

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

В. В. Соленков, А. В. Бусленко

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области энергетики и энергетического
оборудования в качестве лабораторного практикума
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальностям 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы
и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования
организаций», 1-53 01 05 «Автоматизированные
электроприводы» дневной и заочной форм обучения*

**В четырех частях
Часть 1**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2013

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73
С60

Рецензент: зав. каф. «Электротехника» БелГУТ канд. техн. наук, доц. *В. А. Пацкевич*

Соленков, В. В.

С60 Линейные электрические цепи постоянного тока : лаборатор. практикум : в 4 ч. Ч. 1 / В. В. Соленков, А. В. Бусленко ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – 64 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://library.gstu.by/StartEK/>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-208-3.

Содержит методические рекомендации, требования к подготовке, выполнению, оформлению и защите шести расчетно-лабораторных работ по разделу «Линейные электрические цепи постоянного тока».

Для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)», 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций», 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73

ISBN 978-985-535-208-3 (ч. 1)
ISBN 978-985-535-209-0

© Соленков В. В., Бусленко А. В., 2013
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий лабораторный практикум подготовлен в соответствии с программами курса «Теоретические основы электротехники» для специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)», 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» применительно к лабораториям кафедры ТОЭ ГГТУ им. П. О. Сухого. В практикум включены 6 лабораторных работ по разделу «Линейные электрические цепи постоянного тока».

Все лабораторные работы поставлены на универсальных учебно-исследовательских лабораторных стендах (УИЛС-1), оборудованных соответствующим набором элементов (резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов и др.) и современных средств электрических измерений.

Использование стендов УИЛС-1 и соответствующего методического обеспечения позволяет реализовать фронтальный метод проведения лабораторных работ непосредственно после изучения конкретной темы или раздела курса на лекциях и практических занятиях. При этом каждая бригада студентов (2–3 человека) выполняет свой индивидуальный вариант лабораторной работы благодаря наличию на стенде регулируемых элементов.

Все лабораторные работы выполняются при пониженном напряжении (не выше 40 В) и токах нагрузки не более 150–200 мА. Это повышает безопасность работы на стендах, а также позволяет снизить потребление электроэнергии.

Программа лабораторных работ позволяет внедрить перспективную форму обучения, предусматривающую чередование расчета реальных электрических цепей с экспериментальными исследованиями этих цепей в лаборатории и ориентированную на самостоятельную работу студентов под руководством и контролем преподавателя.

Далее приводятся методические рекомендации по проведению цикла лабораторных работ по исследованию установившихся режимов в линейных электрических цепях постоянного тока.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

Лабораторные стенды УИЛС-1 являются действующими электроустановками и при определенных условиях могут стать источником опасности поражения электрическим током. Тело человека обладает свойством электропроводности и при соприкосновении с токоведущими частями установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникающий в теле человека электрический ток может вызвать электрическую травму (ожог кожи и т. п.) или нанести тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной системам организма (электрический удар).

Поэтому при работе в лаборатории необходимо всегда помнить о возможности поражения электрическим током, быть предельно собранным, внимательным и строго выполнять следующие правила:

1. Перед началом работы следует убедиться в целостности и исправности блоков и элементов наборного поля, соединительных проводов и перемычек. Пользоваться неисправными элементами, а также оголенными проводами без штырей *запрещается*.

2. *Сборку* электрической цепи необходимо *производить* только при отключенных источниках питания. При этом должна быть обеспечена достаточная плотность контактов во всех разъемных соединениях.

3. Напряжение к стендам *подается преподавателем*.

4. Перед включением источника питания необходимо его регулятор вывести в нулевое положение, а на регулируемых элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности) установить заданные значения параметров. Переключатели пределов измерительных приборов установить на значения, превышающие расчетные электрические величины.

5. Включение цепи под напряжение можно производить *только с разрешения преподавателя* (или мастера производственного обучения) после проверки правильности ее сборки.

6. Любые изменения в структуре цепи можно производить *только при отключенном источнике питания*. Повторное включение цепи под напряжение производится *только с разрешения преподавателя*.

7. При обнаружении неисправностей, могущих вызвать поражение электрическим током или порчу оборудования, следует *немедленно отключить* источник питания и поставить об этом в известность преподавателя (или мастера производственного обучения).

8. По окончании работ в лаборатории *преподаватель обязан отключить главный щит (снять напряжение со стендов).*

К работе в лаборатории студенты допускаются *только после инструктажа по технике безопасности* (дата проведения инструктажа фиксируется преподавателем в специальном кафедральном журнале).

Ответственность за соблюдение правил техники безопасности возлагается на студентов, работающих в лаборатории, а контроль за их выполнением ведется преподавателями и сотрудниками кафедры, участвующими в проведении лабораторных занятий.

Выполнение каждой расчетно-лабораторной работы предполагается в *два этапа*. Первый этап (подготовительный) выполняется заранее во время, предусмотренное для самостоятельной работы.

На этом этапе студент обязан:

1) изучить теоретический материал по учебнику, конспекту лекций либо примерам, рассмотренным на практических занятиях;

2) уяснить цель и содержание работы;

3) выполнить расчетную часть работы (т. е. произвести расчет цепи с учетом заданных параметров элементов и определить требуемые по заданию величины);

4) подготовить *протокол исследований*, в котором для каждого пункта рабочего задания привести:

– *схемы проведения эксперимента с необходимыми измерительными приборами;*

– *таблицы для записи расчетных величин, а также показаний приборов и вычисленных по ним величин;*

– *расчетные формулы, качественные графические построения, диаграммы и т. п.*

Протокол исследований выполняется в рабочей тетради каждым студентом отдельно (независимо от числа студентов в бригаде) и представляется преподавателю перед выполнением экспериментальной части работы.

Без подготовленного протокола исследований студент к выполнению экспериментальной части работы не допускается.

Второй этап работы (экспериментальная часть и анализ результатов) выполняется непосредственно на рабочем месте в учебной лаборатории во время занятий по расписанию. При проведении экспериментов следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в электроустановках.

Получив разрешение преподавателя на выполнение экспериментальной части, бригада студентов (2–3 человека) выполняет сборку исследуемой цепи и проводит измерения физических величин согласно заданию.

Результаты измерений обрабатываются и заносятся в соответствующие таблицы протокола. Все записи делаются ручкой четко и аккуратно. Если в процессе измерений допущены ошибки, неправильные результаты, занесенные в протокол, зачеркиваются и записываются новые значения.

По окончании каждой части работы, до разборки цепи, необходимо оценить правильность полученных результатов и представить преподавателю для проверки соответствующую таблицу, а по окончании всей работы – протокол для визирования и отметки в групповом журнале.

ОЗНАКОМИТЕЛЬНОЕ ЗАНЯТИЕ

Основными элементами ознакомительного занятия являются:

1. Инструктаж студентов по правилам техники безопасности (проводит преподаватель). К проведению лабораторных работ допускаются студенты, знающие правила техники безопасности и расписавшиеся в специальном кафедральном журнале.

2. Знакомство с правилами внутреннего распорядка в лабораториях кафедры ТОЭ. При этом подгруппа (группа) делится на бригады (по 2–3 человека), каждой из которых присваивается порядковый номер. В соответствии с ним за бригадой закрепляется стенд на весь период работы в лаборатории.

3. Знакомство с устройством и основными блоками учебно-исследовательского лабораторного стенда УИЛС-I. Преподаватель сообщает студентам сведения о составных частях стенда, используемых в данном семестре.

Стенд УИЛС-I ориентирован на студентов, начинающих изучение электротехники. В основу его конструкции положен принцип физического моделирования электрических цепей. К отличительным особенностям стенда относятся *простота* обращения с его блоками и элементами, *наглядность* при сборке электрических цепей и соответствующая *легкость* контроля, *прямой контакт* студента с реальными элементами, *безопасность* работы на стенде, ограниченный набор измерительных приборов для выполнения лабораторного практикума.

Стенд включает в себя *пульт*, *наборное поле*, *набор элементов* и соединительных *проводов*, а также лабораторный *стол*.

Пульт состоит из блоков источников напряжений, наборного поля и блоков регулируемых пассивных элементов. Источники напряжений расположены в левой части пульта в трех находящихся один под другим съемных блоках.

Наборное поле, расположенное в центре стенда, представляет собой панель с 67-ю парами гнезд, предназначенных для подключения элементов исследуемых электрических цепей. Гнезда соединены между собой, образуя узлы.

Такая конструкция наборного поля позволяет быстро и с минимальным количеством ошибок собрать, используя заданные элементы и соединительные перемычки, исследуемую электрическую цепь, внешний вид которой аналогичен схеме замещения. Такая наглядность при сборке цепей играет исключительно важную роль, особенно на начальной стадии изучения электротехники.

Блок переменного сопротивления (БПС) расположен справа от наборного поля в верхней части. Он позволяет регулировать свое сопротивление в диапазоне $1 \div 999$ Ом со ступенью регулирования 1 Ом. Допустимая мощность рассеяния сопротивления блока – 5 Вт.

Пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, лампочки и др.) находятся в небольших пластмассовых прозрачных корпусах, которые расположены в специальном ящике для элементов. Каждый элемент имеет два штекера, с помощью которых он может быть установлен на наборном поле.

Переключки (10 штук) используются для соединения гнезд одной пары. Кроме того, включение переключек в разные ветви позволяет измерить токи в этих ветвях одним и тем же амперметром, не разрывая отдельные участки цепи. Для этого амперметр подключают параллельно к каждой из них, убирают переключку, измеряют соответствующий ток и возвращают переключку на прежнее место.

Набор соединительных проводов предназначен для подключения к наборному полю источников энергии, пассивных элементов, электроизмерительных приборов и т. п.

Для выполнения расчетно-лабораторных работ (РЛР) по разделу «Линейные электрические цепи постоянного тока» используется **блок постоянных напряжений**. Он содержит:

– источник стабилизированного напряжения ИР, регулируемого в пределах $1 \div 24$ В;

– источник нерегулируемого напряжения ИН ($U_{и.н} \approx 20$ В).

Оба источника снабжены электронной защитой, отключающей их при превышении током нагрузки значения 200 мА. Источники напряжения расположены в верхнем съемном блоке слева от наборного поля.

Расчетно-лабораторная работа № 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Цель работы: 1) получение первоначальных навыков сборки электрических цепей, измерения сопротивлений, токов и напряжений; 2) снятие вольт-амперных характеристик источников и приемников электрической энергии; определение их параметров.

1. Основные теоретические положения

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи и потребления электрической энергии. Отдельные устройства, входящие в электрическую цепь, называются *элементами электрической цепи*. Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии, соединенные между собой проводами или линиями передачи.

В *источниках электрической энергии* (гальванических элементах, аккумуляторах, генераторах и т. п.) химическая, механическая, тепловая или другие виды энергии превращаются в электрическую. В *приемниках электрической энергии* (электронагревательных приборах, лампах накаливания, электрических двигателях и т. п.) наоборот, электрическая энергия преобразуется в тепловую, световую, механическую и другие виды.

Электрическая цепь, в которой протекает постоянный (не изменяющийся во времени по величине и направлению) ток, называется *электрической цепью постоянного тока*.

В цепях постоянного тока источник электрической энергии характеризуется величиной и направлением электродвижущей силы E и значением внутреннего сопротивления R_v , а приемник – сопротивлением R . При этом под сопротивлением R понимают элемент цепи (резистор), в котором происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в теплоту.

Условное графическое изображение сопротивления (резистора) с указанием выбранных положительных направлений тока и напряжения приведено на рис. 1.1, а.

Для описания источников и приемников энергии в цепях постоянного тока используют зависимости между напряжением U и током I ,

которые называются *вольт-амперными характеристиками* (ВАХ) этих элементов.

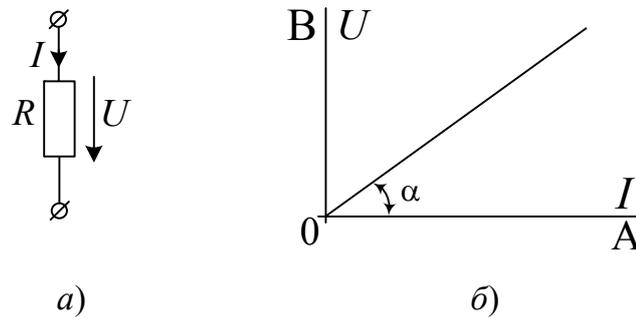


Рис. 1.1

Параметр R в общем случае зависит от тока I (например, вследствие нагрева сопротивления током). Вольт-амперная характеристика резистора при этом является нелинейной.

Однако если такая зависимость выражена слабо, ею можно пренебречь и имеет место прямая пропорциональность между напряжением на сопротивлении и током в нем, выражающая закон Ома:

$$U = RI. \quad (1.1)$$

В этом случае сопротивление R называется *линейным*. На рис. 1.1, б показана вольт-амперная характеристика линейного сопротивления. В данном методическом пособии рассматриваются линейные сопротивления.

Очевидно, линейное сопротивление R пропорционально тангенсу угла наклона прямолинейной ВАХ к оси тока:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{m_U \cdot AB}{m_I \cdot OB} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.2)$$

где m_U и m_I – масштабы напряжения (В/мм) и тока (А/мм) на чертеже.

В теории электрических цепей пользуются понятиями идеальный источник ЭДС и идеальный источник тока.

Идеальный источник ЭДС представляет собой активный элемент с двумя выводами, напряжение на которых $U = E$ не зависит от тока, проходящего через источник (рис. 1.2, б). Предполагается, что внутри такого идеального источника пассивные элементы отсутствуют и поэтому прохождение тока через него не вызывает падения напряжения в нем.

Ток в сопротивлении R_H , подключенном к идеальному источнику ЭДС (рис. 1.2, а), зависит от параметров E и R_H и равен

$$I = \frac{E}{R_H}. \quad (1.3)$$

Если выводы идеального источника ЭДС замкнуть накоротко, то ток теоретически должен быть бесконечно велик. Поэтому такой источник рассматривается как *источник бесконечной мощности*.

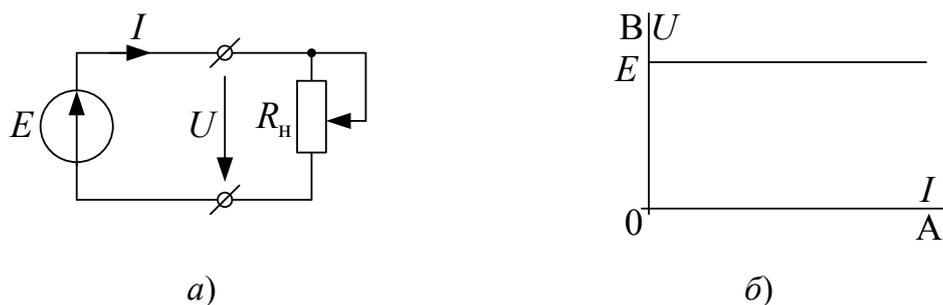


Рис. 1.2

Источник конечной мощности (его называют *источником напряжения*) изображается в виде идеального источника ЭДС с подключенным к нему последовательно сопротивлением R_B (рис. 1.3, а), которое является внутренним сопротивлением и ограничивает мощность, отдаваемую источником во внешнюю электрическую цепь.

