

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Практикум

Часть I ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под общей редакцией
В. П. Максимова

Южно-Сахалинск
Издательство СахГУ
2014

УДК 621.3.014(075)
ББК 31.2я73
Т338

Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2014 г.

Рецензент:

Т338 **Теоретические основы электротехники : практикум : в 2 ч. / В. П. Максимов, И. Г. Минервин, Е. Д. Уткин, О. А. Федоров ; под общ. ред. В. П. Максимова.** – Южно-Сахалинск : изд-во СахГУ, 2014. – 44 с.

ISBN 978-5-88811-491-9

Ч. 1 : Линейные электрические цепи постоянного тока.

ISBN 978-5-88811-492-6

Практикум содержит краткие теоретические сведения, упражнения, типовое решение расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники» по разделу «Расчет линейных цепей постоянного тока», а также контрольные задания для самостоятельного решения студентами.

Практикум рекомендован студентам очного и заочного обучения по дисциплине «Теоретические основы электротехники» направлений подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» и 140200.62 «Электроэнергетика», по дисциплине «Электротехника» направления подготовки 131000.62 «Нефтегазовое дело» и по дисциплине «Электротехника и электроника» направления подготовки 190600.62 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

УДК 621.3.014(075)
ББК 31.2я73

ISBN 978-5-88811-492-6 (ч. 1)
ISBN 978-5-88811-491-9

© Максимов В. П., введение, 1,
литература, 2014
© Минервин И. Г., 3, 5, 7, 9, 2014
© Уткин Е. Д., 2, 10, 2014
© Федоров О. А., 4, 6, 8, 2014
© Сахалинский государственный
университет, 2014

Содержание

Введение.....	4
1. Требования к выполнению и оформлению практикума	5
2. Основные определения и законы электрических цепей.....	11
3. Метод эквивалентных преобразований.....	14
4. Замена параллельных ветвей с источниками ЭДС и источниками тока одной эквивалентной	17
5. Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.....	19
6. Метод контурных токов	21
6.1. Основы метода контурных токов	21
6.2. Рекомендации к методу контурных токов	22
7. Метод узловых потенциалов	23
8. Потенциальная диаграмма	27
9. Метод эквивалентного генератора.....	28
10. Задание расчетно-графической работы.....	31
Литература	43

Введение

В соответствии с содержанием профессиональных компетенций государственных образовательных стандартов высшего образования студенты различных специальностей, где предусмотрено изучение электротехнических дисциплин, должны выполнить расчетно-графическую работу по теме «Расчет линейных цепей синусоидального тока».

Самостоятельная работа студентов над заданием включает предварительную проработку необходимого теоретического материала. С целью облегчения усвоения необходимого теоретического материала методическое пособие содержит краткие теоретические сведения, несложные примеры, позволяющие закрепить теоретические знания, и типовое решение расчетно-графической работы.

1. Требования к выполнению и оформлению практикума

1. Результатом учебной деятельности студентов является выполнение и оформление различных студенческих работ, в том числе научных рефератов, докладов, практических работ, курсовых проектов, выпускной квалификационной работы, выполняемой в виде дипломной работы или проекта. Данные виды студенческих работ способны продемонстрировать профессиональные компетенции работы с источниками различной информации, справочной и учебной литературой, а также профессиональные способности использования своих теоретических знаний в практической деятельности.

2. К оформлению практикума предъявляются специальные требования, которые соответствуют действующим нормативным документам, принятым в ФГБОУ ВПО «Сахалинский государственный университет». Студенческие работы являются текстовыми материалами, к которым предъявляются требования ГОСТ 7.32-2001 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». Вопросы оформления научных студенческих работ, которые не нашли своего отражения в данном стандарте, определяются выпускающей кафедрой.

3. Прежде чем приступить к выполнению расчетно-графической работы, необходимо внимательно ознакомиться с соответствующими разделами теории. Выполнение практикума должно показать не только умение решать предложенные задачи, но и умение оформить их согласно требованиям. Несоблюдение правил оформления практикума может стать причиной того, что представленная работа не будет зачтена.

4. Научные студенческие работы оформляются в виде сброшюрованного документа и прилагаемых к нему дополнительных материалов.

5. Практикум оформляется на листах стандартной белой бумаги формата по ГОСТ 9327-60 А4 (297 × 297 мм) с использованием компьютера.

6. Основные требования к компьютерному набору. Набор текста осуществляется в редакторе MS WORD¹. Текст должен быть напечатан на одной стороне листа через 1,5 межстрочного интервала шрифтом Times New Roman размера 14 пт., цвет текста черный. Следует использовать размеры полей в параметрах страницы: левое – 3,0 см, правое – 1,5 см, верхнее и нижнее – 2,0 см. При наборе текстового материала следует использовать двухстороннее выравнивание и автоматическую расстановку переносов слов (кроме заголовков, названий таблиц и рисунков). Абзацы в тексте начинаются отступом 12,5–1,27 см, выполняемым с помощью клавиши табулятора (автонастройки по умолчанию). Опечатки, описки, необработанные сканированные изображения не допускаются.

7. Страницы нумеруются в нарастающем порядке арабскими цифрами. Номера страниц указываются арабскими цифрами в нижней части страницы по центру без каких-либо символов. Страницы работы нумеруются все, включая титульный лист, оглавление и приложения, но на титульном листе нумерация не указывается. Бланк задания, аннотация брошюруются вместе с текстом работы, но в нумерацию не включаются.

8. Сокращения русских слов и словосочетаний производятся по ГОСТ 7.12-93. Так, стандартом допускается пользоваться общепринятыми сокращениями, например: и так далее – и т. д., год (годы) – г. (гг.), пункт (пункты) – п. (пп.). Применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, пунктуации, а также соответствующими государственными стандартами, не допускается. Сокращения типа «т. д.», «с. г.» записываются через пробел. Сокращения типа «и др.» ставятся только в конце предложения, в середине предложения их нужно записывать полностью или в скобках.

9. Единицы физических величин приводятся по ГОСТ 8.417-2002. Запрещается применять

¹ Выпускающая кафедра настоятельно требует использовать только лицензионные компьютерные программы.

сокращенные или условные обозначения единиц измерения (в том числе денежных), если они употребляются без цифр, за исключением использования сокращений в таблицах и расшифровках формул. В конце общеупотребительных сокращений (кг, т, Ом, м, Вт, МВт, кА, мкТл) точка не ставится.

10. Фамилии, названия учреждений, организаций, предприятий, название изделий и другие имена собственные в документе приводятся на языке оригинала. Не допускается транскрипция имен собственных или их перевод на русский язык. Рекомендуется названия учреждений, организаций, предприятий оформлять только прописными буквами.

11. К частому нарушению правил компьютерного набора относится отбивка знаков препинания от предыдущего текста, что может вызвать их перенос на следующую строку (отбивать от текста знаки следует «неразрывным» пробелом (Ctrl+Shift+<пробел>), исключая растяжку и разрыв при переносе). Также следует отбивать от цифр знаки процента, градусы, минуты, секунды, килограммы и т. п. Одним «неразрывным» пробелом цифры отбиваются от № и §. Дефис пробелами не отбивается. Тире отбивается пробелами с двух сторон, за исключением сочетаний, имеющих смысл «от» и «до» (1941–1945 гг.).

12. Письменному деловому общению свойственен неличный характер изложения текста, то есть употребление глаголов от первого и второго лица не рекомендуется, а глаголы от третьего лица употребляются в неопределенно-личном значении: «Нами установлено...», но не «Мы установили...». Язык изложения используется сухой, без эмоциональности и превосходных степеней. Каждый используемый термин, не связанный однозначно с определенным понятием в современной научной литературе, должен быть обязательно раскрыт и пояснен.

13. Иллюстрации.

13.1. Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, блок-схемы, диаграммы, рисунки, распечатки экранных форм, фотографии) объединяются единым названием «рисунок». Характер иллюстрации может быть указан в ее названии (например, «СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА», «БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА»; «ФОТОГРАФИЯ ПРИБОРА», «ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА»). Рисунки следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице, располагая симметрично по ширине страницы.

13.2. Иллюстрация обозначается словом «Рис. с номером», которое помещают непосредственно под иллюстрацией. Иллюстрации должны иметь название, которое размещают так: «Рис. 15 – Схема генератора», без точки в конце. При необходимости под названием иллюстрации помещают поясняющие данные (подрисуночный текст). Шрифт подрисуночного текста Time New Roman 12 пт.

Например.

Рис. 1.5 – ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ УЭ-232

На рис. 1.5: А – главный каскад усилителя;
 Б – каскад интегратора.

13.3. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах одной главы. Так, номер рисунка будет составным: номер раздела и через точку порядковый номер рисунка в нем (например, «Рис. 2.1»). Точка после номера рисунка не ставится. Перенос слов недопустим, используйте для разрыва строк (Shift+Enter).

Например.

Рис. 2.17 – ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ

13.4. Если в документе только одна иллюстрация, ее нумеровать не следует, но слово «Рис.» и название рисунка должно быть указано.

13.5. По мере возможности иллюстрацию следует размещать на одной странице без переноса. Если иллюстрация не умещается на одной странице, можно переносить ее на другие страницы, при этом название иллюстрации помещают на первой странице, поясняющие данные приводят на каждой странице и под ними указывают «Рис. ___, лист ___, листов ___».

13.6. На все иллюстрации в тексте должны быть даны ссылки. Первую ссылку на иллюстрацию дают по типу «приведена на рис. 1.2», (рис. 1.2). Ссылки на ранее упомянутые иллюстрации дают с сокращенным словом «смотри», например, «см. рис. 1.2». Если повторная ссылка удалена от рисунка, например, дается в другой главе, целесообразно также указывать номер страницы, где приведен рисунок (см. рис. 1.7, с. 56).

13.7. Место расположения и шрифт названий рисунков должны быть едиными по всему текстовому документу. Названия выравниваются по центру без отступа.

13.8. Шрифт слова «Рис.», его номер и название должны быть такими же, как и шрифт основного текста, то есть 14 пт., межстрочный интервал рекомендуется одинарным. В оформлении текста полей рисунка рекомендуется использовать номера шрифтов 10–14 пт.

13.9. Иллюстрации вместе с их названиями и подрисовочными надписями должны быть отделены снизу и сверху от основного текста междустрочным интервалом 12 пт. Рекомендуется оформить слово «Рис.», его номер и название специальным стилем редактора Word.

14. Таблицы.

14.1. Цифровой материал, а также многомерный текстовый материал с перечислениями должен оформляться в виде таблиц. Допускается для наглядности при формировании таблиц использовать заливку ячеек строк граф (функция «Формат», «Границы и заливка», «Заливка»). Word предусматривает автоматическое формирование ряда таблиц стандартной структуры. Заголовки граф таблиц должны начинаться с прописной буквы, а подзаголовки граф, составляющие одно целое с подзаголовками, – со строчных.

14.2. Допускается более мелкий шрифт текста в таблице, чем основной текст, и меньший межстрочный интервал.

14.3. Таблицу следует располагать в документе непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице.

14.4. Таблица, как правило, должна иметь заголовок, выполняемый строчными буквами (кроме первой – заглавной), выравниваемый по центру, без точки в конце. Заголовок должен быть кратким и полностью отражать содержание таблицы. Шрифт заголовков всех таблиц в документе должен быть единым (при этом желательно, чтобы он совпадал со шрифтом названий рисунков). Номер шрифта заголовка и межстрочный интервал должны быть такими же, как и шрифт основного текста, то есть 14 пт., но выполнены прописными буквами, межстрочный интервал рекомендуется сделать одинарным.

14.5. Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах главы. Номер таблицы будет составным: номер главы и через точку порядковый номер таблицы в нем (например, «Таблица 2.1»). После номера таблицы ставится короткое тире, а затем название таблицы. Слово «Таблица», ее номер и название располагаются над таблицей форматом слева без отступа.

Например.

Таблица 1.4 – РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАДАНИЯ 1

14.6. Если в документе только одна таблица, ее нумеровать не следует, но слово «Таблица» и ее название должны быть.

