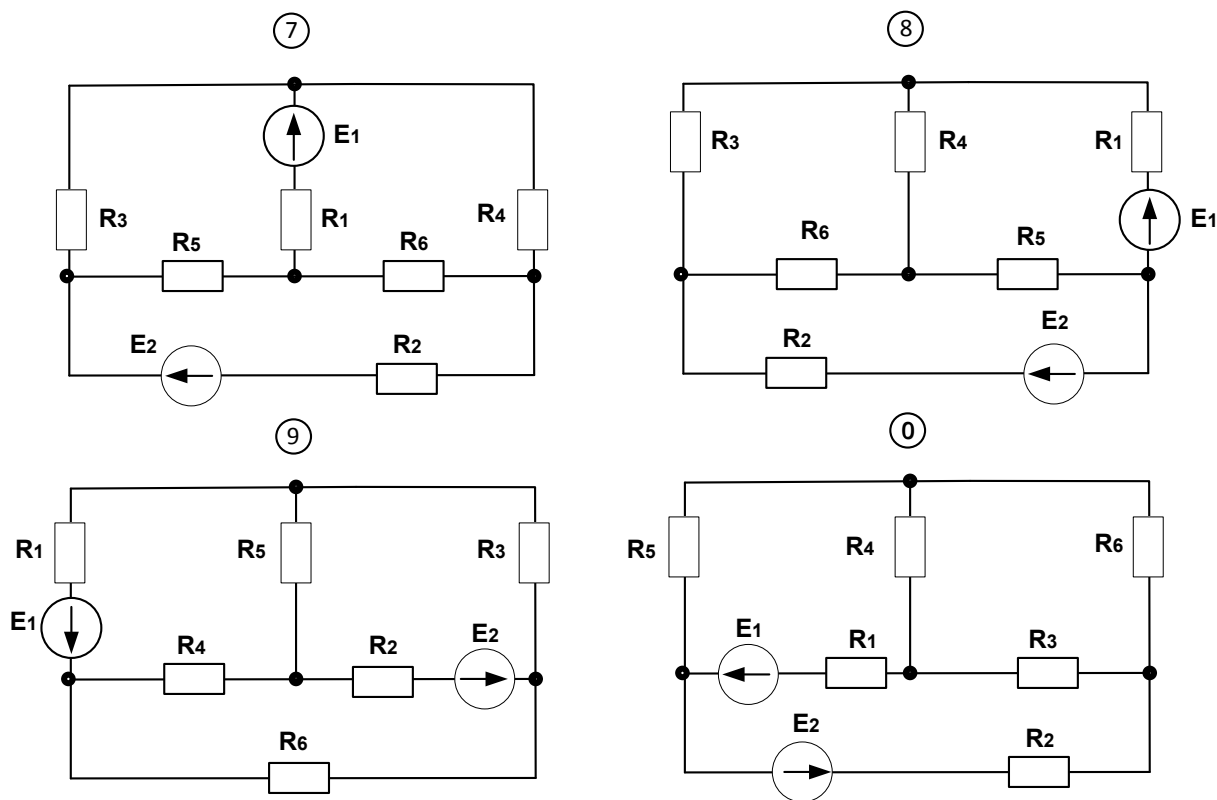


Рис. 60. Варианты расчётных схем

Таблица 16.

Величина	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_1$ (В)	100	90	80	70	60	110	120	130	140	150
$E_2$ (В)	100	170	180	190	200	150	140	110	120	130
$R_1$ (Ом)	5	1	2	1	6	3	2	8	4	7
$R_2$ (Ом)	7	6	5	4	3	2	3	4	5	6
$R_3$ (Ом)	13	24	21	25	19	22	17	14	16	9
$R_4$ (Ом)	25	20	16	18	22	17	15	19	21	23
$R_5$ (Ом)	23	12	19	24	17	14	22	18	15	21
$R_6$ (Ом)	14	18	16	22	24	13	24	17	23	19

**Расчёт линейной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов и методом эквивалентного генератора**

Для выбранной цепи, изображённой на рис. 61/(0...9):

1. Составить уравнения для определения токов путём непосредственного применения законов Кирхгофа. Решать систему уравнений не следует;

2. Определить токи в ветвях методом контурных токов.