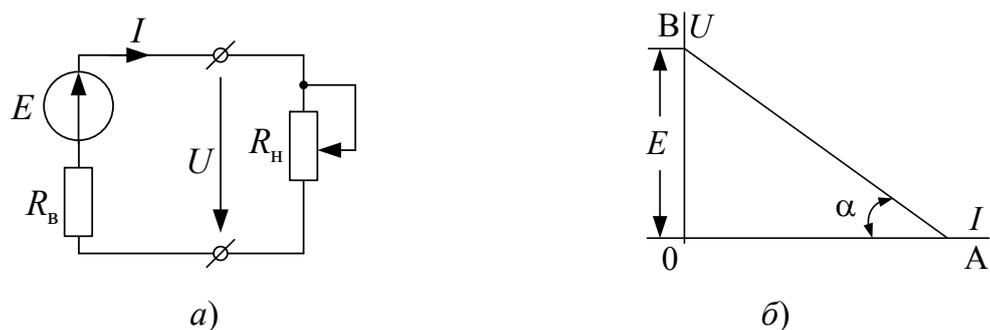


Рис. 1.3

Вольт-амперная характеристика такого источника (рис. 1.3, б), которую также называют *внешней характеристикой*, представляет собой зависимость напряжения на его зажимах от тока, проходящего через источник. Согласно второму закону Кирхгофа

$$U = E - R_B I. \quad (1.4)$$

Очевидно, что при $R_{\text{н}} = \infty$ (режим холостого хода) $I = 0$ и напряжение на зажимах источника принимает наибольшее значение $U_{\text{х.х}} = E$. Если же $R_{\text{н}} \rightarrow 0$ (режим короткого замыкания), напряжение на зажимах $U \rightarrow 0$ и ток I достигает максимального значения $I_{\text{к.з}} = E/R_{\text{в}}$. Тангенс угла α пропорционален сопротивлению $R_{\text{в}}$.

Поскольку величина $R_{\text{в}}$ реальных источников напряжения относительно мала, режим короткого замыкания для большинства из них является аварийным.

Идеальный источник тока представляет собой активный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах. Предполагается, что внутреннее сопротивление такого идеального источника бесконечно велико и поэтому величина сопротивления $R_{\text{н}}$, от которой зависит напряжение на зажимах источника, не влияет на его ток.

Условное обозначение идеального источника тока и его вольт-амперная характеристика приведены на рис. 1.4, а и б).

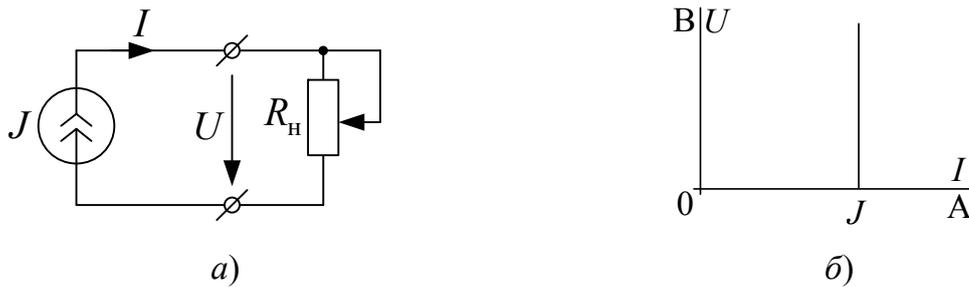


Рис. 1.4

По мере неограниченного увеличения сопротивления $R_{\text{н}}$ напряжение на зажимах источника и, соответственно, мощность, развиваемая им, неограниченно возрастают. Поэтому идеальный источник тока, как и идеальный источник ЭДС, рассматривается как *источник бесконечно большой мощности*.

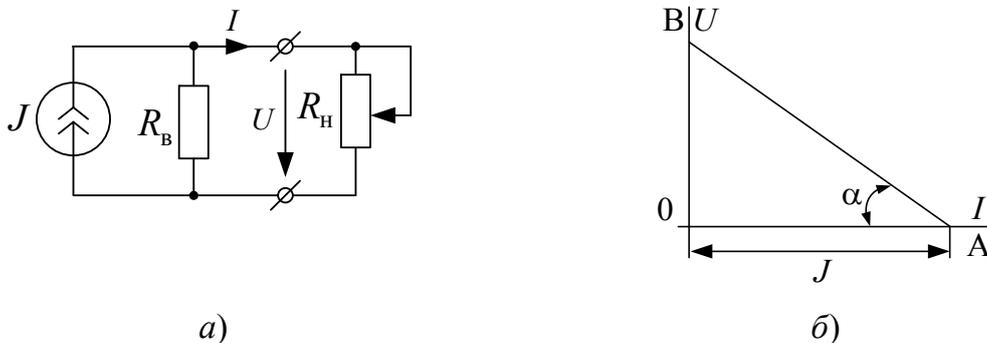


Рис. 1.5

Источник тока конечной мощности изображается в виде идеального источника тока с подключенным к его зажимам сопротивлением R_B (рис. 1.5, а), которое ограничивает мощность, отдаваемую источником во внешнюю электрическую цепь. Внешняя характеристика источника тока конечной мощности изображена на рис. 1.5, б.

Согласно первому закону Кирхгофа

$$I = J - \frac{U}{R_B}. \quad (1.5)$$

При $R_H = 0$ (режим короткого замыкания) $U = 0$ и ток I принимает наибольшее значение $I_{к.з} = J$. Если же $R_H \rightarrow \infty$ (режим холостого хода), ток $I \rightarrow 0$ и напряжение на зажимах U достигает максимального значения $U_{х.х} = JR_B$. Тангенс угла α пропорционален сопротивлению R_B .

Поскольку величина R_B реальных источников тока достаточно велика ($R_B \rightarrow \infty$), режим холостого хода для них является аварийным.

Из сопоставления вольт-амперных характеристик рис. 1.3, б и 1.5, б видно, что источник напряжения конечной мощности эквивалентен источнику тока конечной мощности при условии $E = R_B J$ и потому при расчете электрических цепей они могут быть взаимно заменяемы.

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник постоянного стабилизированного напряжения ИР, регулируемого в пределах 1÷24 В.

2. Источник постоянного нерегулируемого напряжения ИН ($U_{и.н} \approx 20$ В). Источники ИР и ИН расположены в верхнем съемном блоке слева от наборного поля.

3. Элементы 01÷09 (представляют собой резисторы типа МЛТ-2; находятся в ящике для элементов и могут быть установлены на наборном поле в соответствии с исследуемой цепью).

4. Блок переменного сопротивления (БПС); размещен в верхнем съемном блоке справа от наборного поля; позволяет установить величину сопротивления в диапазоне 1÷999 Ом со степенью регулирования 1 Ом.

5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Экспериментальная часть

1. Визуально (по маркировке на резисторах) определить номинальные параметры резисторов (элементы 01÷09): сопротивление $R_{нк}$, мощность рассеяния $P_{нк}$ и допустимое отклонение фактических значений сопротивлений R_k резисторов от номинальных $\delta_{нк}$, где $k = 1\div 9$ (здесь и в последующих расчетно-лабораторных работах цифру «0» в индексах сопротивлений, токов и напряжений следует опустить). Значения $R_{нк}$, $P_{нк}$ и $\delta_{нк}$ занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Элемент Параметр	01	02	03	04	05	06	07	08	09
$P_{нк}$, Вт									
$R_{нк}$, Ом									
$I_{нк}$, А									
$U_{нк}$, В									
R_k , Ом									
$\delta_{нк}$, %									
δ_k , %									

При определении значения $\delta_{нк}$ необходимо пользоваться табл. 1.2.

Таблица 1.2

Допуск δ_n , %	Обозначение	
	Новое	Старое
± 20	<i>M</i>	В
± 10	<i>K</i>	С
± 5	<i>J</i>	И
± 2	<i>G</i>	Л
± 1	<i>F</i>	Р

2. Рассчитать номинальный ток $I_{нк}$ и номинальное напряжение $U_{нк}$ каждого k -го резистора по формулам:

$$I_{нк} = \sqrt{\frac{P_{нк}}{R_{нк}}} \quad \text{и} \quad U_{нк} = R_{нк} I_{нк}, \quad (1.6)$$

используя номинальные значения $R_{нк}$ и $P_{нк}$; занести их в табл. 1.1.

3. Измерить фактическое сопротивление R_k резисторов $R_1 \div R_9$ *методом непосредственной оценки*. Для этого соответствующие зажимы измерительного прибора (мультиметра МУ-68 или универсального вольтметра В7-58/2) вынести на наборное поле стенда и поочередно подключать к ним данные резисторы. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

4. Отклонение δ_k фактических значений сопротивлений резисторов R_k от номинальных $R_{нк}$ определить по формуле

$$\delta_k = \frac{R_k - R_{нк}}{R_{нк}} 100 \% \quad (1.7)$$

и занести в табл. 1.1. Сравнить значения δ_k и $\delta_{нк}$. В случае $|\delta_k| > |\delta_{нк}|$ сообщить преподавателю (или мастеру производственного обучения).

5. Для самоконтроля на наборном поле стенда собрать цепь согласно схеме рис. 1.6.

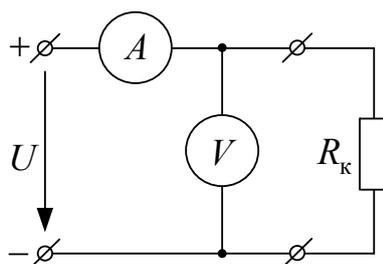


Рис. 1.6

При этом в качестве источника напряжения использовать регулируемый источник ИР, в качестве амперметра – ампервольтметр Ц 4311 или мультиметр МУ-68, а в качестве вольтметра – электронный вольтметр В7-58/2). Используя *метод амперметра и вольтметра*, измерить напряжение U_k и ток I_k резисторов $R_1 \div R_9$ и по закону Ома рассчитать фактическое значение R_k каждого из них. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 1.3.

Внимание! В процессе измерений показания вольтметра и амперметра не должны превышать соответствующие номинальные величины $U_{нк}$ и $I_{нк}$, определенные в п. 2 и занесенные в табл. 1.1.

Таблица 1.3

Элемент Параметр	01	02	03	04	05	06	07	08	09
U_k , В									
I_k , А									
R_k , Ом									

Если значения любого из сопротивлений $R_1 \div R_9$, занесенные в табл. 1.1 и 1.3, отличаются более чем на 10 %, следует установить ошибку измерений или расчетов и устранить ее.

6. Снять вольт-амперные характеристики двух резисторов, фактические сопротивления которых отличаются в $2 \div 2,5$ раза.

Для проведения эксперимента по-прежнему используется схема, приведенная на рис. 1.6. К источнику ИР, напряжение которого предварительно уменьшено до нуля, подключить один из выбранных резисторов. Далее, изменяя напряжение ИР от 0 до величины $0,8 U_{нк}$ через равные промежутки ΔU , произвести $5 \div 6$ измерений напряжения и тока (значение $U_{нк}$ для выбранного резистора взять из табл. 1.1). Аналогично снять вольт-амперную характеристику второго резистора. Результаты измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

№ п/п	Резистор		Резистор	
	U , В	I , А	U , В	I , А
1				
2				
3				
4				
5				
6				

7. Снять вольт-амперные характеристики источников ИН и ИР. Для этого необходимо собрать электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 1.7.

В качестве сопротивления нагрузки R_n следует использовать блок БПС (сопротивление блока предварительно установить максимальным), а для измерения напряжения на зажимах источника и тока в нем – те же приборы, что и в п. 5.

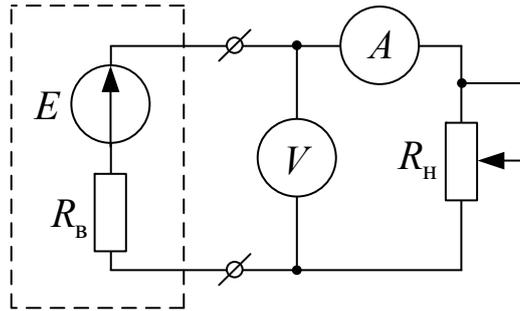


Рис. 1.7

В первую очередь необходимо снимать ВАХ нерегулируемого источника напряжения ИН, который включить в цепь при предварительно отключенном БПС. Поскольку цепь находится в режиме холостого хода, показание амперметра равно нулю, а вольтметр покажет напряжение $U_{x.x} = E_{и.н.}$. Далее подключить БПС и последовательно уменьшать его сопротивление таким образом, чтобы показание амперметра увеличивалось через одинаковые интервалы ΔI , равные, например, 20 мА. В диапазоне изменения тока от 0 до 120 мА снять 5÷6 показаний амперметра и вольтметра.

В той же последовательности снять ВАХ регулируемого источника ИР, причем напряжение холостого хода его $U_{x.x} = E_{и.р.}$ выставить равным $E_{и.н.}$. Результаты измерений занести в табл. 1.5.

Таблица 1.5

№ п/п	Источник ИН				Источник ИР			
	$U, В$	$I, А$	$E, В$	$R_B, Ом$	$U, В$	$I, А$	$E, В$	$R_B, Ом$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Наконец, по данным табл. 1.5 для каждого источника определить ЭДС внутреннее сопротивление R_B , которое согласно методу двух нагрузок равно:

$$R_B = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = \frac{U_{x.x} - U_2}{I_2}, \quad (1.8)$$

где напряжение U_1 и ток I_1 соответствуют режиму холостого хода, а напряжение U_2 и ток I_2 – режиму, при котором показание амперметра максимально.

4. Анализ результатов работы. Выводы

1. По данным табл. 1.1 и 1.3 сравнить результаты измерения сопротивлений резисторов $R_1 \div R_9$ методом непосредственной оценки и методом амперметра и вольтметра. Оценить различия между ними и в *выводах* объяснить причину этих различий.

2. По данным табл. 1.4 построить (в одних координатах) ВАХ двух резисторов. В *выводах* оценить их линейность; отметить, какая из характеристик круче по отношению к оси тока; объяснить почему.

3. По данным табл. 1.5 построить (в одних координатах) ВАХ источников напряжения ИН и ИР. В *выводах* оценить их линейность; отметить, какой из источников лучше; объяснить почему.

5. Содержание отчета

Отчет по данной расчетно-лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист по стандартной форме;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (схемы замещения исследуемых цепей);
- 4) основные расчетные формулы с примерами их применения;
- 5) таблицы с результатами вычислений и измерений;
- 6) ВАХ двух резисторов и двух источников напряжения ИН и ИР;
- 7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой электрическая цепь? Из каких основных элементов она состоит? Каковы функции этих элементов?

2. Какие элементы электрической цепи называют активными (пассивными)?

3. Что называют схемой электрической цепи?

4. Что представляет собой схема замещения электрической цепи? Из каких элементов она состоит?

5. Привести две схемы замещения источника электрической энергии. В чем отличие между ними?

6. Что называют вольт-амперной характеристикой элемента электрической цепи?

7. Привести схему для снятия вольт-амперной (внешней) характеристики источника напряжения.

8. Объяснить вид внешней характеристики источника напряжения.
9. Как по внешней характеристике источника напряжения определить его параметры?
10. Как влияет величина внутреннего сопротивления на внешнюю характеристику источника напряжения?
11. Чему равно внутреннее сопротивление идеальных источников ЭДС и тока?
12. Как по известному значению сопротивления резистора построить его вольт-амперную характеристику?
13. Начертить вольт-амперные характеристики двух резисторов, сопротивления которых отличаются в 2÷3 раза. Объяснить различие между ними.

Расчетно-лабораторная работа № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКОНОВ КИРХГОФА В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: 1) экспериментальная проверка выполнения законов Кирхгофа в линейных электрических цепях постоянного тока; 2) совершенствование навыков сборки разветвленных электрических цепей, а также измерения токов и напряжений.

1. Основные теоретические положения

Основой анализа электрических цепей являются уравнения равновесия токов и напряжений, составленные по законам Кирхгофа. Применение таких уравнений при экспериментальном исследовании позволяет убедиться в правильности определения значений и направления токов и напряжений, а также оценить погрешность, вызванную влиянием внутренних сопротивлений измерительных приборов либо нестабильностью параметров элементов цепи.