14.7. По мере возможности таблицу следует располагать на одной странице. Если же строки или графы таблицы выходят за формат листа, таблицу делят на части, которые в зависимости от особенностей таблицы переносят на другие листы, помещают на одном листе рядом или одну под другой. Если части таблицы размещаются рядом, в каждой части таблицы повторяют головку, при размещении частей одна под другой – повторяется боковик. Нумерационный и тематический заголовки таблицы указывают один раз над первой частью таблицы, а над последующими частями пишут «Продолжение таблицы ____» и «Окончание таблицы ____».

14.8. В боковике таблицы допускается графа «№ п.п.», в общем же случае для облегчения ссылок номер строки (показателя) может быть проставлен перед наименованием показателя (через точку). Также рекомендуется в редакторе Word установить автоматическую печать заголовка

таблицы. В этом случае на каждой новой странице при ее переносе на другую страницу заголовок будет повторяться. Обычно в боковике таблицы размещаются показатели ее подлежащего, то есть наименования объектов или явлений, описываемых с помощью таблицы. В головке размещаются показатели сказуемого, то есть характеристики объектов и явлений, относящихся к подлежащему.

14.9. Если цифровые данные в графах или строках таблицы выражены в разных единицах измерения, то их указывают, соответственно, в заголовках граф (в головке) или при наименованиях параметров в строках боковика (для чего может предусматриваться специальная графа «Единица измерения» или «Ед. изм.»). Если все параметры, размещенные в таблице, выражены в одной и той же единице измерения, ее сокращенное обозначение помещают над таблицей, например, в конце заголовка таблицы.

14.10. Точки в конце заголовков и подзаголовков граф, наименований, параметров в конце текста в ячейках текстовых таблиц не ставятся. Промежуточные знаки препинания в текстовых таблицах проставляются, в том числе и точки между предложениями.

14.11. Если параметры одной графы имеют одинаковые значения в двух и более строках, то допускается объединение соответствующих ячеек данной графы в одну ячейку и проставление параметра один раз. То же относится и к одинаковым значениям параметра в одной строке.

14.12. Повторяющийся в строках графы текст можно заменять словами «То же». Ставить кавычки при повторении цифровых данных, марок, математических и иных символов не допускается.

14.13. Если цифровые и иные данные в ячейке не приводятся, то в ней ставится прочерк.

14.14. Если в ячейке проставляется диапазон значений, то между числами, ограничивающими диапазон, ставится тире.

14.15. Форматирование цифровых данных в графах должно обеспечивать расположение классов чисел строго один под другим (например, рубли под рублями, копейки под копейками).

14.16. Таблицы вместе с их реквизитами должны быть отделены снизу и сверху от основного текста пробелами (с одинарным междустрочным интервалом).

14.17. На все таблицы в тексте должны быть даны ссылки. Первую ссылку на иллюстрацию дают по типу «приведены в табл. 1.2», «(табл. 1.2)». Ссылки на ранее упомянутые таблицы дают с сокращенным словом «смотри», например, «см. табл. 1.2». Если повторная ссылка удалена от таблицы, например, дается в другом разделе, целесообразно также указывать номер страницы, где приведена таблица.

15. Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включаются в общую нумерацию страниц. В этом случае рисунки и таблицы могут иметь как вертикальное, так и горизонтальное размещение. При горизонтальном размещении листа поле для подшивки оставляется сверху.

16. Перечисления.

16.1. Перечисления при необходимости могут быть приведены внутри пунктов или подпунктов. Перечисления (списки) могут быть маркированными или нумерованными (числами или буквами).

16.2. Маркированные списки с крупными текстовыми фрагментами, состоящими из нескольких предложений, целесообразно начинать с прописных букв и в конце фрагментов ставить точку.

16.3. При мелких, например, однострочных фрагментах перечислений, их следует начинать со строчной буквы и заканчивать точкой с запятой. Если фрагменты перечисления не имеют внутренних знаков пунктуации, например, содержащие по одному слову или слову с определением, их можно разделять запятой. Вид маркера может быть произвольным из числа предусмотренных редактором Word, но рекомендуется использовать короткое тире.

16.4. Аналогично в нумерованных списках при крупных текстовых фрагментах используются арабские цифры с точкой (1., 2.), после которой текст начинается с прописной буквы и завершается точкой. При мелких фрагментах перечисления нумеруются порядковой нумерацией

арабскими цифрами со скобкой (например, 1), 2), 3) и т. д.), начинаются со строчной буквы и разделяются точкой с запятой.

16.5. Использование римских цифр не допускается.

16.6. В буквенных списках в первом случае роль идентификатора в списке играют прописные буквы с точкой после них (А, Б, В и т. д.), а во втором – строчные буквы со скобкой (например, а), б), в) и т. д.). Поскольку формирование списков на компьютере ведется автоматически в выбранном режиме, то не допускается в буквенных списках использовать латинский алфавит.

16.7. Следует избегать в пределах одного пункта или подпункта использование более одной группы перечислений. Но если этого избежать нельзя, то следует использовать различные формы идентификации списков, либо, используя только форму маркировки, применять для разных списков различные виды маркера.

17. Примечания и сноски.

17.1. Примечания и сноски следует помещать в документе при необходимости пояснения содержания текста таблицы или иллюстрации. Примечания и сноски, как правило, размещают под чертой в нижней части страницы непосредственно после пункта, таблицы, иллюстрации, к которым они относятся, и печатают с прописной буквы с абзационного отступа. Само слово «Примечание» не печатается.

17.2. Одно примечание не нумеруют. Несколько примечаний следует нумеровать порядковой нумерацией арабскими цифрами с точкой.

17.3. Целесообразно примечание печатать более мелким шрифтом (например, 10–12 пт).

17.4. Если примечание относится к началу крупного текстового фрагмента (раздела, подраздела), занимающего несколько страниц, его следует давать в виде сноски к странице (функция «Вставка», «Сноска», «Обычная»).

17.5. В студенческих работах библиографические ссылки в виде постраничных сносок не оформляются.

18. Формулы, уравнения, математические и цифровые выражения в тексте.

18.1. Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку с отделением от текста пробелами в один межстрочный интервал снизу и сверху. Если уравнение не умещается в одну строку, оно может быть перенесено на следующую строку после знаков равенства (=), сложения (+), вычитания (–), умножения ($\cdot$ или $\times$), деления (/ или $\div$) или других математических знаков. Недопустимо использовать в качестве знака умножения звездочку (*).

18.2. Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента следует давать с новой строки. Первую строку пояснения начинают со слова «где» без двоеточия.

18.3. Для указания формул используйте редактор формул Microsoft Equation (Вставка; Объект) или встроенный редактор формул Word версии 2007 года и новее.

18.4. Все формулы (уравнения), если их в документе более одной, нумеруют арабскими цифрами в пределах текущего пункта. В последнем случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках. Допускается нумеровать только те формулы, на которые в тексте есть ссылки.

18.5. Ссылки в тексте на номер формулы дают в скобках, например, «в формуле (3.1)».

18.6. Запрещается употреблять по тексту (вне формул и уравнений) математические знаки без цифр, например, $>$ (больше), $\geq$ (больше или равно, не меньше), $<$ (меньше), $\leq$ (меньше или равно, не больше), $=$ (равно), $\neq$ (не равно), $\sim$ (приблизительно равно), (тождественно), Σ (сумма), $\angle$ (угол) и т. д., а также знаки № (номер), % (процент), $^{\circ}$ (градус).

18.7. Запрещается использовать в тексте математический знак минус (–) перед отрицательными значениями величин. Вместо математического знака следует писать слово «минус».

18.8. В тексте документа числа с размерностью следует писать цифрами, а без размерности –

словами, например «в сумме не более 1,5 млн. руб.», «прибыль повысилась в два раза». Если в тексте приводится ряд величин с одной и той же единицей измерения, то ее указывают только после последнего числового значения, например: 1,5; 1,75; 2 кА. Если в предложении используются простые числа не более двух раз, то числа пишутся словами «Напряжение повысится в два-три раза». Если числа многозначные или их более двух, то числа пишутся цифрами «в 1,75 раз», «в 2, 3, а то и 10 раз».

18.9. В тексте документа перед обозначением параметра дают его пояснение, например, «Напряжение сети УС составило...».

19. Ссылки.

19.1. Библиографические ссылки на источники следует указывать порядковым номером перечня использованных источников, который представлен после заключения, в квадратных скобках, например, [31]. Не допускается приводить ссылки на источники в подстрочной сноске. Оформление ссылок в этом случае осуществляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008, который впервые введен в действие с 1 января 2009 года.

19.2. Если по тексту приводится цитата, то в ссылке кроме номера источника по списку указывается номер страницы, откуда взята цитата, например, [31, с. 51]. При указании источника в подстрочном примечании (сноске) номер страницы дается после библиографического описания источника.

19.3. Ссылки на главы, разделы, пункты, подпункты, рисунки, таблицы, формулы и уравнения, перечисления (с цифровой или буквенной идентификацией), приложения следует делать с указанием их номеров, например: «в гл. 4», «в соответствии с п. 3.3», «по формуле (3)», «в уравнении (2)», «на рис. 1.8», «в табл. 3.1», «в приложении 6». При этом для обозначения глав, пунктов, рисунков, таблиц следует использовать только сокращения «разд.», «п.», «рис.», «табл.».

19.4. Если в документе один рисунок, одна таблица, одна формула, одно уравнение, одно приложение, то при ссылках следует писать «на рисунке», «в таблице», «по формуле», «в уравнении», «в приложении». При этом слова «рисунок» и «таблица» пишутся полностью.

20. Электрические схемы должны быть оформлены с соблюдением ГОСТ 2.702-2011 «ЕСКД: Правила выполнения электрических схем». Можно пользоваться теми изображениями элементов схем, которые применяются в помещенных ниже задачах. При выполнении работы следует руководствоваться материалами стандартов, которые устанавливают стандарт на буквенные обозначения основных электрических и магнитных величин. В скобках указываются допускаемые обозначения.

21. При построении электрических схем рекомендуется использовать графические редакторы, например, Microsoft Visio.

22. Графики должны быть вычерчены аккуратно, с помощью чертежных инструментов, желательно на миллиметровой бумаге. Оси абсцисс и ординат вычерчивают сплошными толстыми линиями. Стрелки на концах осей вычерчивать не следует. Масштабы шкал по осям следует выбирать равномерными, начиная с нуля, с использованием всей площади графика. Цифры шкал наносят слева от оси ординат и под осью абсцисс. Если на графике небольшое число кривых, то их вычерчивают разными линиями (сплошной, штриховой, штрихпунктирной и т. п.). При большом числе кривых нумеруют. Для показа на графике расчетных точек рекомендуется применять по выбору следующие знаки: Δ , $\square$, $\diamond$, $\circ$. Буквенное обозначение наименования шкалы и единицу измерения величины пишут над числами шкалы оси ординат и под осью абсцисс, справа, вместо последнего числа шкалы. Надписи не должны выходить за пределы графика. Количество знаков цифр в числах должно быть минимальным, для чего целесообразно ввести у наименования шкалы постоянный множитель 10^n . Если шкалы на осях начинаются с нуля, то нуль на их пересечении ставится один раз. Во всех других случаях ставят оба значения.

23. Векторные диаграммы должны строиться в масштабе.

24. В конце контрольной работы надо поставить дату выполнения работы и подписаться.

25. Если контрольная работа не зачтена или зачтена при условии внесения исправлений, то

все необходимые поправки необходимо делать в разделе «Работа над ошибками». Нельзя вносить какие-либо исправления в текст, расчеты и графики, уже просмотренные преподавателем.

26. Студентам рекомендуется поэтапное выполнение контрольных заданий, то есть выполнение решения первой задачи и сдача ее на проверку преподавателю, затем решение второй задачи и сдача на проверку всей расчетно-графической работы.

2. Основные определения и законы электрических цепей

Электрическая цепь, состоящая только из линейных элементов, называется линейной, а ее состояние описывается линейными алгебраическими уравнениями. Линейным называется элемент цепи, сопротивление которого остается неизменным независимо от силы тока в нем и от величины напряжения на его выводах (зажимах).

При расчете электрической цепи чаще всего определяют токи, напряжения и мощности на всех или заданных участках цепи по известным значениям ЭДС E и сопротивлениям R .

Сложная электрическая цепь состоит из ветвей, узлов и контуров.

Ветвь – участок электрической цепи, по которому протекает один и тот же ток I , например, участок ab (рис. 1).

Узел – место соединения ветвей электрической цепи, например, узел a (рис. 2).