3. Определить ток в ветви, указанной в табл. 17, методом эквивалентного генератора;

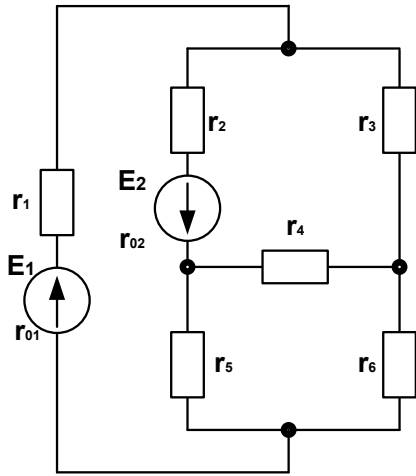
4. Составить баланс мощностей;

5. Построить потенциальную диаграмму для контура, включающего две ЭДС.

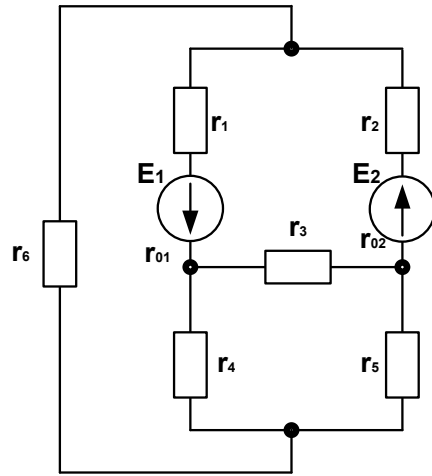
Значения ЭДС эквивалентных элементов и сопротивлений резистивных элементов приведены в Табл. 17.

Таблица 17

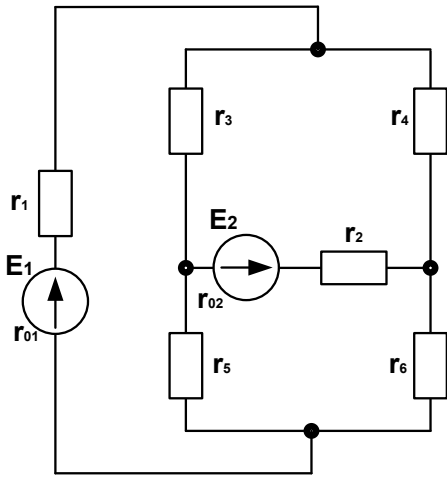
Вариант	$E_1, В$	$r_{01}, Ом$	$E_2, В$	$r_{02}, Ом$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$r_3, Ом$	$r_4, Ом$	$r_5, Ом$	$r_6, Ом$	Ветвь, в которой определяется ток методом экв. генератора.
1	110	0,2	15	0,8	4	3	7	6	6	6	$r_4$
2	30	0,25	115	0,6	2	8	5	2	4	5	$r_3$
3	220	0,15	60	1,0	9	4	5	5	6	7	$r_5$
4	115	0,4	30	1,2	4	7	2	2	4	5	$r_4$
5	60	0,5	100	0,5	6	3	9	3	3	3	$r_3$
6	100	0,3	60	0,8	6	8	3	6	4	6	$r_5$
7	30	0,6	115	1,2	7	4	7	2	5	8	$r_4$
8	60	0,5	220	0,5	9	3	6	5	5	8	$r_3$
9	115	0,4	30	1,2	5	3	7	5	8	9	$r_5$
10	15	0,8	110	0,8	4	6	3	8	6	3	$r_3$