Для анализа электрических цепей постоянного тока рекомендуются следующие формулировки законов Кирхгофа:

I закон Кирхгофа

Первая формулировка: алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю, т. е.

$$\sum_k I_k = 0. \quad (2.1)$$

При этом знаки токов берутся с учетом выбранных положительных направлений: всем токам, направленным к узлу, в уравнении (2.1) присваивается одинаковый знак, например «плюс», и, соответственно, все токи, направленные от узла, входят в уравнение (2.1) с противоположным знаком.

Вторая формулировка: сумма токов, втекающих в любой узел электрической цепи, равна сумме токов, вытекающих из него.

II закон Кирхгофа

Первая формулировка: алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур, т. е.

$$\sum_k U_k = \sum_k I_k R_k = \sum_n E_n. \quad (2.2)$$

В каждую из сумм соответствующие слагаемые входят со знаком «плюс», если они совпадают с направлением обхода контура, и со знаком «минус», если они противоположны обходу.

Вторая формулировка: алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю, т. е.

$$\sum_k U_k = 0, \quad (2.3)$$

причем в алгебраическую сумму входят не только падения напряжения на пассивных элементах (резисторах), но и напряжения на зажимах источников энергии.

2. Исходные данные

Перед выполнением расчетно-лабораторной работы № 2 (далее – РЛР) каждая бригада получает задание, вариант которого состоит из двух цифр: первая из них соответствует номеру схемы, приведенной на рис. 2.1, а вторая цифра – номеру столбца в табл. 2.1, где содержатся сведения о величине напряжения U_{E_2} на зажимах источника ИР.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_{E_2} , В	9	10	11	12	13	9	10	11	12	13

Таким образом, в работе заданы:

- 1) схема замещения исследуемой электрической цепи согласно варианту задания;
- 2) величина напряжения на зажимах источника ИР;
- 3) резисторы $R_1 \div R_6$ (находятся в ящике для элементов);
- 4) измерительные приборы, установленные на стенде.

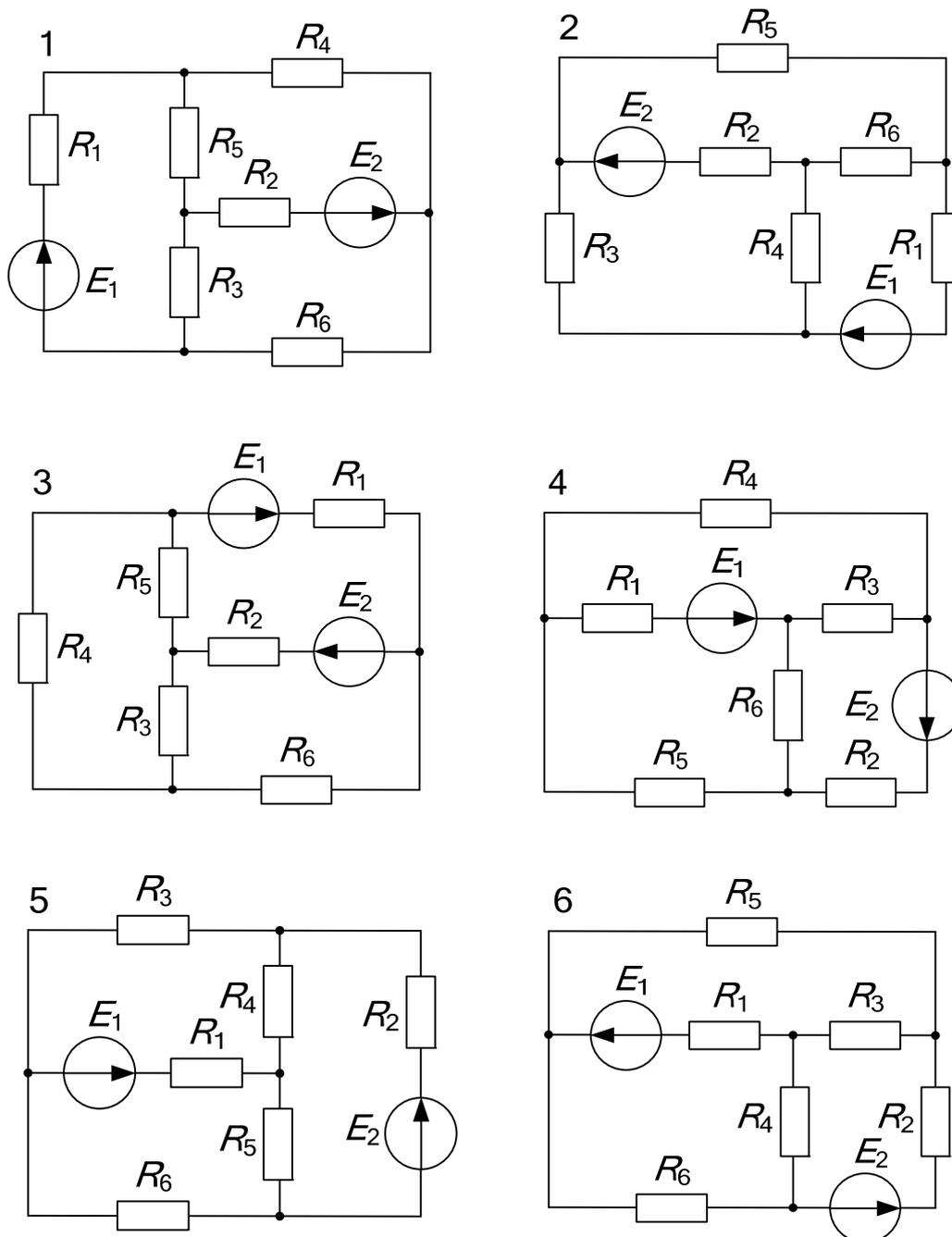


Рис. 2.1

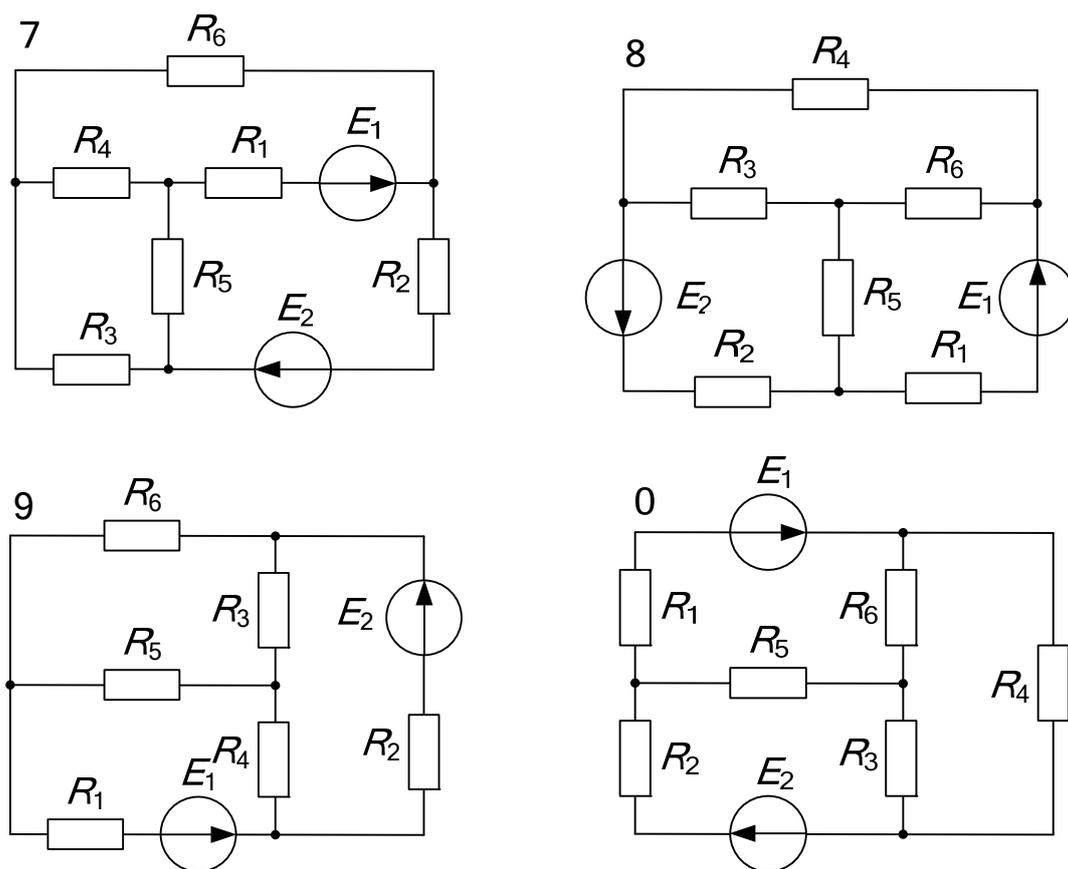


Рис. 2.1. Окончание (начало см. на с. 21)

В схемах рис. 2.1 источнику напряжения с ЭДС E_1 соответствует источник ИН, а источнику с ЭДС E_2 – источник ИР.

3. Экспериментальная часть

1. Вычертить схему замещения электрической цепи в соответствии с вариантом задания.

2. Собрать пассивную часть заданной электрической цепи на наборном поле стенда. При этом, используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из ветвей цепи.

Далее подключить источник регулируемого напряжения ИР и установить заданное напряжение на его зажимах. После чего подключить к цепи источник нерегулируемого напряжения ИН.

3. Электронным вольтметром В7-58/2 или мультиметром МУ-68 измерить напряжение на зажимах источника ИН, а также падения напряжений на каждом сопротивлении цепи. Результаты измерений занести в табл. 2.2. Вместе с тем отметить на элементах схемы замещения положительные направления измеренных напряжений или совпадающие с ними положительные направления токов в ветвях.

Таблица 2.2

Напряжение, В							
U_{E_1}	U_{E_2}	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6

4. Ампервольтметром Ц 4311 или мультиметром МУ-68 измерить величины токов в ветвях и занести их в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Ток, мА					
I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6

Индексы напряжений (табл. 2.2) и токов (табл. 2.3) в этой и последующих работах должны соответствовать номерам сопротивлений в ветвях электрической цепи.

5. Составить $(n - 1)$ уравнений баланса токов по первому закону Кирхгофа (где n – число узлов заданной цепи); подставить в них экспериментально снятые величины токов. Если алгебраическая сумма токов в любом из узлов (или в нескольких узлах) значительно отличается от нуля, следует установить ошибку измерений или расчетов и устранить ее.

6. Составить $[m - (n - 1)]$ уравнений баланса напряжений по второму закону Кирхгофа (где m – число ветвей цепи); подставить в них экспериментально снятые величины напряжений. Если алгебраическая сумма напряжений в одном или в нескольких независимых контурах значительно отличается от нуля, следует установить ошибку измерений или расчетов и устранить ее.

4. Содержание отчета

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист по стандартной форме;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (схему замещения исследуемой цепи; напряжение U_{E_2} на зажимах источника ИР);

4) уравнения баланса токов в узлах цепи и баланса напряжений в независимых контурах, составленные по законам Кирхгофа в общем виде, а также с учетом экспериментально снятых значений токов и напряжений;

5) вывод о результатах экспериментальной проверки выполнения законов Кирхгофа в электрических цепях постоянного тока.

Контрольные вопросы

1. Как формулируется первый закон Кирхгофа?
2. Как формулируется второй закон Кирхгофа?
3. Привести математическую запись первого и второго законов Кирхгофа.
4. Объяснить порядок составления уравнений по первому (второму) закону Кирхгофа.
5. Сколько независимых уравнений по первому и второму законам Кирхгофа необходимо составлять для любой схемы?
6. Каковы особенности составления уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для цепи, содержащей источник тока? Привести пример.

Расчетно-лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Цель работы: 1) приобретение навыков расчета электрической цепи постоянного тока с одним источником ЭДС методом эквивалентных преобразований; 2) дальнейшее совершенствование навыков сборки разветвленных электрических цепей, а также измерения токов и напряжений.

1. Основные теоретические положения

Расчет токов и напряжений в простых электрических цепях с одним источником энергии целесообразно выполнять методом эквивалентных преобразований (методом свертывания). Суть метода состоит в том, что вначале пассивная часть цепи, представляющая последовательное, параллельное или смешанное соединения элементов (сопротивлений), преобразуется к одному эквивалентному элементу сопротивлением $R_{\text{ЭКВ}}$ относительно зажимов (выводов) источника с напряжением U . Далее по закону Ома определяется ток источника:

$$I = \frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}}. \quad (3.1)$$

Наконец, выполняется расчет токов и напряжений в остальных ветвях цепи в соответствии с законом Ома и законами Кирхгофа.

При последовательном соединении резисторов (рис. 3.1) эквивалентное сопротивление равно сумме их сопротивлений, т. е.

$$R_{\text{ЭКВ}} = \sum_k R_k = R_1 + R_2 + R_3. \quad (3.2)$$

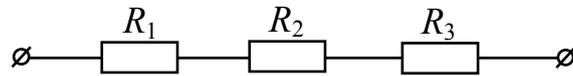


Рис. 3.1

В схемах с параллельным соединением резисторов (рис. 3.2) вначале определяют эквивалентную проводимость $G_{\text{ЭКВ}}$, равную сумме проводимостей параллельных ветвей:

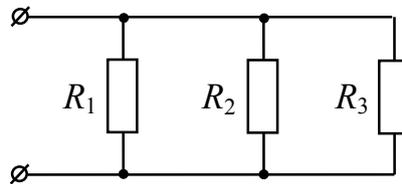


Рис. 3.2

$$G_{\text{ЭКВ}} = \sum_k G_k = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}{R_1 R_2 R_3} = \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}},$$

откуда

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{G_{\text{ЭКВ}}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}. \quad (3.3)$$

В случае параллельного соединения 2-х резисторов

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.4)$$

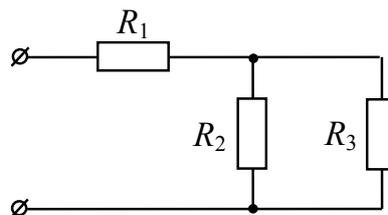


Рис. 3.3

При смешанном соединении (рис. 3.3), очевидно,

$$R_{\text{экв}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.5)$$

Иногда при расчете разветвленных цепей с одним источником энергии встречаются более сложные соединения пассивных элементов – «треугольником» или «звездой» (рис. 3.4).

В случае замены сопротивлений «треугольника» эквивалентной «звездой» сопротивления последней определяются в виде:

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_3 = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (3.6)$$

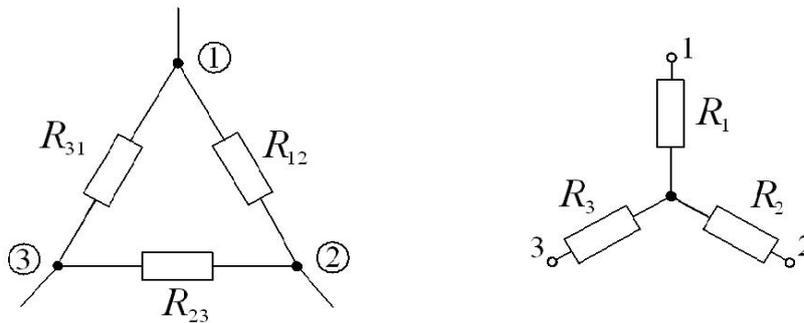


Рис. 3.4

В случае обратной замены:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}; \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1};$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2}. \quad (3.7)$$

Для проверки правильности расчета методом эквивалентных преобразований обычно составляют баланс мощностей, согласно которому мощность, развиваемая источником, и суммарная мощность всех приемников должны быть равны:

$$P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad UI = \sum_k R_k I_k^2, \quad (3.8)$$

где U – напряжение на зажимах источника; I – ток в источнике; k – количество резисторов в цепи.

2. Исходные данные

Как и в предыдущей расчетно-лабораторной работе, вариант задания состоит из двух цифр. Первая из них соответствует номеру схемы, приведенной на рис. 3.5, а вторая цифра – номеру столбца в табл. 3.1, где содержатся сведения о величине ЭДС источника ИР.