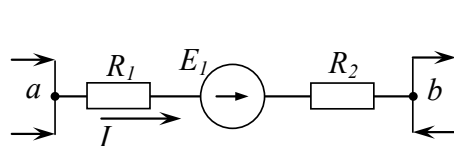


Рис. 1 – Ветвь

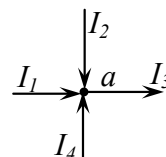


Рис. 2 – Узел

Контур – любой замкнутый путь, образованный ветвями и узлами электрической цепи, например, контур $abcd$ (рис. 3).

В основу расчета линейных электрических цепей положены известные законы Ома и Кирхгофа.

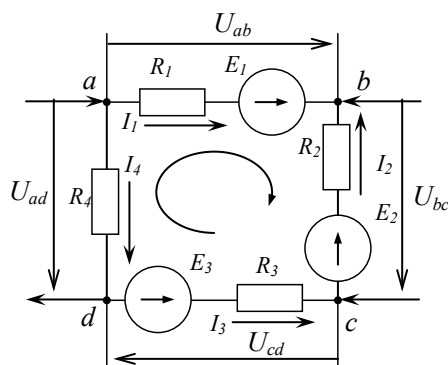


Рис. 3 – Контур

Закон Ома применяется для одного элемента, одной ветви или для одноконтурной замкнутой (не имеющей разветвлений) электрической цепи:

– для одного элемента или пассивной ветви $a b$ (рис. 4).

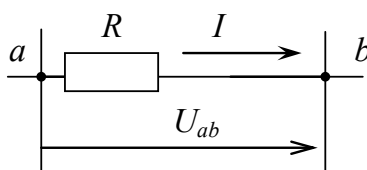


Рис. 4 – Закон Ома для пассивной ветви цепи ab

$$I = \frac{U_{ab}}{R}, \quad (1)$$

где I – ток [А], проходящий через элемент цепи;

$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ – приложенное к элементу (ветви) напряжение [В];

R – сопротивление [Ом] для активной ветви ab (рис. 5).

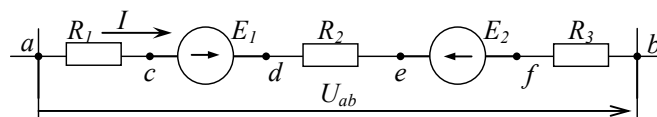


Рис. 5 – Закон Ома для активной ветви ab

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2)$$

Доказательство: $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$, т. е. $\varphi_a > \varphi_b$, тогда, двигаясь от узла b к узлу a (от меньшего потенциала к большему), получим следующие соотношения:

$$\varphi_f = \varphi_b + IR_3;$$

$$\varphi_e = \varphi_f + E_2;$$

$$\varphi_d = \varphi_e + IR_2;$$

$$\varphi_c = \varphi_d - E_1;$$

$$\varphi_a = \varphi_c + IR_1$$

или

$$\varphi_a = \varphi_b + IR_3 + E_2 + IR_2 - E_1 + IR_1,$$

откуда

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = E_2 - E_1 + I(R_1 + R_2 + R_3)$$

где ток ветви

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

В общем случае, когда между узлами a и b включена активная резистивная ветвь и ток направлен от узла a к узлу b , формула (2) принимает вид:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum E}{\sum R} = \frac{U_{ab} + \sum E}{\sum R}, \quad (3)$$

где $\sum E$ – алгебраическая сумма ЭДС, при этом ЭДС, направления которых совпадают с направлением тока, берутся со знаком «+», а если эти направления не совпадают, то соответствующие ЭДС берутся со знаком «-».

Выражение (3) есть обобщенный закон Ома для участка цепи, содержащий источник ЭДС.

Для замкнутой одноконтурной цепи (рис. 6):

$$I = \frac{\sum E}{\sum R}, \quad (4)$$

где $\sum E$ – алгебраическая сумма ЭДС контура,

$\sum R$ – арифметическая сумма сопротивлений контура.

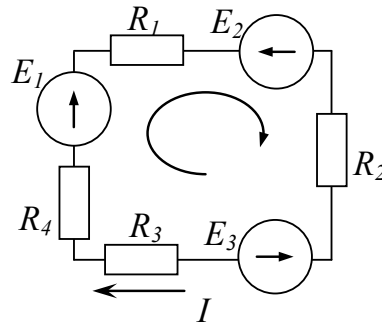


Рис. 6 – Замкнутая одноконтурная цепь

Первый закон Кирхгофа (закон токов). Алгебраическая сумма токов в любом узле равна нулю:

$$\sum I = 0, \quad (5)$$

или арифметическая сумма токов, входящих в узел, равна арифметической сумме токов, выходящих из узла.

Считая токи, входящие в узел, положительными, а выходящие – отрицательными для узла а (рис. 2) первый закон Кирхгофа можно записать следующим образом:

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0$$

или

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3.$$

Второй закон Кирхгофа (закон напряжений). Алгебраическая сумма напряжений на ветвях (элементах) любого замкнутого контура равна нулю:

$$\sum U_i = 0, \quad (6)$$

или алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на элементах этого контура:

$$\sum E_i = \sum I_i \cdot R_i. \quad (7)$$

Для составления уравнений по второму закону Кирхгофа вначале задают (указывают) направление токов во всех ветвях электрической цепи (если только токи не заданы по условию задачи) и для каждого контура выбирают направление обхода. Если при этом направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то такую ЭДС в уравнении (7) берут со знаком «+», если не совпадают – со знаком «-». Падения напряжений в правой части уравнения (7) берут со знаком «+», если выбранное направление тока ветви совпадает с направлением обхода контура, и со знаком «-», если не совпадает.

Для контура abcd (рис. 3), состоящего из ветвей ab, bc, cd, da, уравнение (7) принимает вид:

$$E_1 - E_2 - E_3 = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4.$$

Если обозначить напряжение на ветвях контура как U_{ab} , U_{bc} , U_{cd} , U_{ad} , то уравнение (6) принимает вид:

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} - U_{ad} = 0.$$

Закон Джоуля-Ленца (закон теплового действия тока). Количество теплоты, выделяемое в активном сопротивлении R (элементе цепи) при прохождении через него тока I , пропорционально квадрату тока, величине сопротивления и времени прохождения тока t через элемент:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (8)$$

3. Метод эквивалентных преобразований

Метод эквивалентных преобразований чаще всего применяют для электрической цепи с одним источником энергии. Этот метод основан на постепенном упрощении конфигурации цепи (т. н. «свертывание схемы») и нахождении одного эквивалентного сопротивления. При расчете токов в отдельных ветвях схему «развертывают» в обратном порядке. Упрощение конфигурации электрической цепи или какого-либо участка производят таким образом, чтобы токи и напряжения в частях схемы, не подвергнутых преобразованию, остались неизменными. Такое преобразование цепей называется эквивалентным, а схемы – эквивалентными. При этом мощности исходной цепи и преобразованной будут одинаковы.

При замене n последовательно соединенных сопротивлений одним эквивалентным его величина равна сумме этих сопротивлений:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (9)$$

Эквивалентные сопротивления цепи, состоящей из n параллельно соединенных сопротивлений, равны:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (10)$$

или

$$G_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n G_i,$$

где $G_{\text{экв}} = \frac{1}{R_{\text{экв}}}$ – эквивалентная проводимость цепи.

В случае параллельного соединения двух сопротивлений R_1 и R_2 их суммарное (эквивалентное) сопротивление:

$$R_{1,2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (11)$$

если $R_1 = R_2 = R$, то $R_{1,2} = 0,5R$.

В ряде случаев для упрощения цепи необходимо преобразовывать соединение звездой в эквивалентное соединение треугольником или соединение треугольником – в соединение звездой (рис. 7). Такие преобразования выполняют по формулам:

$$\begin{aligned} R_{ab} &= R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c}, \\ R_a &= \frac{R_{ab} \cdot R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}, \\ R_{bc} &= R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a}. \end{aligned} \quad (12)$$

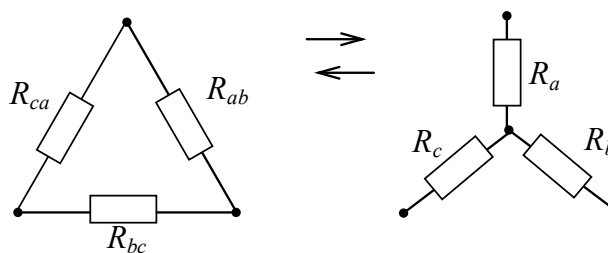


Рис. 7 – Эквивалентное соединение треугольником в соединение звездой

$$\begin{aligned}
R_b &= \frac{R_{bc} \cdot R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}, \\
R_{ca} &= R_c + R_a + \frac{R_a \cdot R_c}{R_b}, \\
R_c &= \frac{R_{ca} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Для упрощения симметричных цепей используют прием объединения (или разъединения) равнопотенциальных точек (узлов). Так, для определения эквивалентного сопротивления R_{ag} между вершинами куба a и g (рис. 8) равнопотенциальные точки b, d, c (c, f, n) можно объединить в один узел, и тогда сопротивление R_{ag} можно определить по схеме, представленной на рисунке 9 (здесь все грани куба имеют равные сопротивления R).

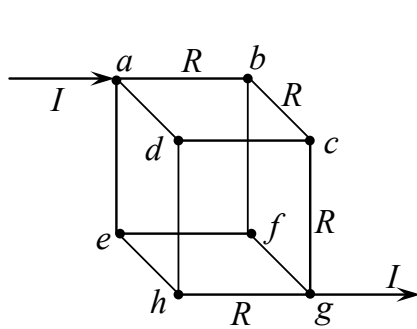


Рис. 8 – Определение сопротивления между вершинами куба a и g

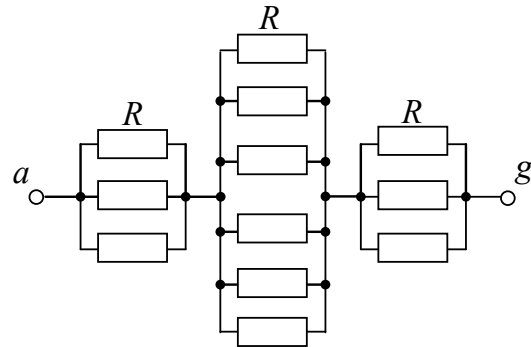


Рис. 9 – Эквивалентное сопротивление между точками a и g

Видно, что эквивалентное сопротивление $R_{\text{эkv}} = R_{ag}$ определяется тремя параллельными группами (две по три и одна из шести сопротивлений), т. е.:

$$R_{\text{эkv}} = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \right) \cdot R = \frac{5}{6} R.$$

Для схемы, представленной на рисунке 10, нужно, наоборот, разъединить ветви (сопротивление каждой ветви R) в узле m , и тогда эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов ab составит:

$$R_{ab} = R_{\text{эkv}} = \frac{3}{2} R.$$

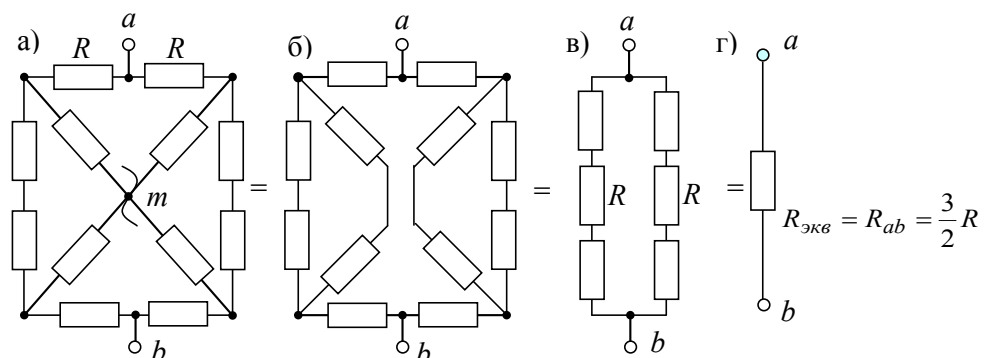


Рис. 10 – Разъединение каждой ветви сопротивлений

Преобразование источника ЭДС E в эквивалентный источник тока J выполняется по схеме приведенной на рисунке 11.