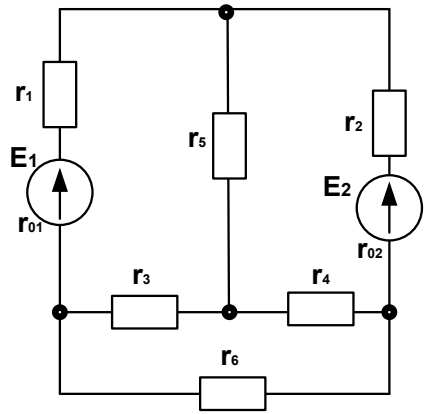
①



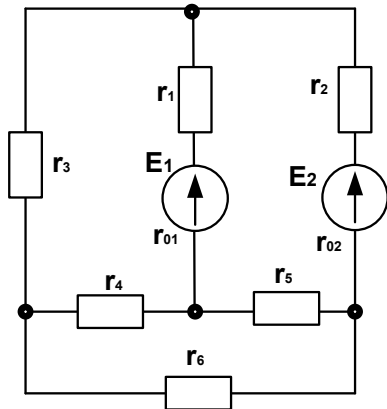
②



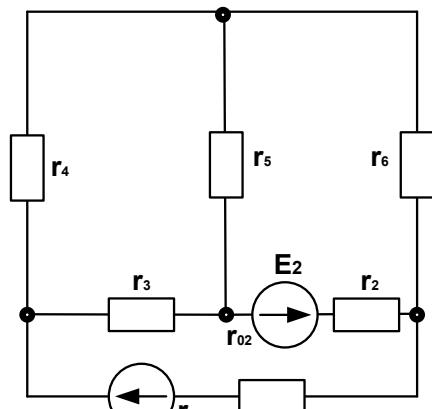
③



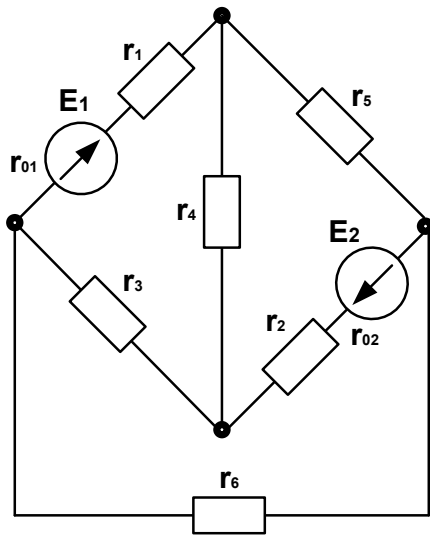
④



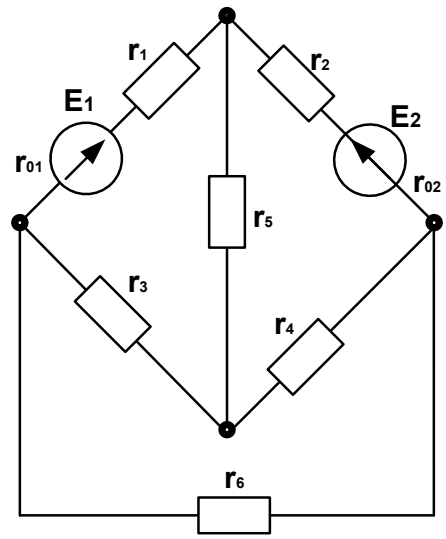
⑤



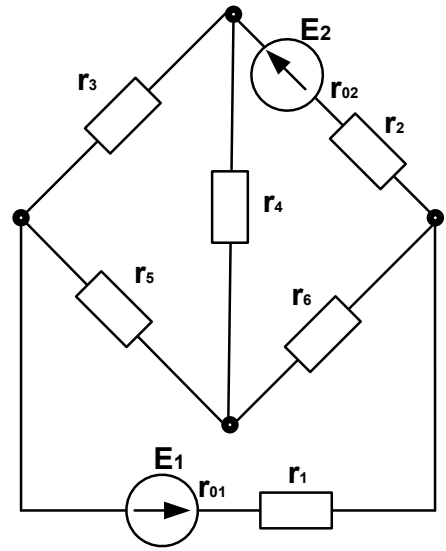
⑥



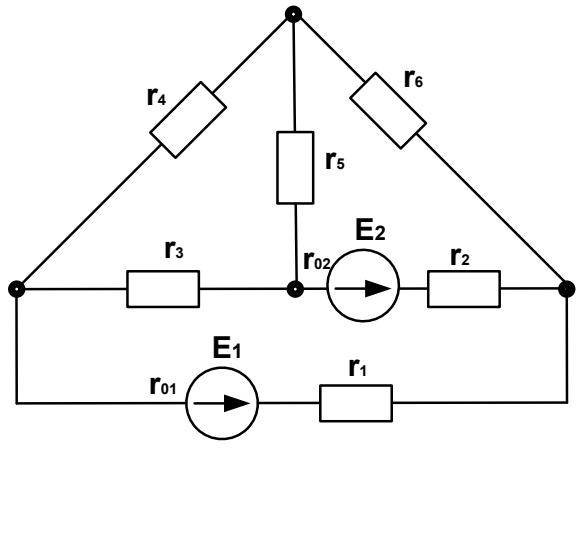
7



8



9



10

*Puc. 61*



## 8. Отчётная документация по проведению лабораторных работ

### Пример отчёта по лабораторной работе «Анализ сложной электрической цепи постоянного тока»

Цель работы: практическое освоение основных методов расчёта сложных электрических цепей постоянного тока.