Таким образом, в работе используются:

1. Источник постоянного стабилизированного напряжения ИР, регулируемого в пределах $1 \div 24$ В.
2. Резисторы $R_1 \div R_6$, фактические сопротивления которых определены ранее в РЛР № 1 (табл. 1.1).
3. Измерительные приборы, установленные на стенде.

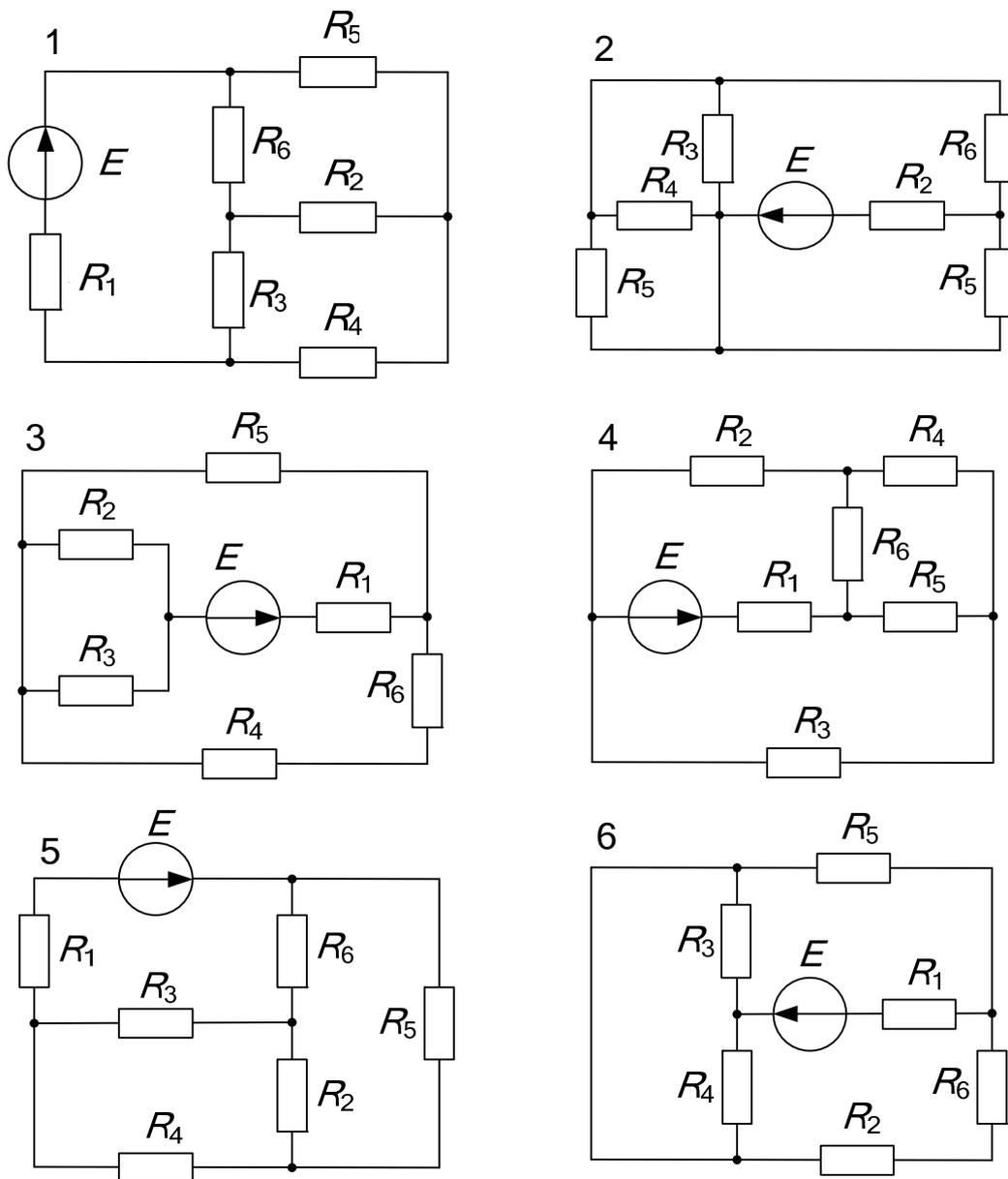


Рис. 3.5

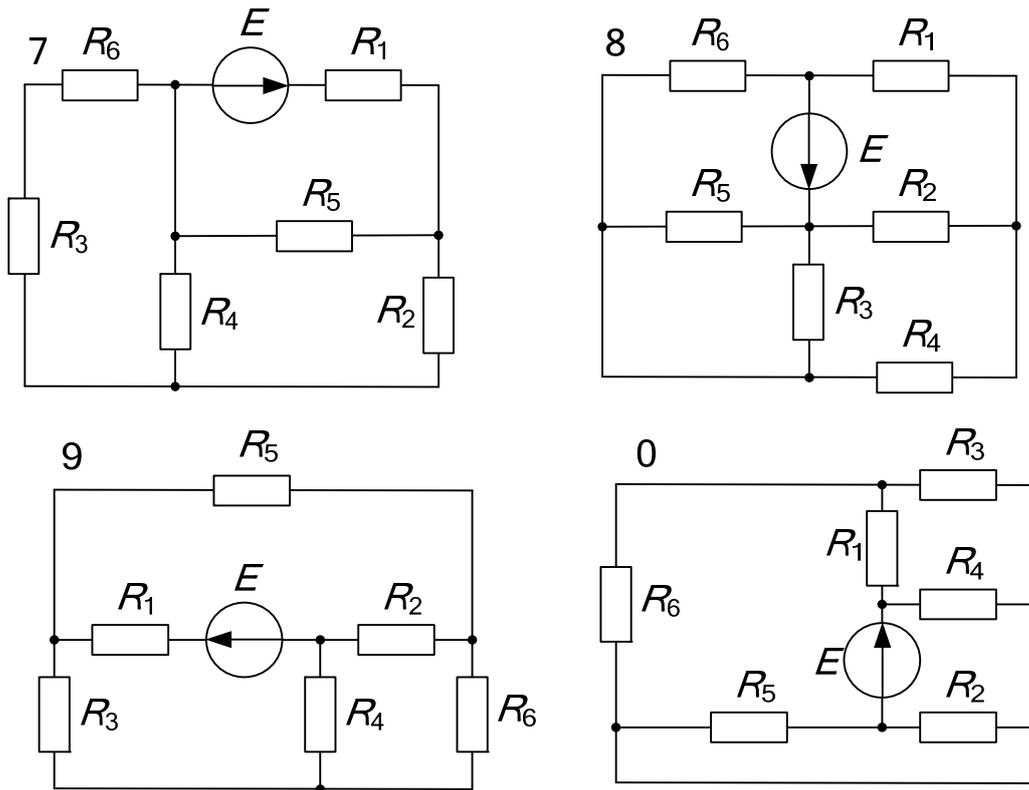


Рис. 3.5. Окончание (начало см. на с. 27)

Таблица 3.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E, \text{В}$	15	17	19	21	23	16	18	20	22	23

3. Расчетная часть

1. Рассчитать токи в ветвях заданной цепи методом эквивалентных преобразований (пример расчета приведен в Приложении 1). Результаты расчета занести в табл. 3.2, где для сравнения предварительно привести номинальные значения токов соответствующих резисторов, определенные ранее в РЛР № 1.

В том случае, когда расчетные величины одного или нескольких токов окажутся больше их номинальных значений, изменить по согласованию с преподавателем величину ЭДС E и расчет повторить.

2. Составить баланс мощностей.

Таблица 3.2

Значение тока	Ток, А					
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
Номинальное						
Расчетное						
Измеренное						

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную электрическую цепь на стенде. Используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из ветвей цепи.

2. Используя универсальный вольтметр В7-58/2 или мультиметр МУ-68, установить заданную величину ЭДС источника ИР.

3. Ампервольтметром Ц 4311 или мультиметром МУ-68 измерить величины токов в ветвях и занести их в табл. 3.2.

Результаты измерений сопоставить с соответствующими данными расчета. В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность элементов цепи и соединительных проводов и др.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Вывод

В выводе сделать заключение о степени соответствия расчетных и экспериментальных результатов.

6. Содержание отчета

Отчет по данной расчетно-лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист по стандартной форме;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (схему замещения исследуемой цепи и параметры ее элементов);
- 4) расчет заданной цепи методом эквивалентных преобразований; баланс мощностей;
- 5) таблицы с результатами вычислений и измерений;
- 6) вывод с заключением о степени соответствия расчетных и экспериментальных результатов.

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода эквивалентных преобразований?
2. Объяснить необходимость эквивалентных преобразований при расчете электрических цепей.
3. Изобразить схему смешанного соединения приемников электрической энергии. Как определяется эквивалентное сопротивление такой схемы?
4. Изобразить схему соединения приемников «звездой», «треугольником».

Расчетно-лабораторная работа № 4
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУМЯ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Цель работы: 1) приобретение навыков расчета электрической цепи постоянного тока с двумя источниками ЭДС различными методами; 2) совершенствование навыков экспериментального исследования таких цепей.

1. Основные теоретические положения

В теории электрических цепей решаются задачи двух типов. К первому типу относятся *задачи анализа*, в которых известны схема и элементы цепи, а требуется определить токи, напряжения и мощности тех или иных участков. Ко второму типу относятся *задачи синтеза* (обратные задачи), в которых, например, заданы токи и напряжения, а требуется определить схему цепи и выбрать ее элементы. В практической электротехнике чаще встречаются задачи анализа. Изучению методов расчета таких задач посвящены данная и ряд последующих расчетно-лабораторных работ.

При расчете линейных электрических цепей используют I и II законы Кирхгофа, которые являются наиболее общими и универсальными законами и лежат в основе всех методов расчета.

В случае расчета цепи *методом уравнений Кирхгофа* (МУК) рекомендуется следующая последовательность действий: сначала произвольно выбирают условные положительные направления токов во всех ветвях цепи; затем составляют уравнения для узлов на основании *первого* закона Кирхгофа, и, наконец, составляют уравнения для независимых контуров на основании *второго* закона Кирхгофа.

Если электрическая цепь содержит, например, m ветвей и n узлов, то на основании первого и второго законов Кирхгофа можно составить, соответственно, $(n - 1)$ и $[m - (n - 1)]$ взаимно независимых уравнений, сумма которых, равная в конечном итоге m , необходима и достаточна для определения m токов (во всех ветвях цепи).

При наличии в цепи источника тока его ток J , как и прежде, учитывают в уравнениях для узлов. А при составлении уравнений по второму закону Кирхгофа ветвь с источником тока J включать в независимые контуры не рекомендуется.

Если значения некоторых токов в результате расчета получаются со знаком «минус», то действительные направления их будут противоположны выбранным.

Существенный недостаток МУК – рост количества уравнений с ростом числа ветвей цепи. Число уравнений, подлежащих решению, можно сократить, если воспользоваться методом узловых потенциалов.

Метод узловых потенциалов (МУП) является одним из основных расчетных методов. Его суть заключается в том, что вначале, используя первый закон Кирхгофа и закон Ома, определяют потенциалы узлов цепи, а затем – токи в ветвях. Число решаемых уравнений, таким образом, сокращается до величины $(n - 1)$, где n – число узлов.

Рекомендуется следующий порядок расчета электрической цепи методом узловых потенциалов:

1. Задают (произвольно) условные положительные направления токов в ветвях цепи.

2. Определяют число узлов цепи и нумеруют их.

3. Один из узлов принимают за базовый, полагая потенциал его равным нулю.

4. Для остальных узлов составляют уравнения по первому закону Кирхгофа. При этом желательно токи, вытекающие из узлов, записывать со знаком «+», а токи, втекающие в узлы – со знаком «-».

5. Используя закон Ома, выражают токи через потенциалы узлов и параметры элементов ветвей. Подставляют эти выражения в уравнения п. 4. После несложных математических преобразований получают систему уравнений относительно неизвестных потенциалов узлов цепи.

6. Решают систему уравнений п. 5, определяют потенциалы узлов цепи и далее по закону Ома – токи во всех ветвях цепи.

Пример расчета действительных токов в ветвях электрической цепи методом узловых потенциалов приведен в Приложении 2.

Другим важным методом является *метод контурных токов* (МКТ), в основе которого лежат уравнения, записанные по второму закону Кирхгофа.

В расчет вводятся контурные токи, замыкающиеся по независимым контурам. Для них составляются уравнения по второму закону Кирхгофа. Число решаемых уравнений по сравнению с МУК сокращается до числа независимых контуров. Действительные токи в ветвях цепи определяются как алгебраическая сумма контурных токов. При этом первый закон Кирхгофа удовлетворяется автоматически.

Рекомендуется следующий порядок расчета электрической цепи методом контурных токов:

1. Выбирают произвольно условные положительные направления действительных токов в ветвях цепи.

2. Определяют независимые контуры рассматриваемой цепи.

3. Составляют уравнения относительно действительных токов для независимых контуров по второму закону Кирхгофа.

4. Выбирают произвольно направления контурных токов и действительные токи выражают через контурные.

При этом в смежных ветвях, принадлежащих нескольким независимым контурам, действительные токи равны алгебраической сумме контурных токов, а ветвях, не являющихся смежными, – равны контурным токам.

5. Подставляют выражения действительных токов в уравнения п. 3 и после несложных математических преобразований получают систему уравнений относительно неизвестных контурных токов.

6. Решают данную систему уравнений; тем самым определяют контурные токи.

7. Наконец, по выражениям п. 4 определяют действительные токи во всех ветвях цепи.

Пример расчета действительных токов в ветвях электрической цепи методом контурных токов приведен в Приложении 3.

Иногда при расчете сложных электрических цепей, содержащих небольшое количество источников электрической энергии, выгодно использовать *метод наложения* (МН), в основе которого лежит принцип наложения.

Принцип наложения относится к линейным системам независимо от их физической природы и применительно к электрическим цепям формулируется следующим образом: «Ток в любой ветви электрической цепи (схемы) равен алгебраической сумме токов, создаваемых в этой ветви каждым источником электрической энергии в отдельности».

Метод наложения заключается в том, что электрическая цепь, содержащая несколько источников энергии, рассчитывается при действии каждого из них в отдельности. При этом остальные источники удаляются, а их внутренние сопротивления сохраняются. Определенные таким образом частичные токи впоследствии алгебраически суммируются, т. е. учитывается направление каждого из них относительно положительного направления действительного тока в рассматриваемой ветви.

Рекомендуется следующий порядок расчета электрической цепи методом наложения:

1. Выбирают произвольно условные положительные направления действительных токов в ветвях цепи.

2. Представляют исследуемую электрическую цепь в виде нескольких частичных схем, каждая из которых содержит лишь один источник энергии. При этом остальные источники удаляют, а их внутренние сопротивления сохраняют.

3. Выбирают условные положительные направления частичных токов в каждой из частичных схем и рассчитывают их.

При этом рациональным методом расчета чаще всего является метод эквивалентных преобразований.

4. Рассчитывают действительные токи во всех ветвях путем алгебраического суммирования соответствующих частичных токов.

Пример расчета действительных токов в ветвях электрической цепи методом наложения приведен в Приложении 4.

2. Исходные данные

Вариант задания по-прежнему состоит из двух цифр. Первая из них соответствует номеру схемы, приведенной на рис. 4.1, а вторая цифра – номеру столбца в табл. 4.1, где указан метод расчета, а также содержатся сведения о величинах ЭДС E_1 и E_2 двух регулируемых источников ИР.