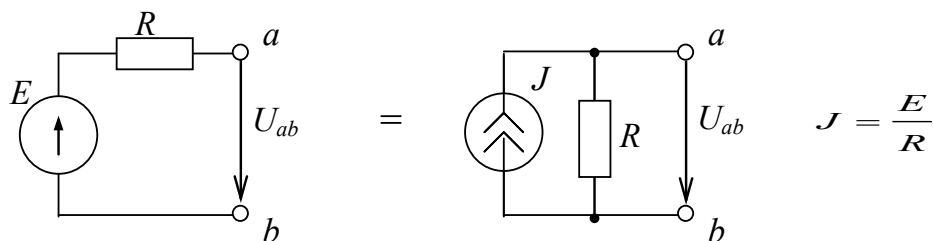


Рис. 11 – Преобразование источника ЭДС E в эквивалентный источник тока J

Наоборот, преобразование источника тока J в эквивалентный источник ЭДС E – по схеме представлено на рисунке 12.

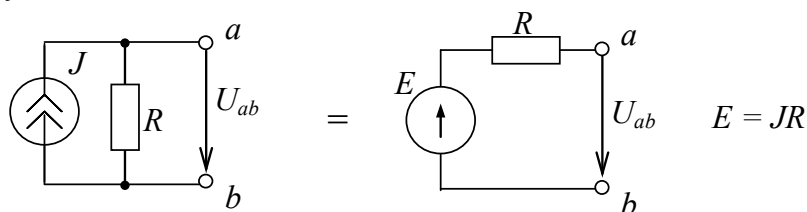


Рис. 12 – Преобразование источника тока J в эквивалентный источник ЭДС E

На рисунке 13 в качестве примера показано поэтапное преобразование цепи с использованием изложенных выше приемов.

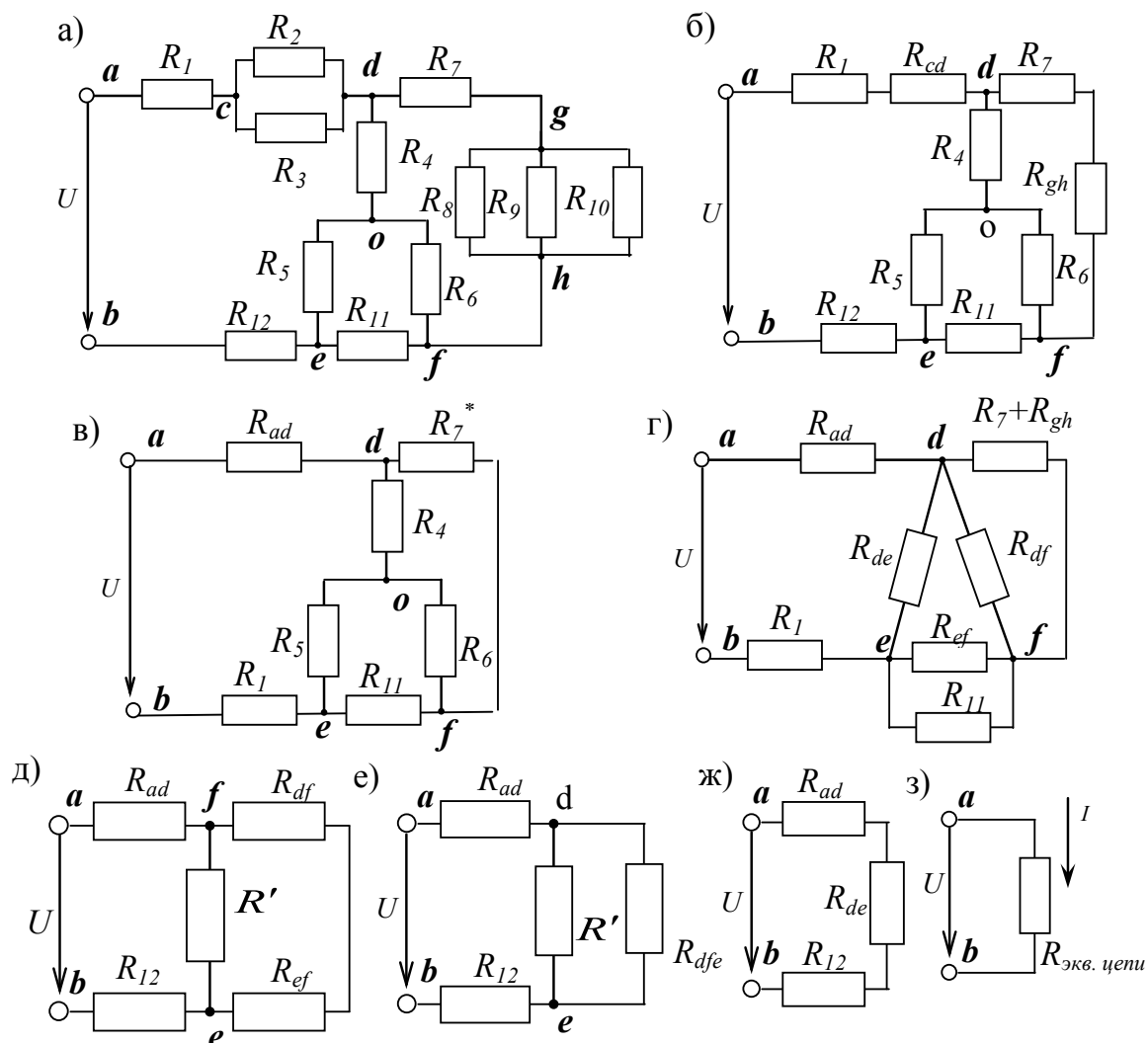


Рис. 13 – Последовательное преобразование цепи

1. Выделим на схеме (рис. 13 а) участки с параллельным соединением резисторов (участок cd с R_2 и R_3 , участок gh с R_8 , R_9 и R_{10}) и найдем эквивалентное сопротивление указанных участков.

$$R_{cd} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad \text{и} \quad R_{gh} = \frac{1}{G_{gh}}, \quad \text{где} \quad G_{gh} = \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}}.$$

2. Заменяя R_2 и R_3 на R_{cd} и R_8 , R_9 и R_{10} на R_{gh} , получим схему, соответствующую (рис. 13 б) – первое преобразование.

3. Второе преобразование цепи получим в результате замены последовательно соединенных сопротивлений (R_I и R_{cd}) и (R_7 и R_{gh}), соответственно сопротивлениями $R_{ad} = R + R_c$ и $R_7^* = R_7 + R_{gh}$. В этом случае схема имеет вид, соответствующий (рис. 13 в).

4. Третье преобразование – это замена R_4 , R_5 и R_6 (звезда) на R_{df} , R_{ef} и R_{de} (треугольник), рассчитанных по формулам (14). После замены звезды на треугольник схема имеет вид, соответствующий (рис. 13 г).

5. Дальнейшие преобразования сводятся к замене последовательно-параллельных соединений соответствующими эквивалентными сопротивлениями:

– схема (рис. 13 д) представляет замену параллельных сопротивлений R_7^* и R_{df} на R_{df}^* , а R_{11} и R_{ef} на R_{ef}^* ;

– схема (рис. 13 е) – замену R_{df} и R_{ef} одним суммарным R_{dfe} ;

– схема (рис. 13 ж) – замену двух параллельных сопротивлений R_{de} и R_{dfe} – одним R_{de}^* ; и, наконец, суммируя R_{ad} , R_{de}^* и R_{12} , производим последнее преобразование и находим эквивалентное сопротивление цепи:

$$R_{\text{эkv}} = R_{ad} + \dots + R_{de}^* + R_{12} \quad (\text{рис. 13 з}).$$

Тогда ток, потребляемый цепью I , будет равен:

$$I = \frac{U}{R_{\text{эkv. цепи}}}.$$

4. Замена параллельных ветвей с источниками ЭДС и источниками тока одной эквивалентной

Если к каким-либо двум узлам, например a и b , сложной электрической цепи присоединены m параллельных ветвей с источниками ЭДС E и n ветвей с источниками тока I , то эти ветви можно заменить одной эквивалентной ветвью с источником ЭДС E_3 и сопротивлением R_3 (рис. 14).

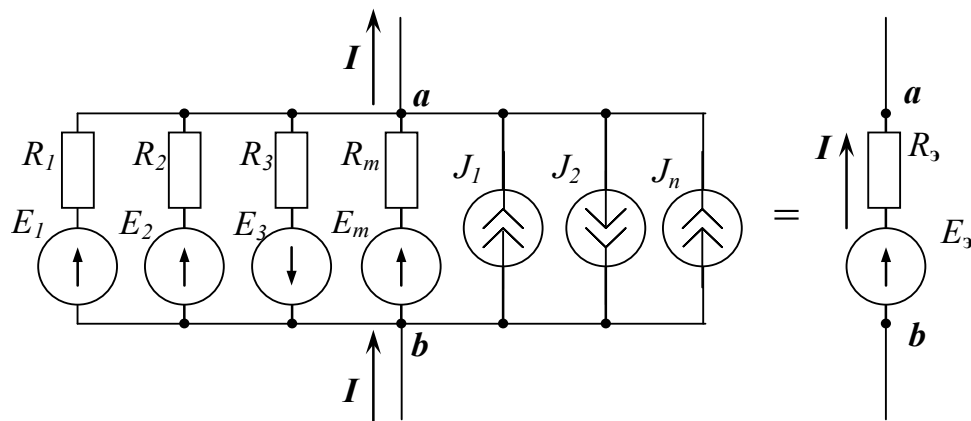


Рис. 14 – Эквивалентное преобразование параллельных ветвей цепи

Величина эквивалентной ЭДС E_9 равна:

$$E_9 = \frac{1}{G_9} \sum_{i=1}^m E_i \cdot G_i + \frac{1}{G_9} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (14)$$

где

$$G_9 = \sum_{i=1}^m G_i = \frac{1}{R_9} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_m}.$$

В выражении (14) со знаком «+» берутся токи, направленные к тому же узлу, что и эквивалентная ЭДС E_9 , а со знаком «-» – направленные к другому узлу.

Замена нескольких параллельных ветвей одной эквивалентной, как правило, упрощает расчет сложных схем.

Пример 1. Определить ток в ветви с амперметром в схеме, представленной на рисунке 15, если: $E_1 = 36 \text{ В}$; $E_2 = 96 \text{ В}$; $E_3 = 28 \text{ В}$; $E_4 = 100 \text{ В}$; $E_5 = 60 \text{ В}$; $J = 6 \text{ А}$; $R_1 = 12 \text{ Ом}$; $R_2 = 48 \text{ Ом}$; $R_3 = 44 \text{ Ом}$; $R_4 = 10 \text{ Ом}$; $R_5 = 15 \text{ Ом}$; $R_6 = 30 \text{ Ом}$.

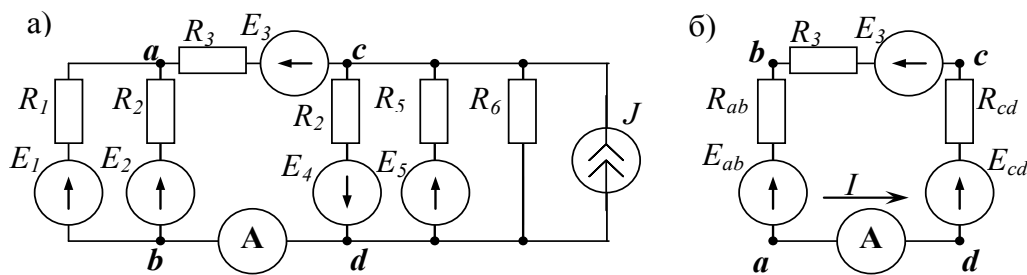


Рис. 15 – Эквивалентное преобразование цепи (к примеру 1)

Решение.