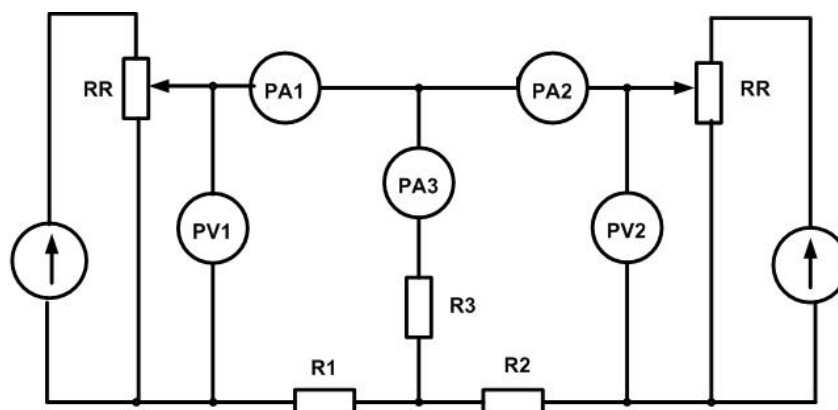


Рис.62.

#### Ход работы:

1. Собрали электрическую цепь на стенде «Уралочка» (рис. 38) по схеме рис.62, используя резисторы:  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 200 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 50 \text{ Ом}$ .

2. Оформили и заполнили таблицу измерений и вычислений для четырёх экспериментов с различными источниками ЭДС (Табл. 18).

3. Проверили полученные и рассчитанные значения величин с помощью виртуального симулятора «NIMultisim».

4. Сформулировали выводы.

Таблица 18.

№	Измерения						Вычисления			Метод расчёта		
	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$	$I_1, \text{мА}$		$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$
1	4,00	4,00	100	200	50	23	11	34	22,857	11,428	34,285	Законы Кирхгофа
									22,857	11,428	34,285	Метод контурных токов
2	4,00	7,00	100	200	50	19	24	43	18,571	24,258	42,857	Законы Кирхгофа
									18,571	24,258	42,857	Метод контурных токов
3	-4,00	4,00	100	200	50	-34	23	-11	-34,285	22,857	-11,428	Законы Кирхгофа
									-34,285	22,857	-11,428	Метод контурных токов
4	-4,00	7,00	100	200	50	-39	36	-2,8	-38,571	35,714	-2,857	Законы Кирхгофа
									-38,571	35,714	-2,857	Метод контурных токов

**Проверка измерений с помощью законов Кирхгофа:**

$$\begin{cases} I_3 = I_2 + I_1; \\ E_1 = I_3 R_3 + I_1 R_1; \\ E_2 = I_3 R_3 + I_2 R_2; \end{cases} \begin{cases} I_3 = I_2 + I_1; \\ 50I_3 + 100I_1 = 4; \\ 50I_3 + 200I_2 = 4; \end{cases} \begin{cases} I_3 = I_2 + I_1; \\ 50I_2 + 50I_1 + 100I_1 = 4; \\ 50I_2 + 50I_1 + 200I_2 = 4; \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_3 = I_2 + I_1; \\ 50I_2 + 150I_1 = 4; \\ 250I_2 + 50I_1 = 4; \end{cases} \begin{cases} I_3 = I_2 + I_1; \\ I_2 = \frac{4 - 150I_1}{50}; \\ I_1 = \frac{750I_1 - 16}{50}; \end{cases} \begin{cases} I_3 = 0,0342856 \text{ A}; \\ I_2 = 0,0114285 \text{ A}; \\ I_1 = 0,0228571 \text{ A}. \end{cases}$$

**Проверка измерений с помощью метода контурных токов:**

$$\begin{cases} I_{11}(R_3 + R_1) + I_{22}R_3 = 4; \\ I_{11}R_3 + I_{22}(R_3 + R_2) = 4; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 150I_{11} + 50I_{22} = 4; \\ 50I_{11} + 250I_{22} = 4. \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 150 & 50 \\ 50 & 250 \end{vmatrix} = 150 \cdot 250 - 50 \cdot 50 = 35000;$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 4 & 50 \\ 4 & 250 \end{vmatrix} = 4 \cdot 250 - 4 \cdot 50 = 800;$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 150 & 4 \\ 50 & 4 \end{vmatrix} = 4 \cdot 150 - 4 \cdot 50 = 400.$$

$$I_1 = I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{800}{35000} = 0,0228571 \text{ (A)};$$