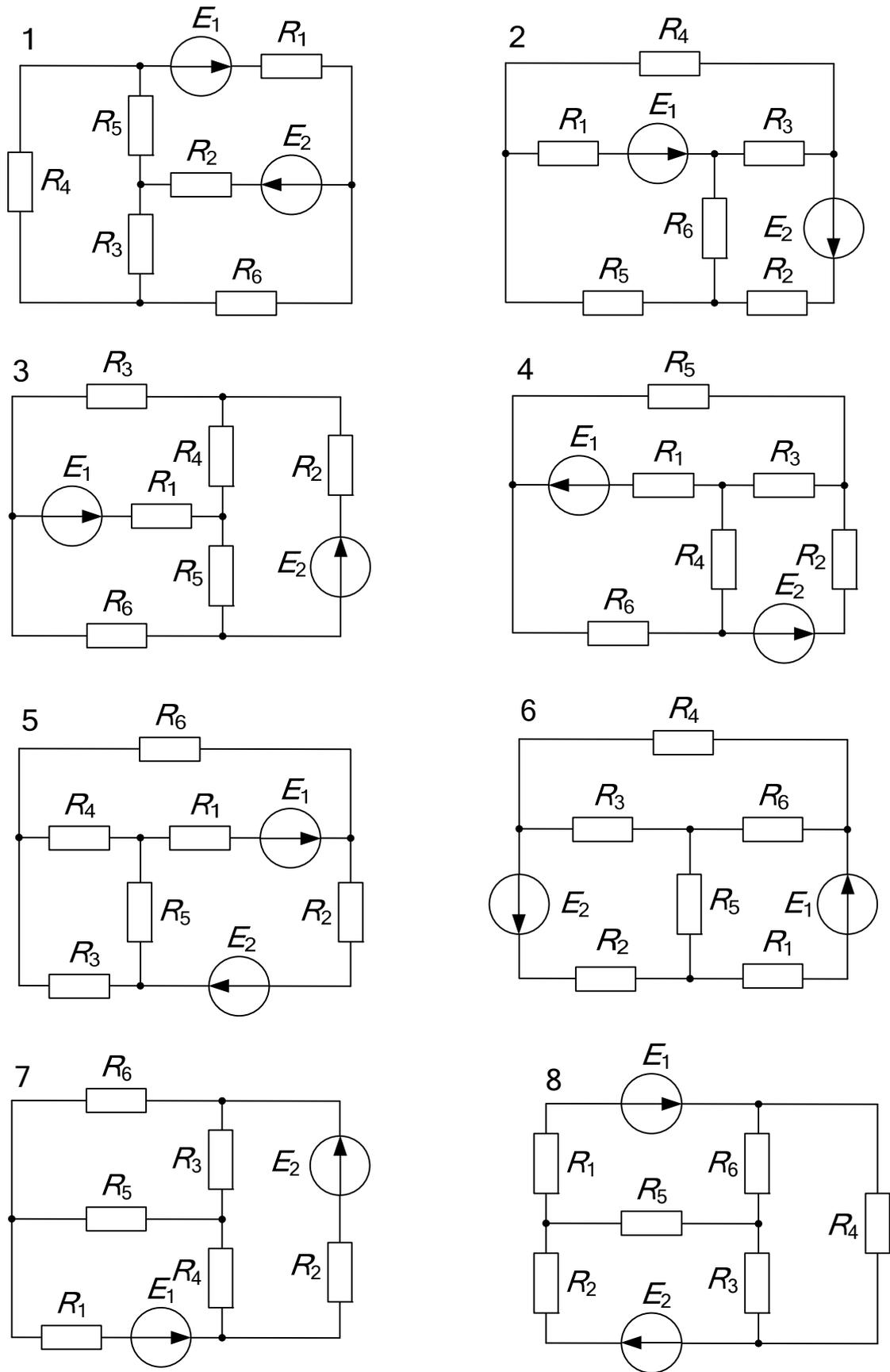
Один из них имеется на каждом стенде, а в качестве второго источника следует использовать регулируемый источник ИР соседнего стенда. По согласованию с преподавателем можно вместо одного из регулируемых источников использовать нерегулируемый источник ИН, но в этом случае в дальнейших расчетах необходимо учесть его внутреннее сопротивление, определенное в РЛР № 1 (табл. 1.5).

Таким образом, в работе используются:

1. Источники постоянного стабилизированного напряжения ИР, регулируемого в пределах $1 \div 24$ В.

2. Резисторы $R_1 \div R_6$, фактические сопротивления которых определены ранее в РЛР № 1 (табл. 1.1).

3. Измерительные приборы, установленные на стенде.



Puc. 4.1

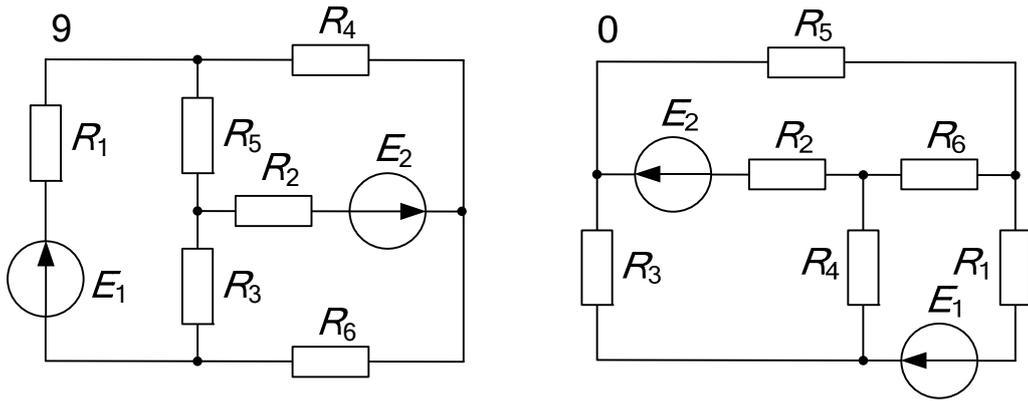


Рис. 4.1. Окончание (начало см. на с. 34)

Таблица 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Метод расчета	МКТ	МУП	МН	МКТ	МУП	МН	МКТ	МУП	МН	МКТ
E_1 , В	19	20	21	18	17	20	19	21	16	10
E_2 , В	10	9	13	12	11	14	8	10	21	20

3. Расчетная часть

1. Рассчитать токи в ветвях электрической цепи заданным методом (примеры расчета приведены в Приложениях 2–4). Результаты расчета занести в табл. 4.2, где для сравнения предварительно привести номинальные значения токов соответствующих резисторов, определенные ранее в РЛР № 1.

Таблица 4.2

Значение тока	Ток, А					
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
Номинальное						
Расчетное						
Измеренное						

В том случае, когда расчетные величины одного или нескольких токов окажутся больше их номинальных значений, изменить по согласованию с преподавателем величины ЭДС E_1 и E_2 и повторить расчет.

2. Составить баланс мощностей.

3. Построить потенциальную диаграмму для замкнутого контура, включающего обе ЭДС. Для этого предварительно ввести буквен-

ные (или цифровые) обозначения соответствующих узлов и промежуточных точек (в ветвях с ЭДС); рассчитать их потенциалы, используя значения токов из табл. 4.2. Расчетные значения потенциалов занести в табл. 4.3 (пример расчета и построения потенциальной диаграммы приведен в Приложении 3).

Таблица 4.3

Значение потенциала	Потенциал, В				
	φ_a	φ_b	φ_k
Расчетное					
Измеренное					

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную электрическую цепь на стенде. Используя переключки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из ветвей цепи.

2. Используя электронный вольтметр В7-58/2 или мультиметр МУ-68, установить заданные величины ЭДС E_1 и E_2 источников ИР.

3. Ампервольтметром Ц 4311 или мультиметром МУ-68 измерить величины токов в ветвях и занести их в табл. 4.2.

Результаты измерений сопоставить с соответствующими данными расчета. В случае их существенного различия установить возможные причины. После их устранения эксперимент повторить.

4. Используя электронный вольтметр В7-58/2 или мультиметр МУ-68, измерить потенциалы узлов и промежуточных точек заданного контура цепи, считая равным нулю потенциал того же узла, что и в расчете. Измеренные значения потенциалов занести в табл. 4.3 и сравнить с расчетными. В случае их существенного различия установить возможные причины и устранить их.

5. Анализ полученных результатов. Вывод

В выводе сделать заключение о степени соответствия расчетных и экспериментальных результатов.

6. Содержание отчета

Отчет по данной расчетно-лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист по стандартной форме;
- 2) цель работы;

- 3) исходные данные (схему замещения исследуемой цепи и параметры ее элементов);
- 4) расчет действительных значений токов в ветвях цепи заданным методом; баланс мощностей;
- 5) потенциальную диаграмму и ее расчет;
- 6) вывод с заключением о степени соответствия результатов расчета и эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Сколько и каких уравнений необходимо составить в случае расчета разветвленной электрической цепи методом уравнений Кирхгофа?
2. Какова особенность составления уравнений по первому (второму) законам Кирхгофа?
3. Привести последовательность расчета сложной электрической цепи методом узловых потенциалов.
4. Сформулировать закон Ома для участка цепи с ЭДС.
5. Какой из узлов цепи в случае расчета токов МУП следует принимать за базовый? Объяснить почему.
6. Как определяются собственные и общие узловые проводимости? узловые токи?
7. Привести последовательность расчета сложной электрической цепи методом контурных токов.
8. Сколько и каких уравнений необходимо составить в случае расчета разветвленной электрической цепи МКТ?
9. Как определяются действительные токи в ветвях цепи через контурные?
10. Как определяются собственные и общие сопротивления контуров? контурные ЭДС?
11. Что представляет собой баланс мощностей в электрической цепи постоянного тока?
12. Как определить падение напряжения на источнике тока? Привести пример.
13. Что понимают под потенциальной диаграммой участка цепи или замкнутого контура?
14. Дать сравнительную оценку МУК, МУП и МКТ.
15. Каково практическое значение потенциальных диаграмм?
16. Как по потенциальной диаграмме определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника напряжения? величину тока в ветви?

17. Привести последовательность расчета сложной электрической цепи методом наложения.

18. Сколько вспомогательных расчетных схем необходимо сформировать в случае расчета сложной электрической цепи МН? Что представляет собой каждая из этих схем?

19. Как определяются действительные токи в ветвях цепи в случае расчета их МН?

Расчетно-лабораторная работа № 5

АКТИВНЫЙ ДВУХПОЛЮСНИК В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: 1) приобретение навыков расчета тока в выделенной ветви сложной электрической цепи методом эквивалентного генератора; 2) изучение способов экспериментального определения параметров активного двухполюсника (эквивалентного генератора).

1. Основные теоретические положения

В любой электрической цепи можно мысленно выделить какую-то одну ветвь, а всю оставшуюся часть цепи независимо от ее структуры и сложности условно изобразить некоторым прямоугольником. По отношению к выделенной ветви вся схема, обозначенная прямоугольником, представляет собой так называемый *двухполюсник*.

Двухполюсники, содержащие источники электрической энергии, называют *активными*, а двухполюсники, не содержащие источников электрической энергии – *пассивными*.

Всякий пассивный двухполюсник является потребителем электрической энергии и характеризуется одной величиной – сопротивлением $R_{\text{вх}}$, которое называют *входным сопротивлением* пассивного двухполюсника. Если известна схема пассивного двухполюсника, то для определения сопротивления $R_{\text{вх}}$ нужно тем или иным способом «свернуть» ее относительно двух заданных выводов (зажимов).

Активный двухполюсник, представляющий собой сколь угодно сложную цепь с источниками энергии, согласно *теореме об активном двухполюснике* (теореме Гельмгольца–Тевенена) может быть заменен эквивалентным генератором. ЭДС $E_{\text{э.г}}$ эквивалентного генератора численно равна напряжению холостого хода на зажимах выделенной ветви, а внутреннее сопротивление $R_{\text{в}}$ – входному сопротивлению $R_{\text{вх}}$ цепи относительно тех же зажимов.

Метод расчета тока в выделенной ветви, основанный на замене активного двухполюсника эквивалентным генератором, принято называть *методом эквивалентного генератора* (МЭГ).

Рекомендуется следующая последовательность расчета тока этим методом:

1. Размыкают ветвь с неизвестным током; тем самым обеспечивают режим холостого хода относительно выделенной ветви.

2. Рассчитывают напряжение холостого хода $U_{x.x}$ на зажимах разомкнутой ветви.

3. Определяют входное сопротивление $R_{вх}$ всей схемы относительно тех же зажимов; при этом источники ЭДС удаляют, сохраняя их внутреннее сопротивление, а ветви с источниками тока размыкают.

4. Рассчитывают искомый ток по формуле

$$I = \frac{E_{\text{Э.Г}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{н}}} = \frac{U_{x.x}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{н}}}, \quad (5.1)$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление выделенной ветви.

Если сопротивление выделенной ветви $R_{\text{н}} = 0$, то в этой ветви имеет место режим короткого замыкания и протекающий по ней ток – это ток короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$.

Согласно (5.1) при $R_{\text{н}} = 0$

$$I_{\text{к.з}} = \frac{U_{x.x}}{R_{\text{вх}}}. \quad (5.2)$$

Из формулы (5.2) следует простой *метод экспериментального определения параметров эквивалентного генератора*: $E_{\text{Э.Г}} = U_{x.x}$ и $R_{\text{в}} = R_{\text{вх}}$. Для этого необходимо измерить напряжение холостого хода на зажимах разомкнутой ветви $U_{x.x}$ и ток короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$ в этой ветви. Тогда внутреннее сопротивление $R_{\text{в}}$ определится в виде:

$$R_{\text{в}} = R_{\text{вх}} = \frac{U_{x.x}}{I_{\text{к.з}}}. \quad (5.3)$$

Поскольку для определения параметров эквивалентного генератора используются режимы холостого хода и короткого замыкания в выделенной ветви, метод иногда называют *методом холостого хода и короткого замыкания*.

В тех случаях, когда при проведении эксперимента не удастся осуществить режимы холостого хода и короткого замыкания, пара-

метры эквивалентного генератора находят *методом двух нагрузок*. Пусть известно, что при $R_{\text{н}} = R_{\text{н1}}$ напряжение и ток в выделенной ветви принимают значения $U_{\text{н1}}$ и $I_{\text{н1}}$, а при $R_{\text{н}} = R_{\text{н2}} - U_{\text{н2}}$ и $I_{\text{н2}}$.

Тогда, согласно (5.1):

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{х.х}} &= R_{\text{вх}} I_{\text{н1}} + U_{\text{н1}}; \\ U_{\text{х.х}} &= R_{\text{вх}} I_{\text{н2}} + U_{\text{н2}}. \end{aligned} \right\}$$

Решая данную систему уравнений относительно $U_{\text{х.х}}$ и $R_{\text{вх}}$, получим:

$$U_{\text{х.х}} = \frac{U_{\text{н1}} I_{\text{н2}} - U_{\text{н2}} I_{\text{н1}}}{I_{\text{н2}} - I_{\text{н1}}}, \quad R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{н1}} - U_{\text{н2}}}{I_{\text{н2}} - I_{\text{н1}}}. \quad (5.4)$$

Используя значения $U_{\text{н1}}$, $I_{\text{н1}}$ и $U_{\text{н2}}$, $I_{\text{н2}}$, можно определить параметры активного двухполюсника графически, путем построения его внешней характеристики. Для этого в координатах U, I необходимо отметить точки, соответствующие режимам $(U_{\text{н1}}, I_{\text{н1}})$ и $(U_{\text{н2}}, I_{\text{н2}})$. Поскольку цепь линейная, внешняя характеристика двухполюсника представляет собой прямую, проведенную через эти точки. Точки пересечения характеристики с координатными осями соответствуют $U_{\text{х.х}}$ и $I_{\text{к.з}}$.

2. Исходные данные

Номер варианта задания, схема замещения электрической цепи, параметры источников энергии и пассивных элементов, а также измерительные приборы остаются теми же, что и в РЛР № 4.