1. Заменим ветви с $R_1 E_1$ и $R_2 E_2$ одной эквивалентной ветвью с R_{ab} и E_{ab} , где:

$$R_{ab} = \frac{1}{G_{ab}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = 9,6 \text{ Ом},$$

$$E_{ab} = \frac{\sum E \cdot G}{\sum G} = \frac{E_1 \cdot \frac{1}{R_1} + E_2 \cdot \frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = 48 \text{ В}.$$

2. Аналогично заменим параллельные ветви, включенные между узлами c и d , одной эквивалентной ветвью с R_{cd} и E_{cd} , где:

$$R_{cd} = \frac{1}{G_{cd}} = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} = 6 \text{ Ом},$$

$$E_{cd} = \frac{\sum E \cdot G + J}{\sum G} = \frac{10 - 4 + 6}{\frac{1}{10} + \frac{1}{15} + \frac{1}{30}} = 60 \text{ В}.$$

3. В результате преобразований цепь имеет вид (рис. 15 б). В такой схеме ток может быть найден по закону Ома:

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} = \frac{E_{cd} + E_3 - E_{ab}}{R_3 + R_{ab} + R_{cd}} = \frac{40}{20} = 2 \text{ А}.$$

5. Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Расчет цепи этим методом заключается в решении уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. В результате расчета находят неизвестные токи ветвей. Общее число уравнений должно быть равно числу неизвестных, то есть числу ветвей цепи. При этом число независимых уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, равно числу узлов схемы q минус единица, то есть $q - 1$. Остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа. При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа можно выбирать любые контуры, однако нужно следить, чтобы в каждом новом контуре содержалась хотя бы одна новая ветвь, не входившая в другие, ранее выбранные контуры. Наиболее удобно выбирать контуры в виде ячеек схемы, то есть контуров, не содержащих внутри себя ветвей. При таком выборе контуров можно быть уверенным, что все уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа, будут независимыми.

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа обладает наглядностью, позволяет сразу определить токи во всех ветвях, однако он является весьма трудоемким, поскольку требует решения системы из большого числа уравнений, равного числу ветвей. Поэтому ниже будут рассмотрены другие методы расчета цепей постоянного тока, которые позволяют сократить число уравнений, входящих в систему.

Пример 2. Для цепи (рис. 16) определить токи в ветвях и показание вольтметра, если $E_1 = 40 \text{ В}$; $E_2 = 60 \text{ В}$; $E_3 = 50 \text{ В}$; $E_6 = 70 \text{ В}$; $J = 2 \text{ А}$; $R_1 = 100 \text{ Ом}$; $R_2 = 60 \text{ Ом}$; $R_3 = 50 \text{ Ом}$; $R_4 = R_5 = 75 \text{ Ом}$; $R_6 = R_8 = 30 \text{ Ом}$; $R_7 = 20 \text{ Ом}$.

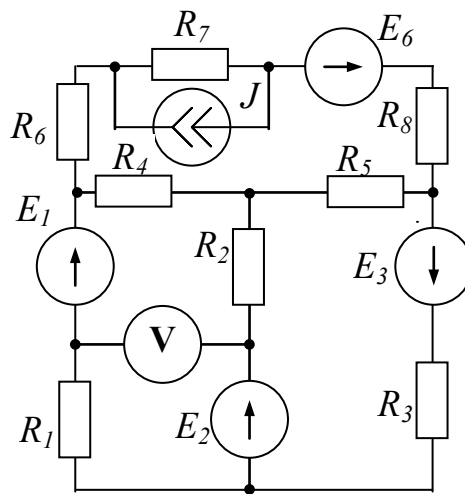


Рис. 16 – Электрическая цепь (к примеру 2)

Решение.

1. Упростим цепь, произведя эквивалентные преобразования для ветви с сопротивлениями R_6 , R_7 , R_8 , ЭДС E_6 и источником тока J . Вначале преобразуем источник тока J в эквивалентный источник ЭДС $E^* = J \cdot R_7$:

$$E^* = 2 \cdot 20 = 40 \text{ В}.$$

Сопротивления R_6 , R_7 и R_8 включены последовательно, заменим их эквивалентным R_6^* :

$$R_6^* = R_6 + R_7 + R_8 = 30 + 20 + 30 = 80 \text{ Ом}.$$

Также в рассматриваемой ветви оставим один общий источник E_6^* :

$$E_6^* = E_6 - E^* = 70 - 40 = 30 \text{ В}.$$

После упрощения цепь имеет вид (рис. 17).

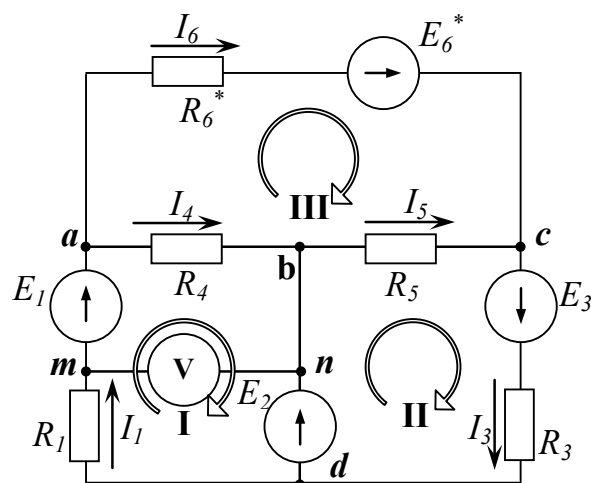


Рис. 17 – Эквивалентное преобразование цепи (к примеру 2)

Для указанной цепи выберем направления токов во всех ветвях, обозначим узлы и выберем направления обхода контуров (по часовой стрелке).

2. Составим систему из шести уравнений (шесть неизвестных токов), при этом три уравнения составим по первому закону Кирхгофа, так как ($q = 4$, а $q - 1 = 3$), например, для узлов a , b и c , а остальные три – по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III:

$$\begin{cases} I_1 + I_4 - I_6 = 0, \\ I_4 + I_2 - I_5 = 0, \\ I_5 + I_6 - I_3 = 0, \\ E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_4 R_4 - I_2 R_2, \\ E_2 + E_3 = I_2 R_2 + I_5 R_5 + I_3 R_3, \\ E_6^* = I_6 R_6^* - I_4 R_4 - I_5 R_5. \end{cases} \quad (15)$$

Произведя соответствующие подстановки, получим:

$$\begin{cases} I_1 - I_4 - I_6 = 0, \\ I_4 + I_2 - I_5 = 0, \\ I_5 + I_6 - I_3 = 0, \\ -20 = 100I_1 + 75I_4 - 60I_2, \\ 110 = 60I_2 + 75I_5 + 50I_3, \\ 30 = 80I_6 - 75I_4 - 75I_5. \end{cases} \quad (16)$$

Решая полученную систему, например, при помощи программы Mathcad, получим следующие значения токов:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0,318 \text{ A}, \\ I_2 &= 0,595 \text{ A}, \\ I_3 &= 0,913 \text{ A}, \\ I_4 &= -0,214 \text{ A}, \\ I_5 &= 0,381 \text{ A}, \\ I_6 &= 0,532 \text{ A}. \end{aligned}$$

3. Найдем напряжение U_{nm} (показание вольтметра). Для этого составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура $abnm$:

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix},$$

а Δ_k – тот же определитель, k -й столбец которого заменен столбцом контурных ЭДС.

Во внешних ветвях, то есть в ветвях, не являющихся смежными между соседними контурами, найденный контурный ток является действительным током в ветви (с учетом знака), а во внутренних (смежных) ветвях действительный ток определяется алгебраической суммой контурных токов двух смежных контуров (разности контурных токов, если выполнено условие 1).

6.2. Рекомендации к методу контурных токов

1. Для составления контурных уравнений целесообразнее выбирать контуры по ячейкам.
2. С целью единообразия формы записи (уравнений, матрицы сопротивлений, действительных токов в смежных ветвях) целесообразно все контурные токи направлять одинаково (все по часовой стрелке или все против).
3. Если требуется определить ток только в одной ветви, то целесообразно сделать искомым ток контурным, то есть ветвь должна быть внешней.
4. Если в схеме имеется ветвь с известным током, то этот ток следует сделать контурным, в результате число уравнений уменьшается на единицу.

Пример 3. Для схемы (рис. 18) методом контурных токов определить токи в ветвях. Данные для расчета цепи взять из примера 2.

$E_1 = 40 \text{ В}; E_2 = 60 \text{ В}; E_3 = 50 \text{ В}; E_6 = 70 \text{ В}; J = 2 \text{ А}; R_1 = 100 \text{ Ом}; R_2 = 60 \text{ Ом}; R_3 = 50 \text{ Ом}; R_4 = R_5 = 75 \text{ Ом}; R_6 = R_8 = 30 \text{ Ом}; R_7 = 20 \text{ Ом}.$

Решение:

1. Выберем направление всех контурных токов, совпадающее с направлением обхода контуров, как показано на рисунке 18, то есть по часовой стрелке. При этом в первом контуре действует ток I_{11} , во втором – I_{22} и в третьем – I_{33} . Эти токи будут искомыми.

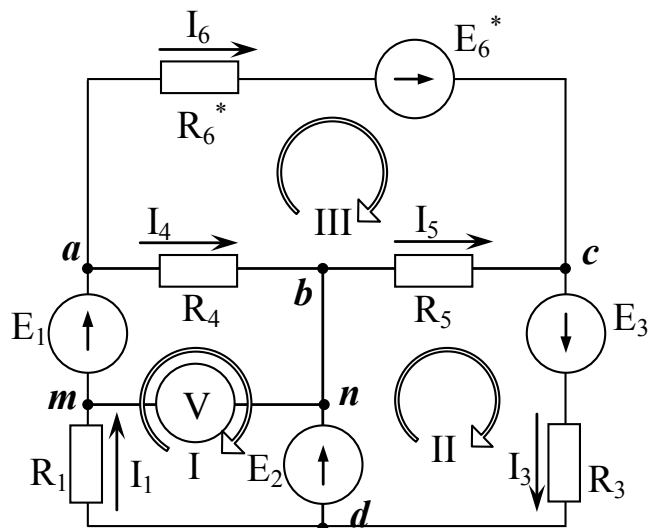


Рис. 18 – Схема (к примеру 3)

2. Определим контурные ЭДС:

$$\begin{aligned} E_{11} &= E_1 - E_2 = 40 - 60 = -20 \text{ В}, \\ E_{22} &= E_2 + E_3 = 60 + 50 = 110 \text{ В}, \\ E_{33} &= E_6^* = 30 \text{ В}. \end{aligned}$$

3. Определим собственные и взаимные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_4 + R_2 = 100 + 75 + 60 = 235 \text{ Ом}, \\ R_{22} &= R_2 + R_3 + R_5 = 60 + 50 + 75 = 185 \text{ Ом}, \\ R_{33} &= R_4 + R_5 + R_6^* = 75 + 75 + 80 = 230 \text{ Ом}, \\ R_{12} &= R_{21} = R_2 = 60 \text{ Ом}, \\ R_{13} &= R_{31} = R_4 = 75 \text{ Ом}, \\ R_{32} &= R_{23} = R_5 = 75 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

4. Составим по второму закону Кирхгофа уравнения для выбранных контуров. Эти уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} E_{11} &= I_{11} R_{11} - I_{22} R_{12} - I_{33} R_{13}, \\ E_{22} &= -I_{11} R_{21} + I_{22} R_{22} - I_{33} R_{23}, \\ E_{33} &= -I_{11} R_{31} - I_{22} R_{32} + I_{33} R_{33}. \end{aligned} \quad (18)$$

Произведя соответствующие подстановки, получим:

$$\begin{cases} -20 = 235 I_{11} - 60 I_{22} - 75 I_{33}, \\ 110 = -60 I_{11} + 185 I_{22} - 75 I_{33}, \\ 30 = -75 I_{11} - 75 I_{22} + 230 I_{33}. \end{cases} \quad (19)$$

Решая полученную систему уравнений, получим следующие значения контурных токов:

$$\begin{aligned} I_{11} &= 0,318 \text{ А}, \\ I_{22} &= 0,913 \text{ А}, \\ I_{33} &= 0,532 \text{ А}. \end{aligned}$$

5. Определяем токи в ветвях:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11} = 0,318 \text{ А}, \\ I_2 &= I_{22} - I_{11} = 0,913 - 0,318 = 0,595 \text{ А}, \\ I_3 &= I_{22} = 0,913 \text{ А}, \\ I_4 &= I_{11} - I_{33} = 0,318 - 0,532 = -0,214 \text{ А}, \\ I_5 &= I_{22} - I_{33} = 0,913 - 0,532 = 0,381 \text{ А}, \\ I_6 &= I_{33} = 0,532 \text{ А}. \end{aligned}$$

Значения токов в ветвях полностью совпали с ранее найденными значениями (пример 2).