$$I_2 = I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = \frac{400}{35000} = 0,0114285 \text{ (A)};$$

$$I_3 = I_{11} + I_{22} = 0,0342856 \text{ (A)}.$$

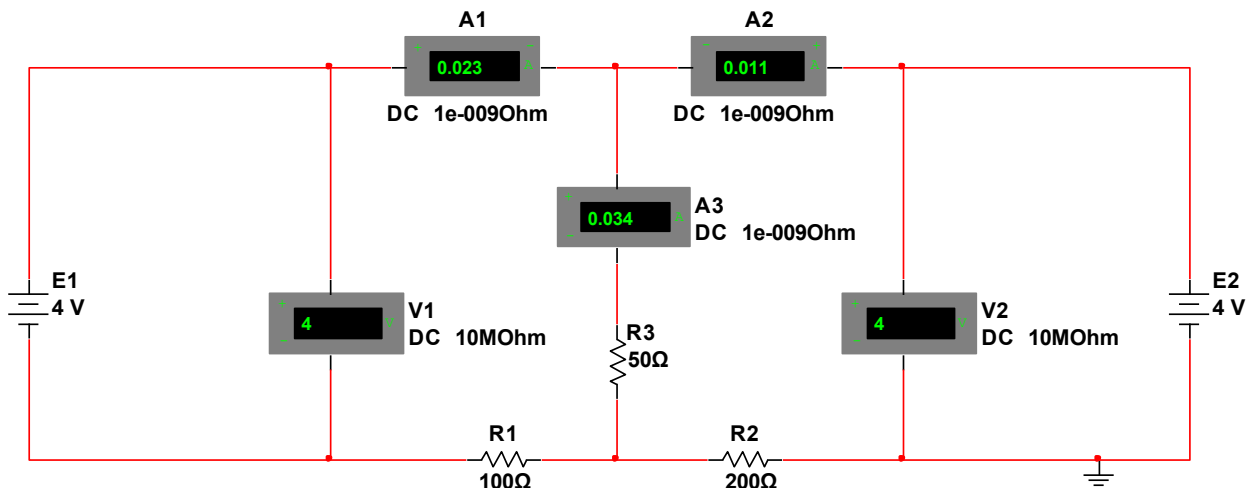


Рис. 63. Виртуальная модель цепи постоянного тока (эксперимент №1)

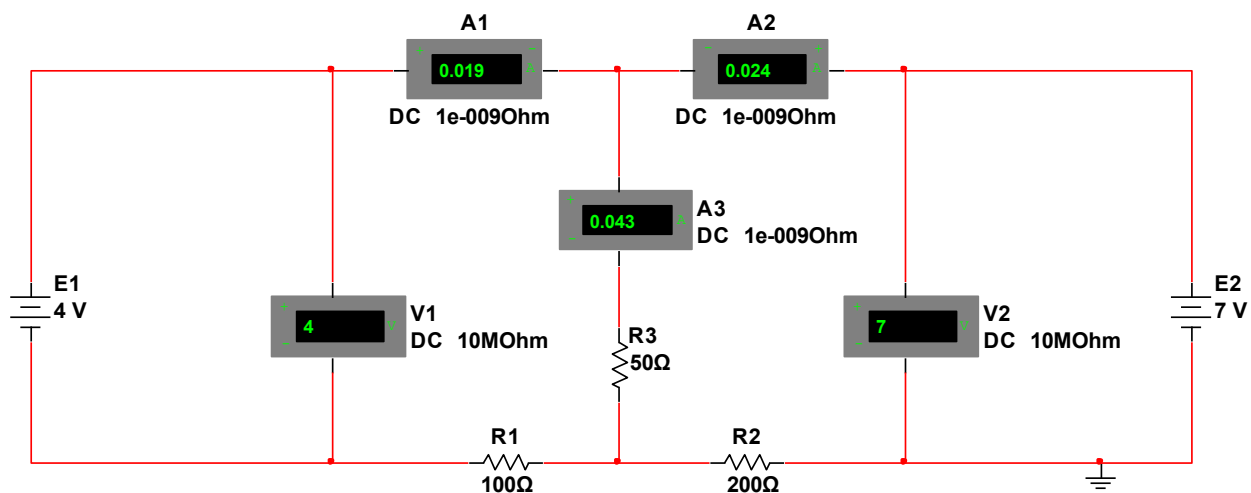


Рис. 64. Виртуальная модель цепи постоянного тока (эксперимент №2)