3. Расчетная часть

1. Рассчитать ток I_6 в ветви с резистором R_6 методом эквивалентного генератора. Расчетные значения параметров генератора $U_{\text{х.х}} = E_{\text{э.г}}$ и $R_{\text{в}} = R_{\text{вх}}$, а также токов I_6 и $I_{\text{к.з}}$ занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значение параметра	Параметры активного двухполюсника			
	$U_{\text{х.х}}, \text{В}$	$R_{\text{в}}, \text{Ом}$	$I_{\text{к.з}}, \text{А}$	I_6
Расчетное				
Измеренное методом ХХ и КЗ				
Измеренное методом 2-х нагрузок				

Если величина тока I_6 отличается от соответствующего значения, рассчитанного в РЛР № 4, более чем на 5 %, необходимо найти ошибку и повторить расчет.

2. Задаваясь семью значениями сопротивления $R_6(0; 0,5R_B; 0,75R_B; R_B; R_B; 3R_B$ и $5R_B)$, по (5.1) рассчитать соответствующие значения тока и мощности, выделяющейся в сопротивлении R_6 . Результаты расчета занести в табл. 5.2. Построить зависимость $P_6 = f(R_6)$.

Таблица 5.2

R_6 , Ом							
I_6 , А	вычислено						
	измерено						
P_6 , Вт							

4. Экспериментальная часть

1. Собрать исследуемую цепь на стенде. Отключить резистор R_6 и измерить напряжение $U_{x,x}$ на зажимах разомкнутой ветви электронным вольтметром В7-58/2 или мультиметром МУ-68. Далее, к тем же зажимам подключить ампервольтметр Ц 4311 или мультиметр МУ-68 и измерить ток короткого замыкания $I_{к.з.}$. Наконец, отключить источники напряжения, закоротить места их включения перемычками и мультиметром МУ-68 или электронным вольтметром В7-58/2 замерить величину входного сопротивления двухполюсника. Экспериментальные данные занести в табл. 5.1.

2. Убрать перемычки и подключить источники напряжения согласно схеме замещения исследуемой цепи. В выделенную ветвь вместо резистора R_6 подключить БПС и ампервольтметр Ц 4311. Кроме того, параллельно БПС подключить электронный вольтметр В7-58/2.

Установить сопротивление блока равным $0,5R_6$. Измерить величины $U_{н1}$ и $I_{н1}$ и занести их в табл. 5.3. Подобные измерения повторить для $R_{БПС} = 2,5 R_6$. Их результаты также занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

$R_{БПС} = 0,5R_6$		$R_{БПС} = 2,5R_6$	
$U_{н1}$, В	$I_{н1}$, А	$U_{н2}$, В	$I_{н2}$, А

Рассчитать параметры активного двухполюсника по формулам (5.4) и занести их в табл. 5.1.

3. По данным табл. 5.3 построить внешнюю характеристику активного двухполюсника $U(I)$, по которой определить его параметры. Результаты аналитического и графического расчета сравнить.

4. Последовательно установить семь значений сопротивления БПС согласно табл. 5.2, измерить соответствующие значения тока I_6 ампервольтметром Ц 4311 или мультиметром МУ-68, занести их в табл. 5.2 и сравнить с расчетными величинами.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

1. По данным табл. 5.1 сравнить значения параметров активного двухполюсника $U_{x,x} = E_{э.г}$ и $R_B = R_{вх}$, рассчитанные методом эквивалентного генератора и полученные экспериментально. *Сделать вывод* о степени соответствия результатов расчета и эксперимента.

2. *Сделать вывод* об особенностях экспериментального определения $U_{x,x}$ и R_B методом холостого хода и короткого замыкания, а также методом 2-х нагрузок.

3. По зависимости $P_6 = f(R_6)$ оценить, действительно ли мощность, потребляемая сопротивлением R_6 в согласованном режиме, будет максимальной. *Сделать соответствующий вывод.*

6. Содержание отчета

Отчет по данной расчетно-лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист по стандартной форме;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (схему замещения исследуемой цепи и параметры ее элементов);
- 4) расчет заданной цепи методом эквивалентного генератора;
- 5) таблицы с результатами вычислений и измерений;
- 6) графический расчет параметров активного двухполюсника по результатам метода двух нагрузок;
- 7) зависимость $P_6 = f(R_6)$;
- 8) выводы.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой двухполюсник? Какие двухполюсники бывают?
2. Сформулировать теорему об активном двухполюснике (теорему Гельмгольца–Тевенена).
3. Назвать основные параметры активного двухполюсника. Какова связь между ними?
4. Как определить параметры активного двухполюсника расчетным путем?
5. Каковы особенности экспериментального определения параметров активного двухполюсника методом холостого хода и короткого замыкания?
6. Как определяют параметры активного двухполюсника методом двух нагрузок?
7. Изложить порядок расчета тока в одной из ветвей сложной электрической цепи методом эквивалентного генератора.
8. Объяснить характер изменения мощности резистора, подключенного к зажимам активного двухполюсника, от его сопротивления.
9. Объяснить характер изменения мощности резистора, подключенного к зажимам активного двухполюсника, от величины тока, протекающего по этому сопротивлению.
10. Как использовать метод эквивалентного генератора, если выделенная ветвь содержит источник энергии?

Расчетно-лабораторная работа № 6

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПО ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: изучение свойств и особенностей линии передачи электрической энергии в различных режимах работы.

1. Основные теоретические положения

В схеме замещения линии передачи, изображенной на рис. 6.1, U_1 – напряжение в начале линии; $R_{\text{л}}$ – сопротивление проводников линии; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; U_2 – напряжение на нагрузке в конце линии.

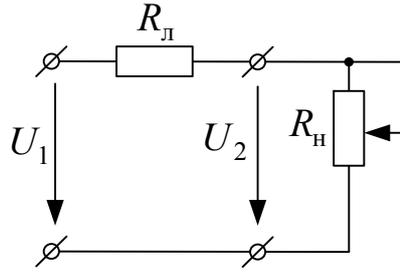


Рис. 6.1

При изменении сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ от ∞ до 0 ток I , согласно формуле

$$I = \frac{U_1}{R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}, \quad (6.1)$$

изменяется в пределах $0 - I_{\text{max}} = U_1 / R_{\text{л}}$.

Характер изменения напряжения на нагрузке U_2 , мощности P_1 в начале линии, мощности P_2 , выделяющейся в нагрузке, и коэффициента полезного действия (КПД) передачи η в функции от тока I при неизменном напряжении U_1 и неизменном сопротивлении $R_{\text{л}}$ определяется уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_1 - R_{\text{л}}I; & P_1 &= U_1I; & P_2 &= U_1I - R_{\text{л}}I^2; \\ \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_1I - R_{\text{л}}I^2}{U_1I} = 1 - \frac{R_{\text{л}}I}{U_1} = 1 - \frac{R_{\text{л}}I}{(R_{\text{л}} + R_{\text{н}})I} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

и иллюстрируется зависимостями рис. 6.2, а.

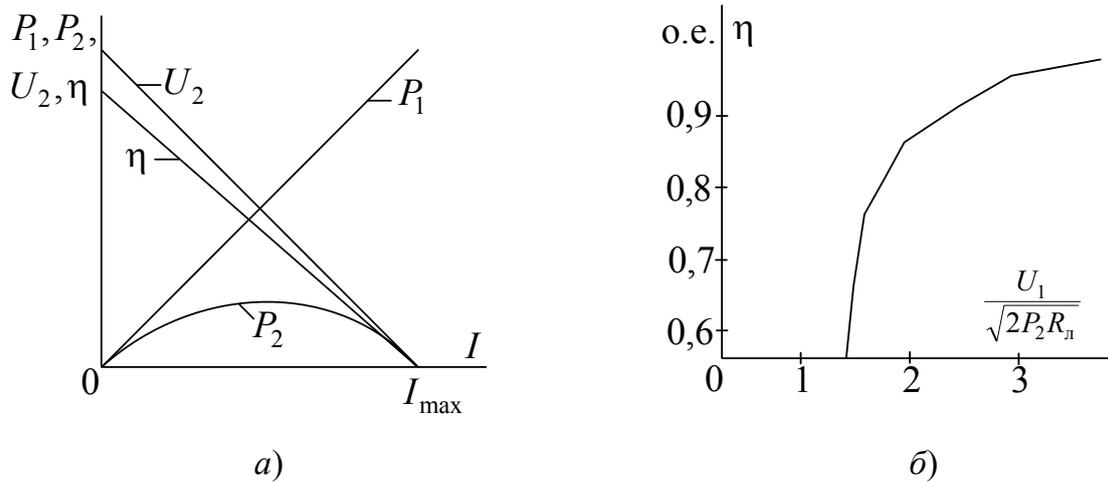


Рис. 6.2

При передаче больших мощностей (например, нескольких десятков мегаватт) в реальных линиях передач КПД составляет практически 0,94–0,97, а напряжение U_2 лишь на несколько процентов меньше напряжения U_1 . Если по линии передачи с сопротивлением $R_{\text{л}} = \text{const}$ нагрузке должна быть передана мощность $P_2 = \text{const}$, то КПД будет тем выше, чем больше напряжение U_1 в начале линии. В этом можно убедиться путем следующих рассуждений: увеличение U_1 вызовет увеличение U_2 ; при этом увеличится $R_{\text{н}}$, так как $R_{\text{н}} = U_2^2 / P_2$. Но тогда согласно (6.2) повысится и КПД.

Подобный вывод можно получить иначе, установив связь между КПД η и напряжением U_1 при заданных величинах P_2 и $R_{\text{л}}$.

Как было отмечено ранее (6.2),

$$\eta = 1 - \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}.$$

В свою очередь, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ можно выразить следующим образом:

$$R_{\text{н}} = \frac{P_2}{I^2} = \frac{P_2(R_{\text{л}} + R_{\text{н}})^2}{U_1^2}, \quad (6.3)$$

откуда

$$R_{\text{н}} \frac{U_1^2}{P_2} = R_{\text{л}}^2 + 2R_{\text{л}}R_{\text{н}} + R_{\text{н}}^2,$$

$$R_{\text{н}}^2 - \left(\frac{U_1^2}{P_2} - 2R_{\text{л}} \right) R_{\text{н}} + R_{\text{л}}^2 = 0$$

и

$$R_{\text{н}} = \left(\frac{U_1^2}{P_2} - 2R_{\text{л}} \right) + \sqrt{\left(\frac{U_1^2}{2P_2} - R_{\text{л}} \right)^2 - R_{\text{л}}^2}. \quad (6.4)$$

Знак «минус» перед корнем в выражении (6.4) опущен, так как он соответствует правой части кривой $P_2 = f(I)$ с меньшим КПД.

Окончательно

$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{U_1^2}{2P_2R_{\text{л}}} + \sqrt{\left(\frac{U_1^2}{2P_2R_{\text{л}}} - 1 \right)^2 - 1}}. \quad (6.5)$$

Из (6.5) следует, что КПД передачи тем выше, чем больше напряжение U_1 в начале линии. Об этом же свидетельствует и зависимость $\eta = f(U_1/\sqrt{2P_2R_{л}})$, приведенная на рис. 6.2, б.

2. Исходные данные

Вариант задания состоит из двух цифр: первая из них соответствует номеру стенда, а вторая – номеру столбца в табл. 6.1, где содержатся сведения о величине напряжения на входе линии U_1 .

В работе используются:

1. Схема замещения линии передачи (рис. 6.1).
2. Источник постоянного напряжения ИР – в качестве источника напряжения U_1 на входе линии.
3. Резистор R_2 , фактическое сопротивление которого определено в РЛР № 1 (табл. 1.1) – в качестве сопротивления линии $R_{л}$.
4. Блок переменного сопротивления БПС – в качестве сопротивления нагрузки $R_{н}$.
5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

Таблица 6.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_1, В$	15	17	19	21	23	18	20	22	14	23

3. Расчетная часть

1. Используя заданные значения U_1 и $R_{л}$, рассчитать ток короткого замыкания в линии $I_{к.з} = U_1/R_{л}$. Подобрать шесть значений сопротивления $R_{н}$ так, чтобы при его изменении ток линии изменялся в диапазоне $0 \div I_{к.з}$ через равные интервалы ΔI . Для этого необходимо разделить диапазон $0 \div I_{к.з}$ на 6 равных частей и для каждого граничного значения тока I_k по формуле (6.1) рассчитать соответствующее сопротивление $R_{нк}$.

2. Рассчитать мощности источника энергии на входе линии $P_{1k} = U_1 I_k$, приемника $P_{2k} = R_{нк} I_k^2$ и коэффициент полезного действия η_k для семи режимов работы линии. Расчетные значения $R_{нк}$, I_k , P_{1k} , P_{2k} и η_k занести в табл. 6.2.

3. По расчетным данным построить зависимости $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$ и $\eta(I)$ и сделать их анализ.

Таблица 6.2

R_n , Ом							
I_n , А	вычислено						
	измерено						
U_n , В	вычислено						
	измерено						
P_1 , Вт							
P_2 , Вт							
η , о. е.							

4. Экспериментальная часть

1. Собрать схему линии передачи энергии на стенде согласно рис. 6.1. Для измерения тока в линии использовать ампервольтметр Ц 4311 или мультиметр МУ-68. Напряжение на сопротивлении нагрузки измерять универсальным вольтметром В7-58/2.

2. Установить напряжение U_1 в соответствии с заданием. В процессе эксперимента это напряжение необходимо контролировать и поддерживать постоянным.

3. Изменяя величину сопротивления R_n согласно расчетным значениям (первая строка табл. 6.2), измерять ток в линии I и напряжение на приемнике U_2 . Данные измерений занести в табл. 6.2 и сравнить с соответствующими расчетными величинами.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

По данным табл. 6.2 построить зависимости $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$ и $\eta(I)$, проанализировать их и сделать соответствующие выводы.

6. Содержание отчета

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист по стандартной форме;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (схему замещения линии передачи энергии; напряжение U_1 на входе линии; величину сопротивления линии $R_n = R_2$);
- 4) основные расчетные формулы;
- 5) таблицы с результатами вычислений и измерений;
- 6) зависимости $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$ и $\eta(I)$;
- 7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется ток линии передачи энергии в зависимости от сопротивления нагрузки?
2. Объяснить характер зависимостей $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$ и $\eta(I)$.
3. Привести условие передачи по линии максимальной мощности. Каков при этом КПД линии?
4. При каком условии мощность, потребляемая приемником, максимальна?
5. Что представляет собой согласованный режим работы линии передачи энергии?
6. Почему согласованный режим в силовых электрических цепях и системах не применяется?
7. Объяснить, почему передача энергии от источника к нагрузке производится при высоком напряжении на входе линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л. : Энергоиздат, 1981. – Т. 1. – 536 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. школа, 1984. – 559 с.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.
4. Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники / А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский. – М. : Высш. шк., 1972. – 448 с.
5. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.
6. Прянишников, В. А. Теоретические основы электротехники : курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : КОРОНА, 2004. – 366 с.
7. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / под ред. Л. А. Бессонова. – М. : Высш. шк., 1988. – 543 с.
8. Шебес, М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М. : Высш. шк., 1990. – 543 с.
9. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / под ред. П. А. Ионкина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 768 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Рассчитать методом эквивалентных преобразований электрическую цепь, изображенную на рис. П.1.1, если $E = 24$ В; $R_1 = 100$ Ом; $R_2 = 120$ Ом; $R_3 = 270$ Ом; $R_4 = 330$ Ом; $R_5 = 470$ Ом; $R_6 = 100$ Ом.

Составить баланс мощностей.