7. Метод узловых потенциалов

Этот метод основан на применении первого закона Кирхгофа и обобщенного закона Ома. Метод позволяет составить систему уравнений, из которой можно определить потенциалы всех узлов схемы, а затем по известным разностям узловых потенциалов определить все токи в ветвях.

Как следует из обобщенного закона Ома (3), ток любой ветви определен, если известны потенциалы узлов, к которым подключена данная ветвь, или известно напряжение, под которым эта ветвь находится.

Так же, как и в методе контурных токов, введем следующие понятия:

- узловой ток;
- собственная (узловая) проводимость узла;
- общая проводимость между узлами.

Узловой ток, обозначаемый двумя индексами (например, для узла k как I_{kk}), – это алгебраическая сумма токов источников, действующих в ветвях, подсоединенных к рассматриваемому узлу k . Если в какую-либо ветвь f включен источник ЭДС E_f , то ток I_f от такой ветви определяется как:

$$I_f = E_f \cdot G_f,$$

где G_f – проводимость ветви f . Если ЭДС и ток источника тока направлены к узлу, то их записы-

Собственная (узловая) проводимость узла k (G_{kk}) – это сумма проводимостей всех ветвей, подключенных к этому узлу (проводимость ветви с идеальным источником тока равна нулю).

При составлении уравнений по методу узловых потенциалов следует помнить, что в электротехнике принято вести отсчет потенциалов от потенциала земли, который принимают равным нулю, поэтому для любой схемы, содержащей n узлов, уравнений составляют на единицу меньше, чем число узлов, то есть $n-1$. Так как один из узлов схемы заземляется, его потенциал становится известным (равным нулю) и число неизвестных потенциалов уменьшается на единицу.

[illegible]

1. Если между узлами нет соединяющих ветвей, то соответствующие проводимости равны нулю.
2. Если ветви, подсоединенные к какому-либо узлу, не содержат источников, то узловый ток этого узла равен нулю.

В частном случае, когда схема имеет всего два узла, метод узловых потенциалов позволяет составить всего одно уравнение, с помощью которого определяют напряжение между узлами, это так называемая формула межузлового напряжения:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{\sum_{k=1}^m E_k \cdot G_k + \sum_{k=1}^n I_k}{\sum_{k=1}^m G_k} \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^m G_k - \text{сумма проводимостей всех ветвей, включенных между узлами } a \text{ и } b;$$

$\sum_{k=1}^m I_k$ – алгебраическая сумма токов и источников, включенных между узлами a и b ; m – число ветвей, соединяющих узлы a и b .

$$I_k = (\pm E_k - U_{ab}) \cdot G_k. \quad (22)$$

24

писывается со знаком «+», если она направлена к узлу a , и «-», если – от узла. Этот метод часто называют методом двух узлов.

Пример 4. Для цепи (рис. 19) определить токи в ветвях методом узловых потенциалов, если: $E_1 = 40 \text{ В}$; $E_2 = 60 \text{ В}$; $E_3 = 50 \text{ В}$; $E_6 = 100 \text{ В}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 25 \text{ Ом}$; $R_4 = R_5 = 40 \text{ Ом}$; $I_1 = 2 \text{ А}$; $I_2 = 1 \text{ А}$.

Решение:

1. Выберем направление токов в ветвях и заземлим узел a (т. е. $\varphi_a = 0$), тогда неизвестными будут потенциалы в узлах c , h , e .

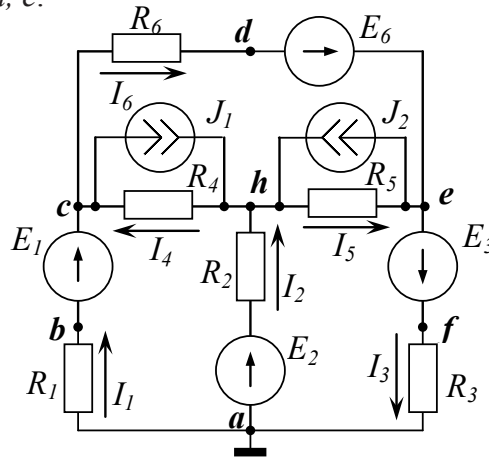


Рис. 19 – Схема (к примеру 4)

2. Определим узловые токи:

$$I_{cc} = E_1 \cdot \frac{1}{R_1} - E_6 \cdot \frac{1}{R_6} - I_1 = 40 \cdot \frac{1}{10} - 100 \cdot \frac{1}{50} - 2 = 0 \text{ А},$$

$$I_{hh} = I_1 + I_2 + E_2 \cdot \frac{1}{R_2} = 2 + 1 + 60 \cdot \frac{1}{20} = 6 \text{ А},$$

$$I_{ee} = E_6 \cdot \frac{1}{R_6} - E_3 \cdot \frac{1}{R_3} - I_2 = 100 \cdot \frac{1}{50} - 50 \cdot \frac{1}{25} - 1 = -1 \text{ А}.$$

3. Определим собственные (узловые) проводимости:

$$G_{cc} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = 0,1 + 0,025 + 0,02 = 0,145 \text{ См},$$

$$G_{hh} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = 0,05 + 0,025 + 0,025 = 0,1 \text{ См},$$

$$G_{ee} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} = 0,04 + 0,025 + 0,02 = 0,085 \text{ См}.$$

4. Определим общие проводимости:

$$G_{ch} = G_{hc} = \frac{1}{R_4} = 0,025 \text{ См},$$

$$G_{ce} = G_{ec} = \frac{1}{R_6} = 0,02 \text{ См},$$

$$G_{he} = G_{eh} = \frac{1}{R_5} = 0,025 \text{ См}.$$

5. По первому закону Кирхгофа составим систему уравнений для узлов c , h и e . Уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} I_{cc} = \varphi_c \cdot G_{cc} - \varphi_h \cdot G_{ch} - \varphi_e \cdot G_{ce}, \\ I_{hh} = -\varphi_c \cdot G_{hc} + \varphi_h \cdot G_{hh} - \varphi_e \cdot G_{he}, \\ I_{ce} = -\varphi_c \cdot G_{ec} - \varphi_h \cdot G_{eh} + \varphi_e \cdot G_{ee}. \end{cases}$$

Произведя соответствующие подстановки, получим:

$$\begin{cases} 0 = 0,145 \cdot \varphi_c - 0,025 \cdot \varphi_h - 0,02 \cdot \varphi_e, \\ 6 = -0,025 \cdot \varphi_c + 0,1 \cdot \varphi_h - 0,025 \cdot \varphi_e, \\ -1 = -0,02 \cdot \varphi_c - 0,025 \cdot \varphi_h - 0,085 \cdot \varphi_e. \end{cases}$$

Решая эти уравнения, найдем потенциалы в узлах:

$$\varphi_c = 12,821 \text{ В},$$

$$\varphi_h = 65,861 \text{ В},$$

$$\varphi_e = 10,623 \text{ В}.$$

6. Найдем токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{E_1 - \varphi_c}{R_1} = \frac{40 - 12,821}{10} = 2,718 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{E_2 - \varphi_h}{R_2} = \frac{60 - 65,861}{20} = -0,293 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{E_3 + \varphi_e}{R_3} = \frac{50 - 10,623}{25} = 2,425 \text{ А},$$

$$I_4 = \frac{\varphi_h - \varphi_c}{R_4} = \frac{65,861 - 12,821}{40} = 1,326 \text{ А},$$

$$I_5 = \frac{\varphi_h - \varphi_e}{R_5} = \frac{65,861 - 10,623}{40} = 1,381 \text{ А},$$

$$I_6 = \frac{E_6 + \varphi_e - \varphi_c}{R_6} = \frac{100 - 10,623 + 12,821}{50} = 2,044 \text{ А}.$$

Проверка для узла h : $I_1 + I_2 - I_4 - I_5 + I_2 = 2 + 1 - 1,381 - 0,293 = 0 \text{ А}$.

Получилось, что сумма токов в узле равна 0, следовательно, задача решена верно.

Пример 5. Для цепи, приведенной на рисунке 20, рассчитать токи в ветвях, если $E_1 = 60 \text{ В}$; $E_2 = 40 \text{ В}$; $E_3 = 80 \text{ В}$; $I = 2,02 \text{ А}$; $R_1 = 20 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 40 \text{ Ом}$; $R_4 = 50 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$.

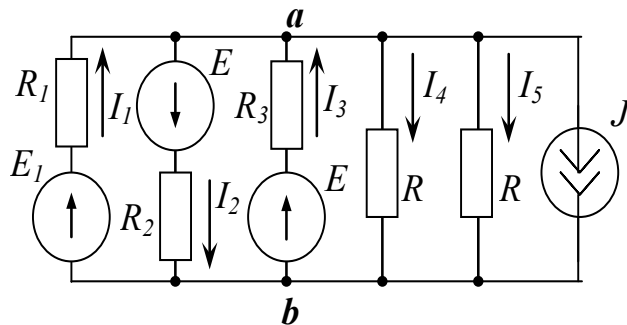


Рис. 20 – Схема (к примеру 5)

Решение:

1. Схема цепи, приведенная на рисунке 20, содержит два узла, поэтому по формуле (21) определяем напряжение между узлами a и b U_{ab} :

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{E_1 \cdot \frac{1}{R_1} - E_2 \cdot \frac{1}{R_2} + E_3 \cdot \frac{1}{R_3} - I}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} =$$

$$= \frac{60 \cdot \frac{1}{20} - 40 \cdot \frac{1}{20} + 80 \cdot \frac{1}{40} - 2,02}{\frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{40} + \frac{1}{50} + \frac{1}{10}} = 4,0 \text{ A}.$$

2. Определяем токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{60 - 4}{20} = 2,8 \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{ab}}{R_2} = \frac{40 + 4}{20} = 2,2 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{ab}}{R_3} = \frac{80 - 4}{40} = 1,9 \text{ A},$$

$$I_4 = \frac{U_{ab}}{R_4} = \frac{4}{50} = 0,08 \text{ A},$$

$$I_5 = \frac{U_{ab}}{R_5} = \frac{4}{10} = 0,4 \text{ A}.$$

3. Проверка:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 - I = 2,8 - 2,2 + 1,9 - 0,08 - 0,04 - 2,02 = 0 \text{ A}.$$

8. Потенциальная диаграмма

Потенциальной диаграммой называется график распределения потенциала вдоль какого-либо контура электрической цепи.

При построении потенциальной диаграммы по оси абсцисс откладывают в выбранном масштабе все сопротивления контура, встречающиеся при его последовательном обходе. По оси ординат откладывают потенциалы соответствующих точек (обычно потенциал начальной точки принимают равным нулю).

При правильном построении диаграмма должна замкнуться, поскольку при обходе контура всегда возвращаются к исходной точке.

Потенциальная диаграмма позволяет отыскивать в схеме точки равного потенциала, которые в случае необходимости могут быть соединены друг с другом без нарушения токораспределения. Кроме того, могут быть найдены точки, разность потенциалов между которыми равна заданной величине.

В качестве примера на (рис. 21) построена потенциальная диаграмма для внешнего контура цепи, схема которой приведена на рисунке 19.

За начало обхода контура выбрана точка a , так как потенциал узла a принят за ноль. Следовательно, координаты точки a : $x = 0, y = 0$. При переходе от точки a к точке b сопротивление увеличивается на величину $R_1 = 10 \text{ Ом}$, а потенциал понижается на величину падения напряжения на R_1 :

$$\varphi_0 = \varphi_a - I_1 \cdot R_1 = -27,18 \text{ В},$$

$$\varphi_b = \varphi_a - I_1 \cdot R_1 = -27,18 \text{ В},$$

таким образом, координаты точки b : $x = 10, y = -27,18$.

При переходе от точки b к точке c сопротивление не изменяется (так как сопротивление ЭДС $E_1 = 0$), а потенциал увеличивается на величину E_1 : $\varphi_c = \varphi_b + E_1 = 12,82$ В; координаты точки c : $x = 10, y = 12,82$ (это значение совпадает с ранее найденным в примере 4 потенциалом узла c). Аналогично найдены потенциалы и координаты точек d, e, f и a^* :

$$\varphi_d = \varphi_c - I_6 \cdot R_6 = -89,38 \text{ В};$$

координаты точки d : $x = 10 + R_6 = 60, y = 89,38$.

$$\varphi_f = \varphi_e - E_3 = 60,62 \text{ В};$$

координаты точки e : $x = 60, y = 10,62$.

$$\varphi_f = \varphi_e - E_3 = 60,62 \text{ В};$$

координаты точки f : $x = 60, y = 60,62$.

$$\varphi_{a^*} = \varphi_f - I_3 \cdot R_3 = -0,005 \approx 0 \text{ В};$$

координаты точки a^* : $x = 60 + R_3 = 85, y = 0$.