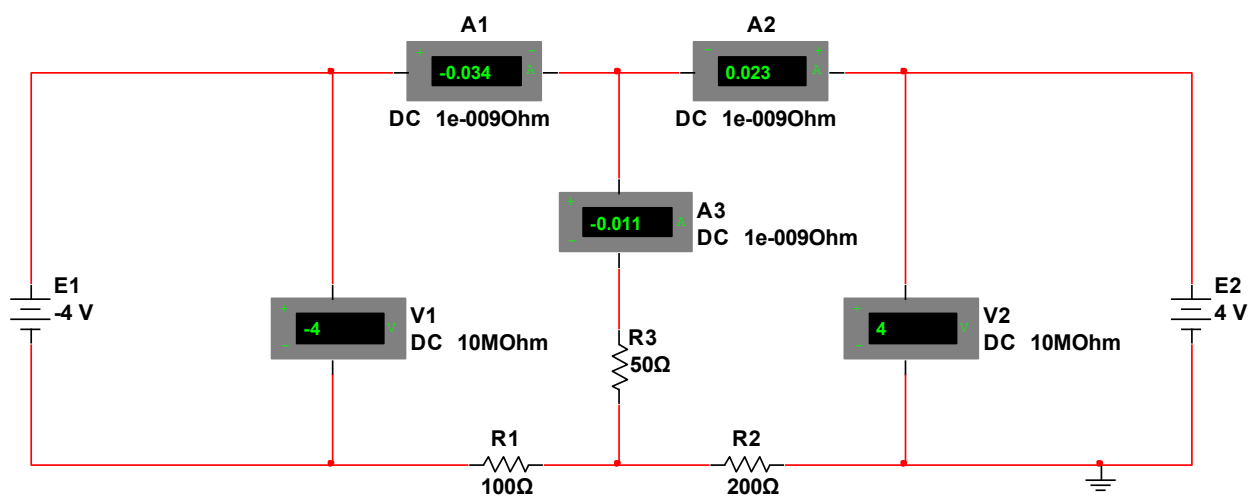


Рис. 65. Виртуальная модель цепи постоянного тока (эксперимент №3)

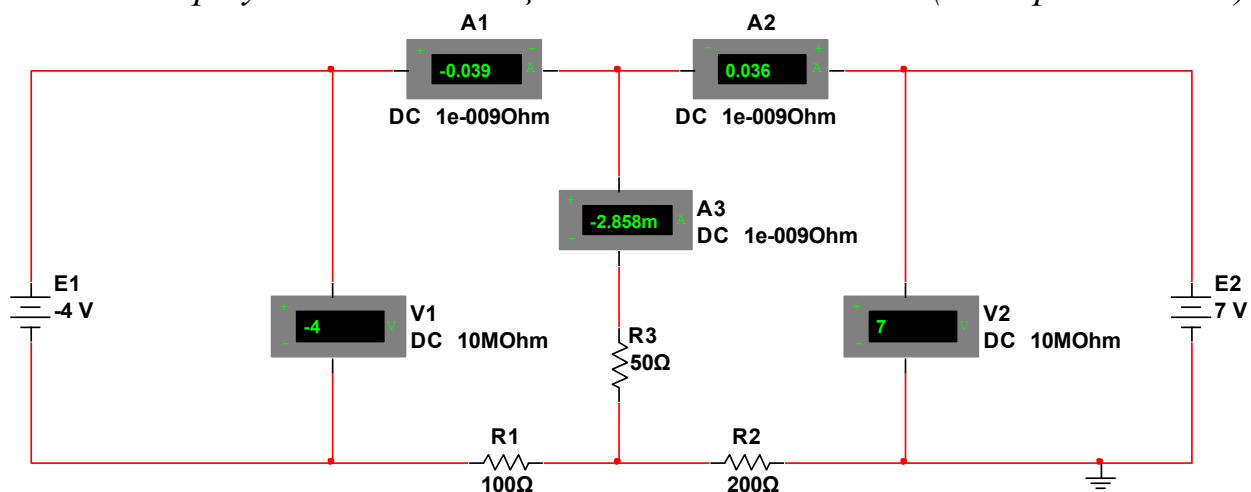


Рис. 66. Виртуальная модель цепи постоянного тока (эксперимент №4)

### Индивидуальное задание

Цепь постоянного тока содержит резисторы, соединённые смешанно. Дано:  $U = 60 \text{ В}$ ;  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 4 \text{ Ом}$ .