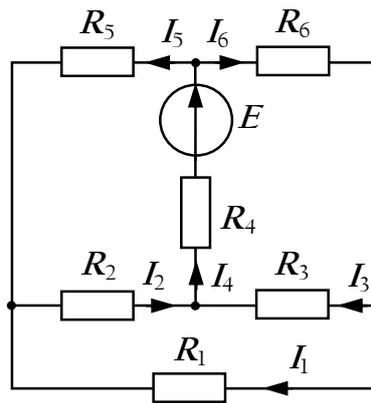


Рис. П.1.1

Решение. Произвольно выберем положительные направления токов в ветвях цепи. Анализ цепи показывает, что в ней отсутствуют последовательные и параллельные соединения элементов. В то же время резисторы R_2 , R_3 и R_4 соединены «звездой», а резисторы R_2 , R_3 и R_1 – «треугольником».

Преобразуем «треугольник» сопротивлений в R_2 , R_3 и R_1 в эквивалентную «звезду», используя известные соотношения:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{100 \cdot 120}{100 + 120 + 270} = 24,5 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{100 \cdot 270}{100 + 120 + 270} = 55 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{120 \cdot 270}{100 + 120 + 270} = 66 \text{ Ом}.$$

В результате исходная схема примет вид рис. П.1.2.

Отметим, что токи I_4 , I_5 и I_6 в схемах на рис. П.1.1 и П.1.2 останутся неизменными, так как протекают по непретворенным частям цепи.

Далее, заменяя последовательно соединенные сопротивления на эквивалентные, получим:

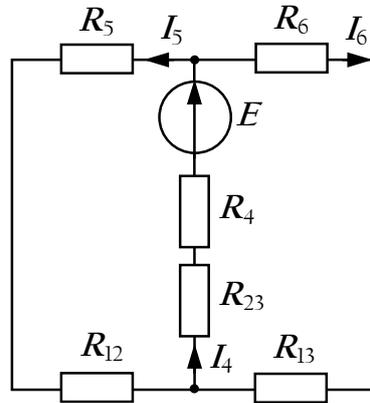


Рис. П.1.2

$$R_{125} = R_{12} + R_5 = 24,5 + 470 = 494,5 \text{ Ом};$$

$$R_{136} = R_{13} + R_6 = 55 + 100 = 155 \text{ Ом};$$

$$R_{234} = R_{23} + R_4 = 66 + 330 = 396 \text{ Ом}.$$

Схема рис. П.1.2 примет вид рис. П.1.3:

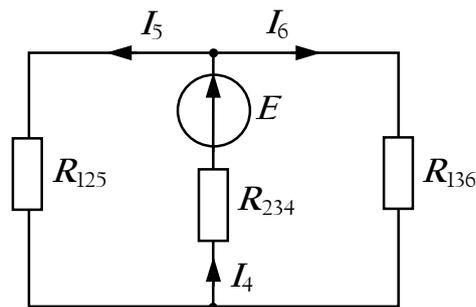


Рис. П.1.3

Здесь ток I_4 будет равен

$$I_4 = \frac{E}{R_{\text{эkv}}} = \frac{E}{R_{234} + \frac{R_{125}R_{136}}{R_{125} + R_{136}}} = \frac{24}{396 + \frac{494,5 \cdot 155}{494,5 + 155}} = 0,047 \text{ А}.$$

Тогда

$$I_5 = I_4 \frac{R_{136}}{R_{136} + R_{125}} = 0,047 \frac{155}{155 + 494,5} = 0,011 \text{ А};$$

$$I_6 = I_4 - I_5 = 0,047 - 0,011 = 0,036 \text{ А}.$$

Для определения токов I_1 , I_2 и I_3 вернемся к схеме рис. П.1.1.
По второму закону Кирхгофа

$$R_4 I_4 + R_5 I_5 + R_2 I_2 = E,$$

откуда

$$I_2 = \frac{E - R_4 I_4 - R_5 I_5}{R_2} = \frac{24 - 330 \cdot 0,047 - 470 \cdot 0,011}{120} = 0,028 \text{ А}.$$

Наконец, по первому закону Кирхгофа:

$$I_3 = I_4 - I_2 = 0,047 - 0,028 = 0,019 \text{ А};$$

$$I_1 = I_2 - I_5 = 0,028 - 0,011 = 0,017 \text{ А}.$$

Баланс мощностей

Мощность источника

$$P_{\text{ист}} = EI_4 = 24 \cdot 0,047 = 1,128 \text{ Вт}.$$

Мощность приемников

$$\begin{aligned} P_{\text{пр}} &= R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = \\ &= 100 \cdot 0,017^2 + 120 \cdot 0,028^2 + 270 \cdot 0,019^2 + 330 \cdot 0,047^2 + \\ &\quad + 470 \cdot 0,011^2 + 100 \cdot 0,036^2 = 1,136 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Относительную погрешность определим в виде:

$$\delta_{\%} = \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{пр}}|}{\frac{P_{\text{ист}} + P_{\text{пр}}}{2}} 100 \% = \frac{|1,128 - 1,136|}{\frac{1,128 + 1,136}{2}} 100 \% \approx 0,71 \%.$$

Приложение 2

Рассчитать методом узловых потенциалов электрическую цепь, изображенную на рис. П.2.1, если $E_1 = 23 \text{ В}$; $E_2 = 19,6 \text{ В}$; $R_1 = 120 \text{ Ом}$; $R_2 = 203 \text{ Ом}$; $R_3 = 259 \text{ Ом}$; $R_4 = 310 \text{ Ом}$; $R_5 = 430 \text{ Ом}$; $R_6 = 100 \text{ Ом}$.

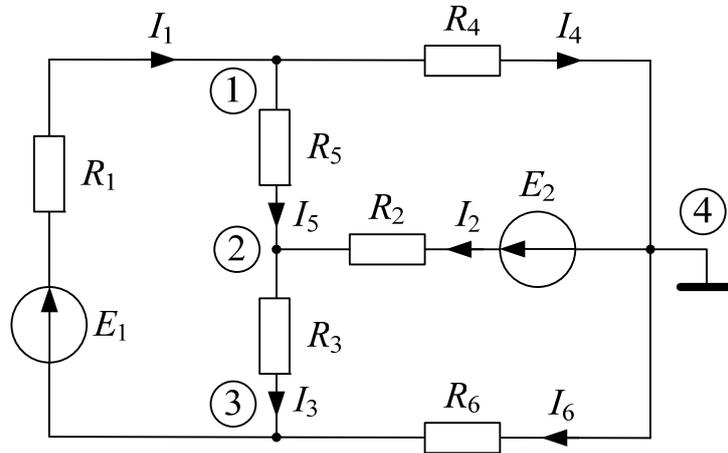


Рис. П.2.1

Решение. Суть метода узловых потенциалов заключается в том, что, используя первый закон Кирхгофа и закон Ома, можно определить потенциалы узлов цепи, а затем и токи ветвей. Число решаемых уравнений при этом сокращается до величины $(n - 1)$, где n – число узлов цепи. При этом потенциал одного из узлов (базового) принимают равным нулю.

В цепи на рис. П.2.1 в качестве базового будем считать узел 4.

Для остальных узлов запишем уравнения по первому закону Кирхгофа в виде:

$$I_4 + I_5 - I_1 = 0; \quad I_3 - I_2 - I_5 = 0; \quad I_1 - I_3 - I_6 = 0.$$

Далее, используя закон Ома, выразим токи через потенциалы узлов и параметры ветвей:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varphi_1 - \varphi_4}{R_4} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_5} - \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1} &= 0; \\ \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_3} - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_5} - \frac{\varphi_4 - \varphi_2 + E_2}{R_2} &= 0; \\ \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1} - \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_3} - \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_6} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

После несложных математических преобразований и учитывая, что $\varphi_4 = 0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) \varphi_1 - \frac{1}{R_5} \varphi_2 - \frac{1}{R_1} \varphi_3 &= \frac{E_1}{R_1}; \\ -\frac{1}{R_5} \varphi_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) \varphi_2 - \frac{1}{R_3} \varphi_3 &= \frac{E_2}{R_2}; \\ -\frac{1}{R_1} \varphi_1 - \frac{1}{R_3} \varphi_2 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_6} \right) \varphi_3 &= -\frac{E_1}{R_1}. \end{aligned} \right\}$$

После подстановки числовых значений параметров элементов цепи получим:

$$\left. \begin{aligned} 0,0139\varphi_1 - 0,00233\varphi_2 - 0,00833\varphi_3 &= 0,1917; \\ -0,00233\varphi_1 + 0,01111\varphi_2 - 0,00386\varphi_3 &= 0,0966; \\ -0,00833\varphi_1 - 0,00386\varphi_2 + 0,0222\varphi_3 &= -0,1917. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, определим потенциалы узлов 1÷3:

$$\varphi_1 = 15,2 \text{ В}; \quad \varphi_2 = 11,6 \text{ В}; \quad \varphi_3 = -0,94 \text{ В}.$$

Наконец, по закону Ома:

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-0,94 - 15,2 + 23}{120} = 0,057 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_4 - \varphi_2 + E_2}{R_2} = \frac{-11,6 + 19,6}{203} = 0,039 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_3} = \frac{11,6 - (-0,94)}{259} = 0,048 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_4}{R_4} = \frac{15,2}{310} = 0,049 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_5} = \frac{15,2 - 11,6}{430} = 0,008 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_6} = \frac{-(-0,94)}{100} = 0,009 \text{ А}.$$

Приложение 3

Рассчитать методом контурных токов электрическую цепь, изображенную на рис. П.3.1, если $E_1 = 23$ В; $E_2 = 19,6$ В; $R_1 = 120$ Ом; $R_2 = 203$ Ом; $R_3 = 259$ Ом; $R_4 = 310$ Ом; $R_5 = 430$ Ом; $R_6 = 100$ Ом.

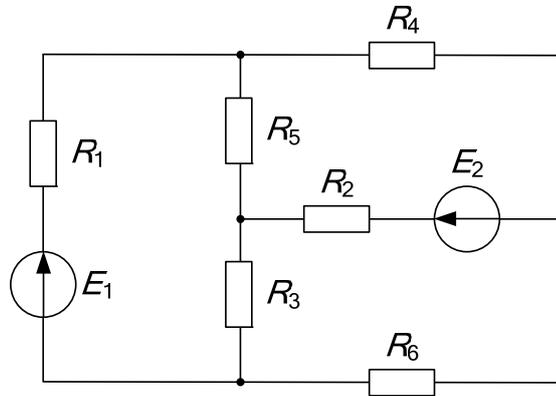


Рис. П.3.1

Составить баланс мощностей.

Построить потенциальную диаграмму для контура, включающего обе ЭДС.

Решение. Метод контурных токов заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях вначале определяются на основании второго закона Кирхгофа так называемые контурные токи, замыкающиеся в независимых контурах. Очевидно, число уравнений, записываемых относительно неизвестных контурных токов, равно числу независимых контуров. В рассматриваемом примере (рис. П.3.2) таких уравнений три:

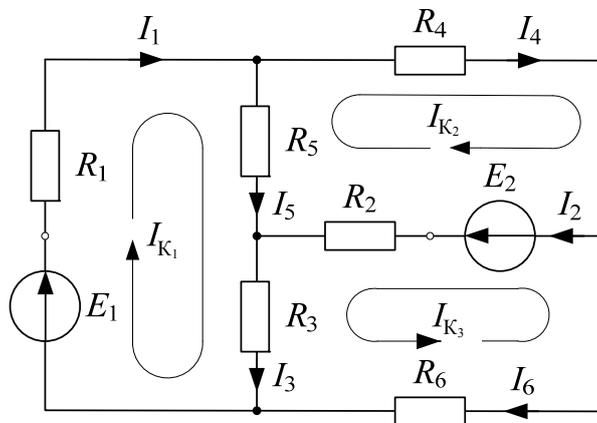


Рис. П.3.2

$$\left. \begin{array}{l} (R_1 + R_3 + R_5)I_{K_1} - R_5I_{K_2} + R_3I_{K_3} = E_1; \\ -R_5I_{K_1} + (R_2 + R_4 + R_5)I_{K_2} + R_3I_{K_3} = E_2; \\ R_3I_{K_1} + R_2I_{K_2} + (R_2 + R_3 + R_6) = E_2. \end{array} \right\}$$

После подстановки числовых значений получим:

$$\left. \begin{array}{l} 809I_{K_1} - 430I_{K_2} + 259I_{K_3} = 23; \\ -430I_{K_1} + 943I_{K_2} + 203I_{K_3} = 19,6; \\ 259I_{K_1} + 203I_{K_2} + 562I_{K_3} = 19,6. \end{array} \right\}$$

Решая эту систему уравнений, определим контурные токи:

$$I_{K_1} = 0,057 \text{ А}; \quad I_{K_2} = 0,049 \text{ А}; \quad I_{K_3} = -0,009 \text{ А}.$$

Направления действительных токов I_1 и I_4 совпадают с направлениями контурных токов I_{K_1} и I_{K_2} . Следовательно:

$$I_1 = I_{K_1} = 0,057 \text{ А}; \quad I_4 = I_{K_2} = 0,049 \text{ А}.$$

Ток I_6 противоположен контурному току I_{K_3} . Поэтому

$$I_6 = -I_{K_3} = -(-0,009) = 0,009 \text{ А}.$$

Токи в ветвях, принадлежащих одновременно двум или нескольким контурам, равны алгебраической сумме соответствующих контурных токов:

$$I_2 = I_{K_2} + I_{K_3} = 0,049 + (-0,009) = 0,040 \text{ А};$$

$$I_3 = I_{K_1} + I_{K_3} = 0,057 + (-0,009) = 0,048 \text{ А};$$

$$I_5 = I_{K_1} - I_{K_2} = 0,057 - 0,049 = 0,008 \text{ А}.$$

Баланс мощностей

Мощность источников ЭДС

$$P_{\text{ист}} = E_1I_1 + E_2I_2 = 23 \cdot 0,057 + 19,6 \cdot 0,040 = 2,1 \text{ Вт}.$$

Мощность, потребляемая резисторами $R_1 \div R_6$,

$$\begin{aligned}
 P_{\text{п.р}} &= R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = \\
 &= 120 \cdot 0,057^2 + 203 \cdot 0,040^2 + 259 \cdot 0,048^2 + 310 \cdot 0,049^2 + \\
 &\quad + 430 \cdot 0,008^2 + 100 \cdot 0,009^2 = 2,1 \text{ Вт.}
 \end{aligned}$$

Равенство $P_{\text{ист}} = P_{\text{п.р}}$ свидетельствует о том, что расчет токов в ветвях цепи выполнен правильно.

Потенциальная диаграмма

Под потенциальной диаграммой понимают график изменения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура. По оси абсцисс откладывают сопротивления вдоль контура, а по оси ординат – потенциалы соответствующих узлов и точек контура.

Для построения потенциальной диаграммы следует обозначить узлы и промежуточные точки (в ветвях с ЭДС) буквами (или цифрами), как показано на рис. П.3.3.

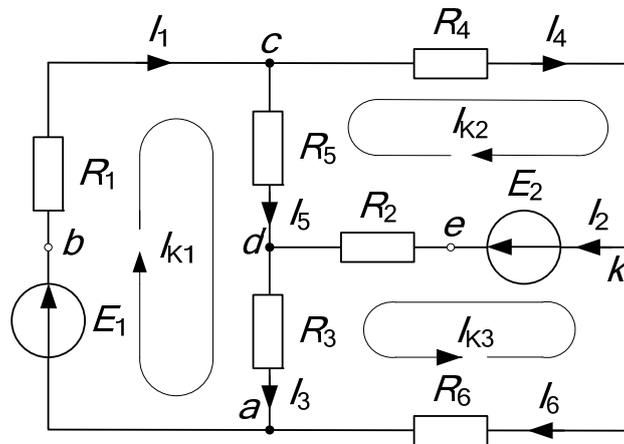


Рис. П.3.3

Произвольно принимаем потенциал точки a равным нулю. На диаграмме (рис. П.3.4) поместим эту точку в начало координат.