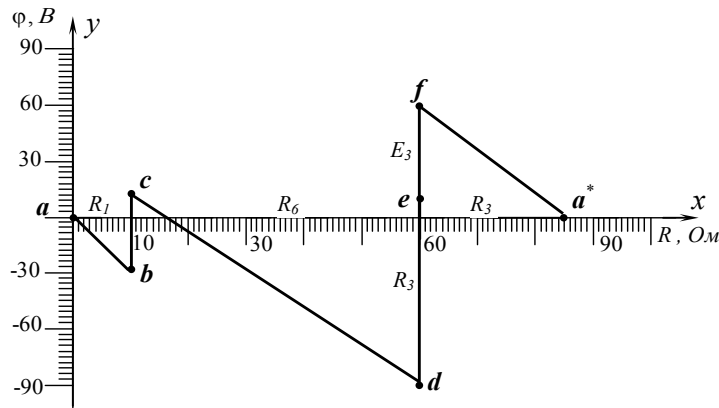


Рис. 21 – Потенциальная диаграмма для внешнего контура цепи (к рис. 19)

9. Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора, как правило, используется в том случае, когда требуется определить ток в одной выделенной ветви, особенно если сопротивление используемой ветви изменяется или нелинейное. В основе этого метода лежит *теорема об активном двухполюснике*.

Ток любой выделенной ветви, например ab , не изменится, если активную часть электрической цепи (активный двухполюсник A), к которой подсоединена выделенная ветвь ab , заменить источником с ЭДС E , равной напряжению на зажимах разомкнутой ветви U_x , и сопротивлением R_{bx} , равным входному сопротивлению активной части цепи, или источником тока J , значение которого равно току I_k короткозамкнутой выделенной ветви ab , и проводимостью G_{bx} , равной входной проводимости активной части цепи (рис. 22).

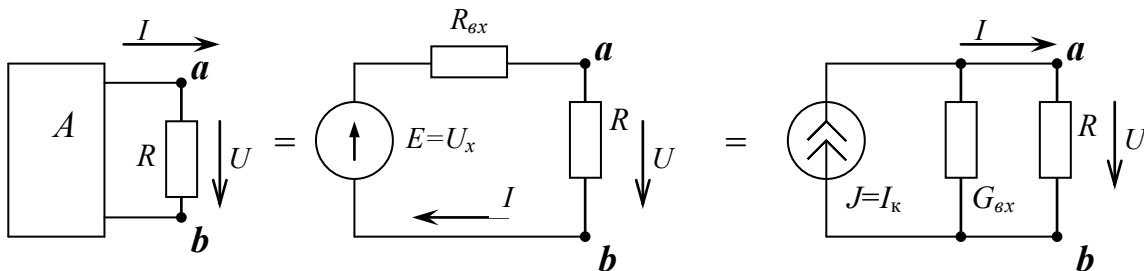


Рис. 22 – Эквивалентное преобразование активного двухполюсника

Доказательство. В электрической цепи выделим ветвь ab с сопротивлением R и током I , а оставшуюся часть цепи представим в виде активного двухполюсника A (рис. 23 а). Разомкнем (или удалим) ветвь ab . Между точками разрыва a и b возникнет напряжение холостого хода $U_x = \varphi_a - \varphi_b$, а ток ветви, очевидно, будет равен нулю (рис. 23 б).

Затем подключим к зажимам a и b источник с ЭДС $E^* = U_x$, направленный навстречу U_x (рис. 23 в). Ток ветви ab останется равным нулю на основании теоремы о компенсации (см. рис. 8). Если в ветвь ab ввести еще одну ЭДС E , также равную U_x , но противоположно направленную ЭДС E^* , то полученная схема (рис. 23 г) будет эквивалентна заданной (представленной ранее на рисунке 23 а).

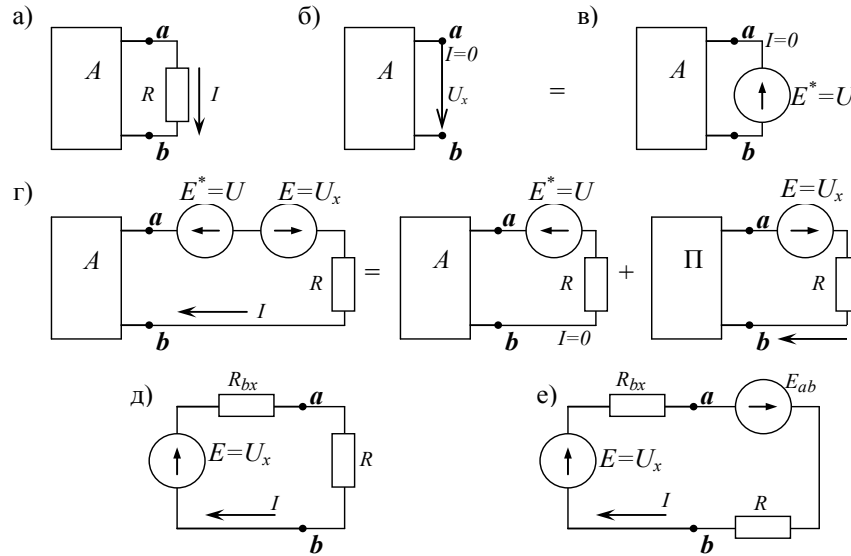


Рис. 23 – Схемы эквивалентного генератора

В соответствии с принципом суперпозиции ток ветви ab можно представить как алгебраическую сумму частичных токов, создаваемых каждым из источников E и E^* (рис. 23). Но поскольку все источники, находящиеся внутри активного двухполюсника A совместно с источником ЭДС E^* не вызывают тока в ветви ab , то, следовательно, ток в ветви ab создается только одним источником ЭДС $E = U_x$, а двухполюсник при этом становится пассивным.

Таким образом, для нахождения тока ветви ab вместо сложной схемы (рис. 23 а) можно воспользоваться схемой, представленной на рисунке 23 д, где ток определяется выражением:

$$I = \frac{E}{R + R_{bx}}, \quad (23)$$

здесь R_{bx} – входное сопротивление пассивного двухполюсника, то есть когда все источники ЭДС и токов в активном двухполюснике равны нулю.

Если ветвь ab содержит не только сопротивление R , но и ЭДС E_{ab} , то ток в этой ветви определяется схемой на рисунке 23 е и равен:

$$I = \frac{E_x \pm E_{ab}}{R_{bx} + R}, \quad (24)$$

где ЭДС E_{ab} берется со знаком «+», когда E_x и E_{ab} направлены в одну сторону, и со знаком «–», если ЭДС E_x и E_{ab} направлены навстречу друг другу.

Последние две схемы (рис. 23 д и 23 е) показывают, что всю оставшуюся часть электрической цепи по отношению к выделенной ветви ab можно представить в виде эквивалентного генератора с ЭДС генератора $E_g = U_x$ и внутренним сопротивлением генератора $R_g = R_{bx}$.

Если сопротивление ветви $R_{ab} = 0$, то ток в ветви определяется как ток короткозамкнутой ветви I_k :

$$I_k = \frac{U_x}{R_{bx}}, \quad (25)$$

то есть входное сопротивление двухполюсника, а, следовательно, и внутреннее сопротивление генератора определяется выражением:

$$R_z = R_{bx} = \frac{U_x}{I_k}. \quad (26)$$

Из выражения (26) следует, что параметры эквивалентного генератора (E_z и R_z) можно определить также и экспериментально из опытов холостого тока ($U_x = E_z$) и короткого замыкания (I_k), а разделив U_x на I_k определить и R_z .

На основании вышеизложенного порядок расчета тока в исследуемой ветви методом эквивалентного генератора следующий:

1. Отключают исследуемую ветвь, осуществляя режим холостого хода, и каким-либо методом (контурных токов, по законам Кирхгофа и др.) определяют напряжение холостого хода U_x на зажимах разомкнутой ветви.

2. Находят входное (эквивалентное) сопротивление $R_{bx} = R_z$ схемы относительно зажимов разомкнутой ветви, исключив при этом в двухполюснике все действующие источники ЭДС и токов по методике, изложенной в методе суперпозиции токов (источники ЭДС замыкают, а источники тока отключают).

3. Ток исследуемой ветви находят согласно выражению (23) или (24).

Пример 6. Для схемы (рис. 24) определить ток I_{ab} в ветви ab , если:

$E_1 = 120 \text{ В}$; $E_2 = 90 \text{ В}$; $J = 3 \text{ А}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 60 \text{ Ом}$; $R_4 = 15 \text{ Ом}$; $R_5 = 20 \text{ Ом}$; $R_6 = 10 \text{ Ом}$.

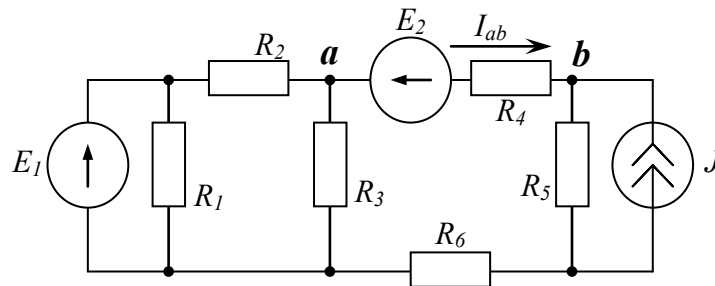


Рис. 24 – Схема (к примеру 6)

Решение. Удалим (разомкнем) ветвь ab . Получим расчетную схему для нахождения U_x (рис. 25).

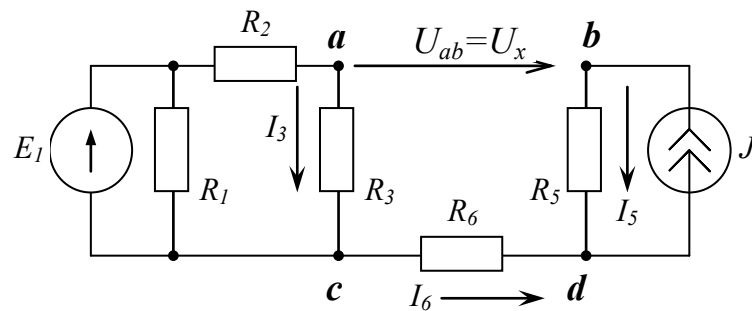


Рис. 25 – Эквивалентная схема (к примеру 6)

Для (рис. 25) введем обозначения:

$U_{ab} = U_x = E_z = \varphi_a - \varphi_b$ – напряжение холостого хода,

I_3 – ток ветви ac ,

I_5 – ток ветви bd ,

I_6 – ток ветви cd .

Токи I_3 , I_5 , I_6 создают падения напряжений на соответствующих сопротивлениях:

$$I_3 R_3 = U_{ac}, \quad I_5 R_5 = U_{bd}, \quad I_6 R_6 = U_{cd}.$$

Определяем токи I_3 , I_5 , I_6 :

$$I_3 = \frac{E_1}{R_2 + R_3} = 1,5 \text{ A.}$$

Ток I_5 равен току источника $J = 3 \text{ A}$, а ток I_6 равен нулю, так как контур $abcd$ для тока разомкнут.

По второму закону Кирхгофа составим уравнение для контура $abcd$:

$$U_{ab} + U_{bd} - U_{cd} - U_{ac} = 0,$$

откуда

$$U_{ab} = U_{cd} + U_{ac} - U_{bd}$$

или

$$U_x = U_{ab} = I_6 R_6 + I_3 R_3 - I_5 R_5 = 0 + 90 - 60 = 30 \text{ B.}$$

Найдем входное сопротивление R_{bx} схемы относительно зажимов ab . Схема в этом случае имеет вид, представленный на рисунке 26.