Определить токи и напряжения на всех элементах в электрической цепи, мощность, потребляемую всей цепью и расход электрической энергии за 6 часов работы.

#### Решение:

Перечерчиваем схему (рис.67), задавая положительным направлением токов в ветвях.

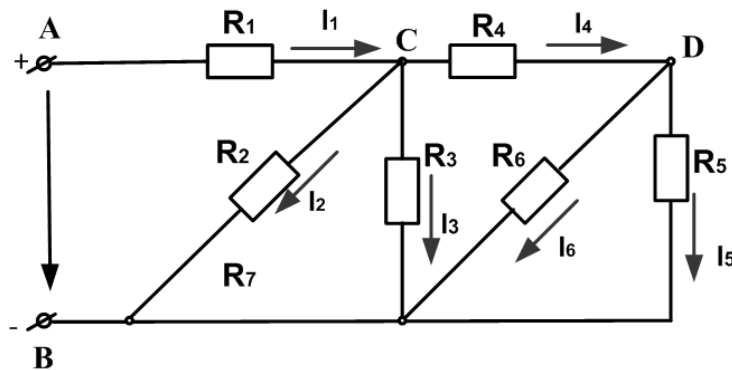


Рис. 67.

#### Определение эквивалентного сопротивления цепи

Резисторы  $R_5$  и  $R_6$  соединены параллельно:

$$R_{5,6} = R_5 \cdot R_6 / (R_5 + R_6) = 12 \cdot 4 / (12 + 4) = 3 \text{ Ом}$$

Резисторы  $R_4$  и  $R_{5,6}$  соединены последовательно:

$$R_{4-6} = R_4 + R_{5,6} = 3 + 3 = 6 \text{ Ом}$$

После этих преобразований оказывается, что три резисторы  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_{4-6}$ , равные по величине, соединены параллельно. Следовательно, их эквивалентное сопротивление:

$$R_{2-6} = R_2 / 3 = 6 / 3 = 2 \text{ Ом.}$$

Окончательно эквивалентное сопротивление цепи:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{2-6} = 3 + 2 = 5 \text{ Ом}$$

#### Определение токов в резисторах и падения напряжений на них

$$I_1 = I_0 = U_{\text{AB}} / 60 / 5 = 12 \text{ А}, \quad U_1 = I_1 \cdot R_1 = 12 \cdot 3 = 36 \text{ В};$$

$$U_2 = U_{\text{AB}} - U_1 = 60 - 36 = 24 \text{ В}, \quad I_2 = U_2 / R_2 = 24 / 6 = 4 \text{ А};$$

Резисторы  $R_2$  и  $R_3$  соединены параллельно, поэтому  $U_2 = U_3 = 24 \text{ В}$ , следовательно:

$$I_3 = U_3 / R_3 = 24 / 6 = 4 \text{ A.}$$

На основании первого закона Кирхгофа, записанного для узла С, имеем:

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4, \text{ отсюда } I_4 = I_1 - (I_2 + I_3) = 12 - 2 \cdot 4 = 4 \text{ A,}$$
$$U_4 = I_4 \cdot R_4 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ В;}$$

По второму закону Кирхгофа для контура, включающего резисторы  $R_3, R_4$  и  $R_6$ :

$$U_2 = U_4 + U_6.$$

Отсюда:  $U_6 = U_2 - U_4 = 24 - 12 = 12 \text{ Ом,}$

$$I_6 = U_6 / R_6 = 12 / 4 = 3 \text{ A.}$$

На основании первого закона Кирхгофа, записанного для узла D, имеем:

$$I_4 = I_6 + I_5,$$

отсюда:  $I_5 = I_4 - I_6 = 4 - 3 = 1 \text{ A,}$

$$U_5 = I_5 \cdot R_5 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ В;}$$

Проверка выполнения первого закона Кирхгофа для узла B:

$$I_0 = I_2 + I_3 + I_5 + I_6,$$

$$12 = 4 + 4 + 1 + 3 = 12 \text{ A}$$

Мощность, потребляемая всей цепью:

$$P = U_{AB} \cdot I_0 = 60 \cdot 12 = 720 \text{ Вт} = 0,72 \text{ кВт}$$

Расход энергии за 6 часов:

$$W = P \cdot t = 0,72 \cdot 8 = 5,76 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

### **Выводы:**

✓ В ходе лабораторной работы было проведено исследование сложной электрической цепи постоянного тока двумя методами: методом уравнений по законам Кирхгофа и методом контурных токов.