Далее определим потенциалы остальных точек контура:

$$\varphi_a = 0;$$

$$\varphi_b = \varphi_a + E_1 = 23 \text{ В};$$

$$\varphi_c = \varphi_b - R_1 I_1 = 23 - 120 \cdot 0,057 = 16,1 \text{ В};$$

$$\varphi_d = \varphi_c - R_5 I_5 = 16,1 - 430 \cdot 0,008 = 12,5 \text{ В};$$

$$\varphi_e = \varphi_d + R_2 I_2 = 12,5 + 203 \cdot 0,040 = 20,6 \text{ В};$$

$$\varphi_k = \varphi_e - E_2 = 20,6 - 19,6 = 1 \text{ В};$$

$$\varphi_a = \varphi_k - R_6 I_6 = 1 - 100 \cdot 0,009 = 0,1 \text{ В} \approx 0.$$

Задаем масштабы m_φ и m_R и строим зависимость $\varphi = f(R)$, которая приведена на рис. П.3.4.

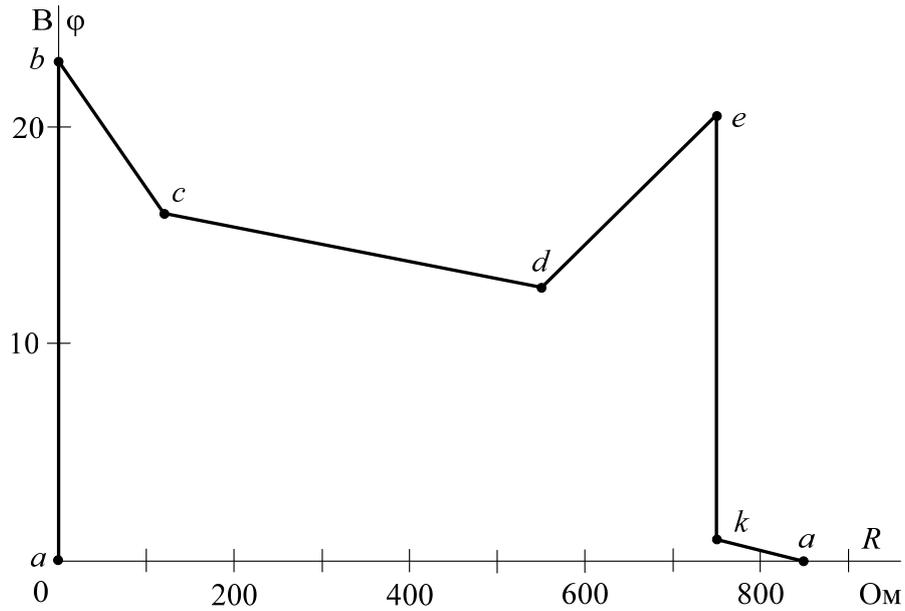


Рис. П.3.4

Приложение 4

Рассчитать методом наложения токи электрической цепи, изображенной на рис. П.4.1, если $E_1 = 24$ В; $E_2 = 19,5$ В; $R_1 = 120$ Ом; $R_2 = 203$ Ом; $R_3 = 259$ Ом; $R_4 = 310$ Ом; $R_5 = 430$ Ом; $R_6 = 100$ Ом.

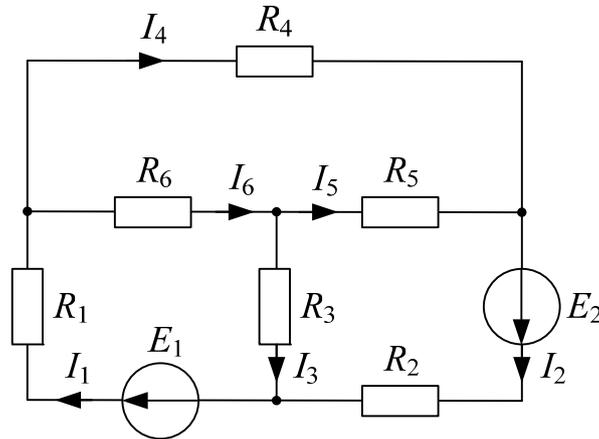


Рис. П.4.1

Решение. Согласно методу наложения, рассмотрим отдельно схемы с источником ЭДС E_1 (рис. П.4.2) и источником ЭДС E_2 (рис. П.4.4).

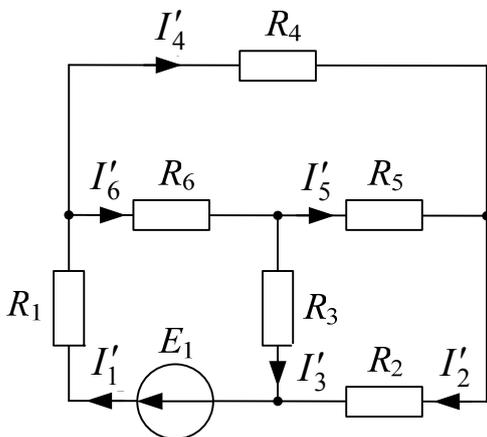


Рис. П.4.2

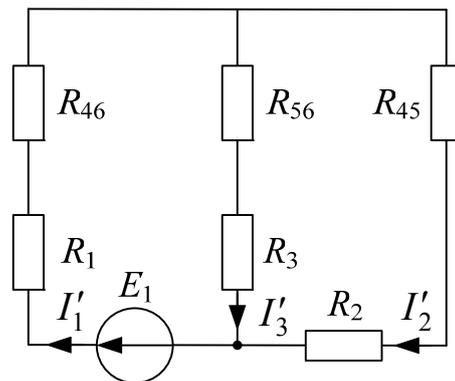


Рис. П.4.3

Предварительно преобразуем «треугольник» сопротивлений R_4 , R_5 и R_6 в эквивалентную «звезду», поскольку при расчете каждой из частичных схем (рис. П.4.2 и рис. П.4.4) удобно пользоваться таким преобразованием.

$$R_{46} = \frac{R_4 R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{310 \cdot 100}{310 + 430 + 100} = 37 \text{ Ом};$$

$$R_{56} = \frac{R_5 R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{430 \cdot 100}{310 + 430 + 100} = 51 \text{ Ом};$$

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{310 \cdot 430}{310 + 430 + 100} = 159 \text{ Ом}.$$

После подобных преобразований схеме рис. П.4.2 будет эквивалентна схема рис. П.4.3, а схеме рис. П.4.4 – схема рис. П.4.5.

Вначале определим частичные токи в схемах рис. П.4.2 и П.4.3:

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_{46} + \frac{(R_3 + R_{56})(R_2 + R_{45})}{R_3 + R_{56} + R_2 + R_{45}}} = \dots = 0,074 \text{ А};$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{R_2 + R_{45}}{R_2 + R_{45} + R_3 + R_{56}} = \dots = 0,040 \text{ А};$$

$$I'_2 = I'_1 - I'_3 = \dots = 0,034 \text{ А};$$

$$I'_6 = \frac{E - R_1 I'_1 - R_3 I'_3}{R_6} = \dots = 0,0476 \text{ А};$$

$$I'_4 = I'_1 - I'_6 = \dots = 0,0264 \text{ А};$$

$$I'_5 = I'_6 - I'_3 = \dots = 0,0076 \text{ А}.$$

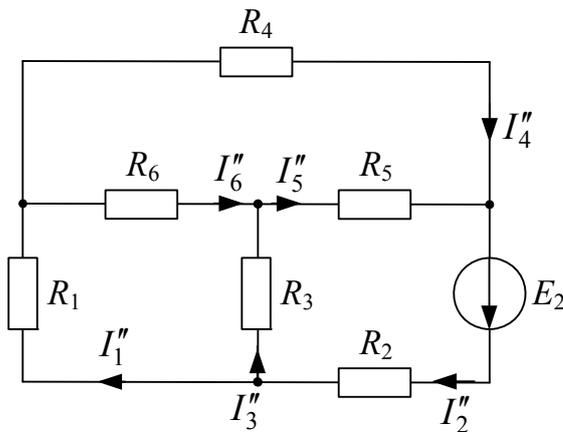


Рис. П.4.4

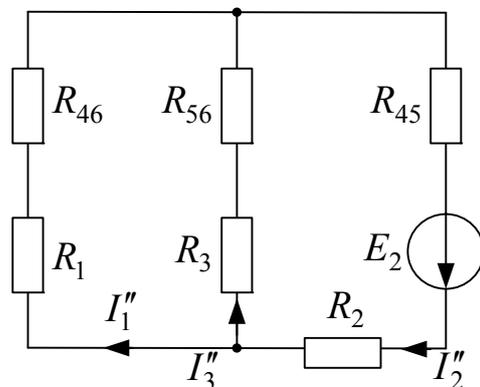


Рис. П.4.5

По аналогии определяем токи в схемах рис. П.4.4 и П.4.5:

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + R_{45} + \frac{(R_1 + R_{46})(R_3 + R_{56})}{R_1 + R_{46} + R_3 + R_{56}}} = \dots = 0,042 \text{ А};$$

$$I_3'' = I_2'' \frac{R_1 + R_{46}}{R_1 + R_{46} + R_3 + R_{56}} = \dots = 0,014 \text{ А};$$

$$I_1'' = I_2'' - I_3'' = \dots = 0,028 \text{ А};$$

$$I_5'' = \frac{E_2 - R_2 I_2'' - R_3 I_3''}{R_5} = \dots = 0,017 \text{ А};$$

$$I_6'' = I_5'' - I_3'' = \dots = 0,003 \text{ А};$$

$$I_4'' = I_2'' - I_5'' = \dots = 0,025 \text{ А}.$$

Наконец, действительные токи определим путем алгебраического суммирования частичных токов в соответствующих ветвях цепи:

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 0,074 + 0,028 = 0,102 \text{ А};$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 0,034 + 0,042 = 0,076 \text{ А};$$

$$I_3 = I_3' - I_3'' = 0,040 - 0,014 = 0,026 \text{ А};$$

$$I_4 = I_4' + I_4'' = 0,0264 + 0,025 = 0,0514 \text{ А};$$

$$I_5 = I_5' + I_5'' = 0,0076 + 0,017 = 0,0246 \text{ А};$$

$$I_6 = I_6' + I_6'' = 0,0476 + 0,003 = 0,0506 \text{ А}.$$

Приложение 5

Рассчитать ток I_6 в цепи, изображенной на рис. П.5.1, методом эквивалентного генератора, если $E_1 = 24$ В; $E_2 = 19,5$ В; $R_1 = 120$ Ом; $R_2 = 203$ Ом; $R_3 = 259$ Ом; $R_4 = 310$ Ом; $R_5 = 430$ Ом; $R_6 = 100$ Ом.

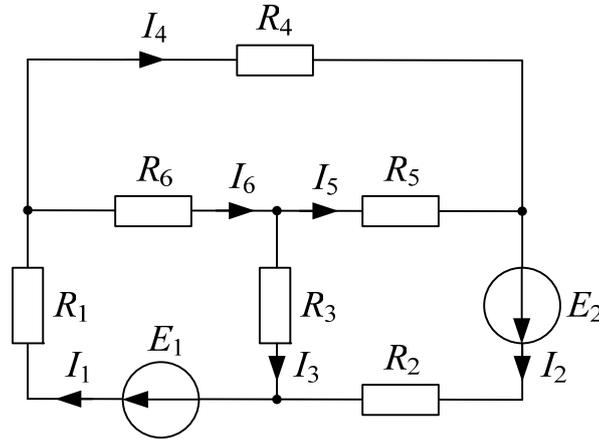


Рис. П.5.1

Решение. Разомкнем ветвь с резистором R_6 (рис. П.5.2) и найдем напряжение $U_{x.x}$ между точками a и b .

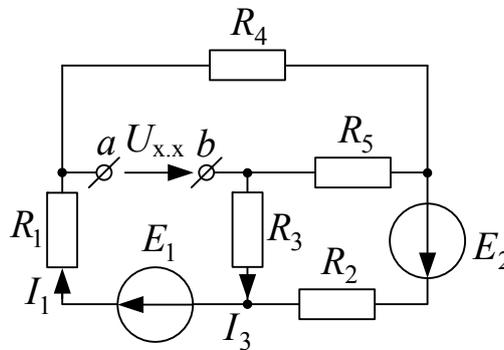


Рис. П.5.2

Согласно второму закону Кирхгофа

$$U_{x.x} = E_1 - R_1 I_1 - R_3 I_3.$$

Токи в схеме рис. П.5.2 определяются любым известным методом. В данном случае они равны:

$$I_1 = 0,067 \text{ А}; \quad I_3 = -0,0067 \text{ А}.$$

Следовательно,

$$U_{x.x} = 24 - 120 \cdot 0,067 - 259 \cdot 0,0067 = 17,74 \text{ В.}$$

Входное сопротивление между точками *a* и *b* при отключенном резисторе с сопротивлением R_6 равно

$$R_{\text{вх}} = R_{35} + \frac{(R_4 + R_{25})(R_1 + R_{23})}{R_4 + R_{25} + R_1 + R_{23}} = \dots = 249 \text{ Ом,}$$

где R_{23} , R_{25} и R_{35} – сопротивления «звезды» (рис. П.5.3, б), эквивалентной «треугольнику» R_2 , R_3 и R_5 (рис. П.5.3, а).

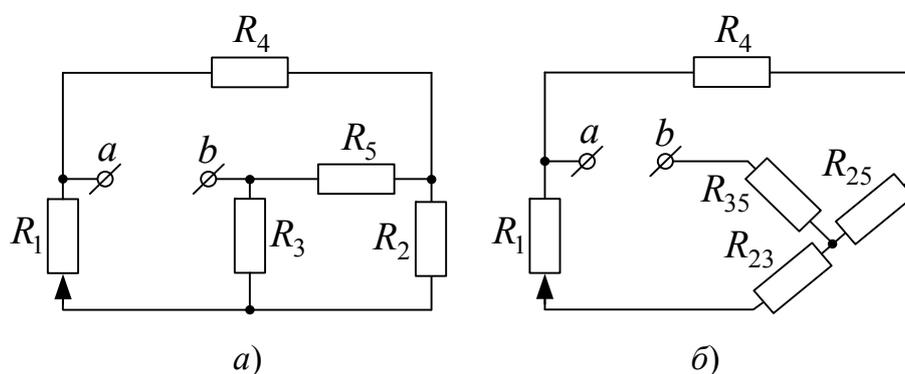


Рис. П.5.3

Искомый ток

$$I_6 = \frac{U_{x.x}}{R_{\text{вх}} + R_6} = \frac{17,74}{249 + 100} = 0,051 \text{ А.}$$

Содержание

Предисловие.....	3
Правила техники безопасности и работы в лабораториях кафедры «Теоретические основы электротехники»	4
Ознакомительное занятие.....	7
<i>Расчетно-лабораторная работа № 1</i> «Электрическая цепь постоянного тока и ее элементы».....	9
<i>Расчетно-лабораторная работа № 2</i> «Экспериментальная проверка выполнения законов Кирхгофа в линейных электрических цепях»	19
<i>Расчетно-лабораторная работа № 3</i> «Исследование электрической цепи постоянного тока с одним источником энергии»	24
<i>Расчетно-лабораторная работа № 4</i> «Исследование электрической цепи постоянного тока с двумя источниками энергии»	30
<i>Расчетно-лабораторная работа № 5</i> «Активный двухполюсник в цепи постоянного тока»	38
<i>Расчетно-лабораторная работа № 6</i> «Передача энергии по линии передачи постоянного тока».....	43
Литература	49
Приложения	50

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Соленков Виталий Владимирович
Бусленко Александр Владимирович

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Лабораторный практикум
В четырех частях
Часть 1

Электронный аналог печатного издания

Редактор *А. В. Власов*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 25.03.13.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 4,1.

Изд. № 4.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр Учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48