✓ При экспериментальном исследовании цепи были сняты показания измерительных приборов. Проведены аналитические расчеты электрической цепи двумя методами. Построены виртуальные модели сложной электрической цепи для 4-х экспериментов в ПП Multisim.

✓ В результате работы были получены измерения сложной цепи постоянного тока экспериментальным путем, расчетным, и с помощью схемотехнического моделирования.

✓ Выполнено индивидуальное задание.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – Москва: Юрайт, 2011. – 320 с.
2. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники: учебник для студ. образ. учрежд. сред. проф. образ. / Ф.Е. Евдокимов. – 9-е изд., стер. – Москва: Академия, 2007. – 560 с.
3. Зайцева, И.Н. Методы расчета электрических цепей. Линейные цепи постоянного тока / И.Н. Зайцева, Н.А. Фортунова. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2016. – 85 с.
4. Марченко, А.Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim: учебное пособие для вузов / А.Л. Марченко, С. В. Освальд. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 448 с.
5. Немцов, М.В. Электротехника и электроника: учебник для вузов / М.В. Немцов. – Москва: Высшая школа, 2007. – 559 с.
6. Руководство к лабораторным работам в лаборатории ТОЭ «Уралочка». – Екатеринбург, 2006. – 66 с.
7. Сошинов, А.Г., Карпенко О.И. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике: учебное пособие / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 88 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Министерство науки и высшего образования РФ  
Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина  
Институт математики, естествознания и техники  
Кафедра физики, радиотехники и электроники

### Отчеты по лабораторным работам по дисциплине

« \_\_\_\_\_ »

Выполнил:  
студент группы \_\_\_\_\_

Проверил: \_\_\_\_\_

Направление: \_\_\_\_\_

Степень: \_\_\_\_\_

Курс: \_\_\_\_\_

Семестр: \_\_\_\_\_

Отчёт защищён

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ год.

Елец 2019





Large empty rectangular area for the main content of the laboratory work report.

					<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1</b>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>						1	8
<i>Т.контр.</i>					<i>ЕГУ им. И.А. Бунина</i> <b>ИМЕЕТ</b> <i>Ф. —</i>		
<i>Н.контр.</i>							
<i>Утв.</i>							
					<i>Дисциплина « _____ »</i> <b>Отчет по лабораторной работе</b>		

I

					<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1</b>	Лист
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Устройство лабораторного стенда « Уралочка» .....	4
2. Вопросы техники безопасности в лаборатории при выполнении реального и виртуального экспериментов .....	8
3. Правила сборки электрических схем .....	11
4. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе ...	12
5. Основы работы с программным пакетом Multisim .....	14
6. Методические рекомендации по проведению лабораторного практикума .....	24
6.1. Лабораторная работа № 1. «Неразветвлённая цепь постоянного тока. Делитель напряжения» .....	24
6.2. Лабораторная работа № 2. «Разветвлённая цепь постоянного тока» .....	27
6.3. Лабораторная работа № 3. «Анализ сложной электрической цепи постоянного тока» .....	32
6.4. Лабораторная работа № 4. «Измерение потенциалов в электрической цепи, построение потенциальной диаграммы» .....	36
6.5. Лабораторная работа № 5. «Изучение метода узлового напряжения» .....	41
6.6. Лабораторная работа № 6. «Преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду» .....	46
6.7. Лабораторная работа № 7. «Изучение принципа наложения токов» .....	50
6.8. Лабораторная работа № 8. «Опытная проверка расчёта тока в диагонали мостовой схемы по методу эквивалентного генератора» .....	53
7. Индивидуальные задания .....	58
7.1. Примеры решения задач .....	58
7.2. Задачи для индивидуального решения .....	64
8. Отчётная документация по проведению лабораторных работ	71
Список литературы .....	76
Приложение .....	77

Учебное издание

Ирина Николаевна Зайцева,  
Наталья Александровна ФОРТУНОВА,  
Светлана Сергеевна Токарева,  
Наталья Александровна Ярлыкова

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

## **ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **Лабораторный практикум**

*Техническое исполнение – В. М. Гришин*  
Печатается в авторской редакции

Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.  
Печ.л. 5,0 Уч.-изд.л. 4,8  
Тираж 300 экз. (1-й завод 1-20 экз.). Заказ 112

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии  
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина»  
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1