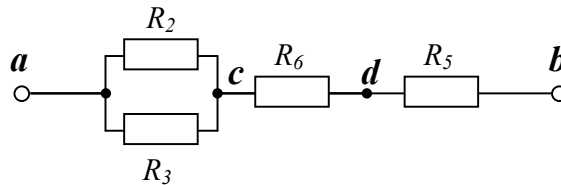


Рис. 26 – Схема к поиску R_{bx}

$$R_{bx} = R_{ab} = R_2 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} + R_6 + R_5 = 15 + 10 + 20 = 45 \text{ Ом.}$$

Ток ветви ab найдем согласно схеме, представленной на рисунке 27.

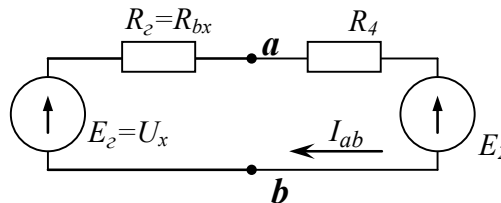


Рис. 27 – Схема к поиску тока ветви ab

$$I_{ab} = \frac{E_2 - E_2}{R_2 + R_4} = \frac{30 - 90}{45 + 15} = -1 \text{ A.}$$

Знак «-» свидетельствует о том, что ток ветви ab течет в противоположном направлении, то есть от узла b к узлу a .

10. Задание расчетно-графической работы

Для своего варианта вычертить исходную электрическую схему и рассчитать токи во всех ветвях следующими методами:

- контурных токов;
- узловых потенциалов;
- наложения;
- эквивалентного генератора (только для одной ветви, содержащей сопротивление R_j).

Результаты расчетов свести в таблицу и сравнить между собой.

Кроме того, составить систему уравнений по законам Кирхгофа, необходимую и достаточную для определения всех токов (систему не решать).

Начертить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

Проверить решение задачи, составив уравнение баланса мощностей.

Найти показания вольтметра и проверить полярность на правильность его подключения.

Значения ЭДС, сопротивлений и токов источников тока для каждого варианта приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные

Вари- ант	Схе- ма	R ₁ Ом	R ₂ Ом	R ₃ Ом	R ₄ Ом	R ₅ Ом	R ₆ Ом	R ₇ Ом	R ₈ Ом	E ₁ В	E ₂ В	E ₃ В	J ₁ А	J ₂ А	R _j
1	1	40	65	15	15	20	40	80	45	100	85	50	3	2	R ₁
2	2	15	80	40	80	50	15	25	40	90	65	95	2	1	R ₂
3	3	45	70	45	70	40	40	10	30	50	90	85	4	5	R ₃
4	4	65	65	70	50	15	45	40	45	95	80	90	2	7	R ₄
5	5	40	40	25	20	10	40	20	20	65	70	70	3	1	R ₅
6	6	50	45	80	40	30	45	70	50	85	55	85	1	4	R ₆
7	7	20	80	10	10	40	20	80	45	90	115	75	2	5	R ₇
8	8	15	70	90	40	45	85	25	40	80	100	65	3	1	R ₈
9	9	45	10	50	50	80	65	15	40	60	55	90	1	4	R ₁
10	10	10	30	95	45	20	90	10	50	70	50	85	2	2	R ₂
11	11	40	20	65	40	10	80	60	25	80	95	95	3	3	R ₃
12	12	65	50	85	30	70	70	40	45	85	85	90	4	5	R ₄
13	13	45	45	90	45	25	55	45	65	75	80	70	3	3	R ₅
14	14	25	40	80	20	40	15	80	40	65	75	85	4	2	R ₆
15	15	30	40	60	50	80	10	20	45	75	90	75	2	3	R ₇
16	16	80	20	70	45	25	55	10	20	110	60	55	5	4	R ₈
17	17	15	55	80	40	10	65	70	40	85	95	50	3	1	R ₁
18	18	65	40	85	40	40	80	25	45	90	65	60	5	4	R ₂
19	19	20	15	75	50	20	95	80	60	85	80	85	2	5	R ₃
20	20	45	40	65	25	70	80	10	10	70	70	90	3	3	R ₄
21	21	40	45	75	45	80	75	15	65	60	50	85	4	2	R ₅
22	22	10	40	10	65	40	90	80	40	95	65	70	2	1	R ₆
23	23	80	45	50	30	80	60	20	65	80	95	60	3	4	R ₇
24	24	45	20	15	15	25	85	10	70	65	50	95	4	1	R ₈
25	25	15	75	25	45	25	20	45	65	75	90	80	2	4	R ₁
26	26	40	45	45	80	80	45	60	10	90	85	65	3	4	R ₂
27	27	65	50	80	20	25	40	10	25	85	80	75	4	7	R ₃
28	28	40	30	50	40	10	30	65	80	70	95	90	2	3	R ₄
29	29	45	10	10	65	40	45	40	40	60	65	85	3	2	R ₅
30	30	20	15	30	80	20	20	65	45	65	75	70	5	4	R ₆
31	31	40	70	40	50	70	50	70	20	95	80	60	2	1	R ₇
32	32	45	65	45	25	80	45	65	40	90	55	65	3	2	R ₈
33	33	60	70	20	15	25	80	45	80	80	95	95	4	1	R ₁
34	34	10	80	45	10	15	25	40	25	70	65	90	1	2	R ₂
35	35	65	45	40	30	10	10	30	10	55	80	50	2	1	R ₃
36	36	40	45	45	65	60	40	45	40	115	95	95	3	4	R ₄
37	37	65	40	30	65	40	20	85	20	100	65	65	4	4	R ₅
38	38	70	30	10	25	45	70	50	70	55	85	85	2	2	R ₆
39	39	65	10	20	20	70	80	45	80	65	90	90	3	4	R ₇
40	40	10	15	40	15	15	25	40	25	80	80	80	4	7	R ₈
41	41	25	25	30	45	25	45	20	40	95	60	60	1	4	R ₁
42	42	80	20	65	70	80	45	70	45	80	70	95	2	5	R ₂

Вари- ант	Схе- ма	R ₁ Ом	R ₂ Ом	R ₃ Ом	R ₄ Ом	R ₅ Ом	R ₆ Ом	R ₇ Ом	R ₈ Ом	E ₁ В	E ₂ В	E ₃ В	J ₁ А	J ₂ А	R _j
43	43	50	15	50	45	25	40	80	60	75	80	85	3	6	R ₃
44	44	45	65	30	40	10	30	25	10	100	85	90	4	2	R ₄
45	45	30	80	40	10	40	45	15	65	85	75	70	1	4	R ₅
46	46	15	45	40	40	20	20	10	40	115	65	85	2	1	R ₆
47	47	40	40	40	45	70	50	60	65	65	75	75	3	3	R ₇
48	48	20	10	70	25	80	45	40	70	90	110	65	6	1	R ₈
49	1	45	15	80	15	25	40	45	65	120	50	90	1	2	R ₁
50	2	30	40	65	80	40	35	80	45	50	90	85	5	1	R ₂
61	13	20	10	10	40	25	70	45	45	70	65	100	2	3	R ₅
62	14	50	15	30	65	45	65	50	80	85	90	55	8	5	R ₆
63	15	45	70	40	80	65	10	30	50	75	70	65	2	4	R ₇
64	16	40	65	45	50	30	25	70	80	80	125	80	3	1	R ₈
65	17	40	70	20	25	15	80	15	25	60	100	95	1	2	R ₁
66	18	20	75	25	15	45	40	25	45	70	50	80	4	6	R ₂
67	19	55	40	50	45	45	45	80	45	80	95	95	2	2	R ₃
68	20	40	80	45	80	40	20	25	40	85	85	55	7	1	R ₄
69	21	15	25	40	10	30	40	10	30	75	90	110	2	2	R ₅
70	22	40	10	30	40	45	45	40	45	85	70	95	8	2	R ₆
61	13	20	10	10	40	25	70	45	45	70	65	100	2	3	R ₅
62	14	50	15	30	65	45	65	50	80	85	90	55	8	5	R ₆
63	15	45	70	40	80	65	10	30	50	75	70	65	2	4	R ₇
64	16	40	65	45	50	30	25	70	80	80	125	80	3	1	R ₈
65	17	40	70	20	25	15	80	15	25	60	100	95	1	2	R ₁
66	18	20	75	25	15	45	40	25	45	70	50	80	4	6	R ₂
67	19	55	40	50	45	45	45	80	45	80	95	95	2	2	R ₃
68	20	40	80	45	80	40	20	25	40	85	85	55	7	1	R ₄
69	21	15	25	40	10	30	40	10	30	75	90	110	2	2	R ₅
70	22	40	10	30	40	45	45	40	45	85	70	95	8	2	R ₆
71	23	20	25	60	70	80	45	25	45	90	85	85	2	3	R ₇
72	24	50	75	80	15	25	40	40	50	85	75	80	3	4	R ₈
73	25	45	45	10	25	45	20	80	45	70	65	70	1	1	R ₁
74	26	40	50	15	80	45	70	25	40	60	90	65	3	2	R ₂
75	27	40	30	40	25	40	80	10	30	95	85	95	2	3	R ₃
76	28	70	10	45	10	30	25	40	45	80	95	80	4	4	R ₄
77	29	15	15	40	40	45	15	20	20	65	90	60	1	3	R ₅
78	30	25	70	20	20	20	10	70	50	125	70	50	3	6	R ₆
79	31	80	65	70	70	50	60	80	45	90	85	80	2	3	R ₇
80	32	25	70	80	80	45	40	40	50	85	95	90	1	8	R ₈
81	33	10	75	25	70	80	45	80	45	70	65	125	4	1	R ₁
82	34	40	45	15	15	25	40	25	40	60	80	65	1	3	R ₂
83	35	20	50	10	25	45	80	25	20	65	70	95	6	4	R ₃

Вари- ант	Схе- ма	R_1 Ом	R_2 Ом	R_3 Ом	R_4 Ом	R_5 Ом	R_6 Ом	R_7 Ом	R_8 Ом	E_1 В	E_2 В	E_3 В	J_1 А	J_2 А	R_j
84	36	70	50	60	45	80	25	80	45	95	50	80	3	3	R_4
85	37	80	45	40	80	20	10	25	40	55	65	90	4	5	R_5
86	38	70	80	45	50	40	40	10	30	80	95	50	1	3	R_6
87	39	15	25	40	10	65	20	40	45	70	80	95	2	4	R_7
88	40	25	45	20	30	80	70	20	20	55	70	65	3	3	R_8
89	41	80	45	70	40	50	80	70	50	115	50	85	4	4	R_1
90	42	25	65	65	45	25	70	70	20	100	65	90	1	3	R_2
91	43	10	30	70	20	15	15	15	70	55	95	80	2	4	R_3
92	44	40	15	75	25	45	25	25	45	65	50	60	3	3	R_4
93	45	20	45	70	45	80	80	80	80	80	90	70	4	1	R_5
94	46	70	80	25	80	20	80	25	20	95	85	80	1	3	R_6
95	47	80	20	80	80	45	25	10	40	80	80	85	5	1	R_7
96	48	25	40	15	25	40	10	40	65	75	95	75	2	2	R_8
97	1	15	65	25	45	20	40	20	80	90	65	50	6	1	R_1
98	2	10	80	80	45	70	20	70	50	60	75	95	9	5	R_2
99	3	60	50	25	40	80	70	80	25	85	80	85	2	1	R_3
100	4	40	25	10	30	25	80	70	15	90	55	90	3	2	R_4

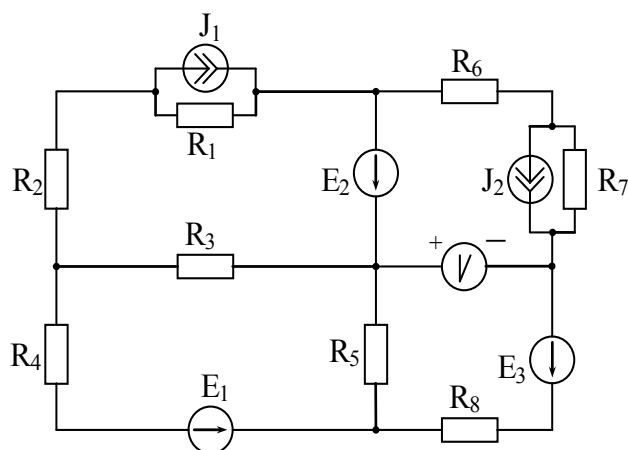


Схема 1

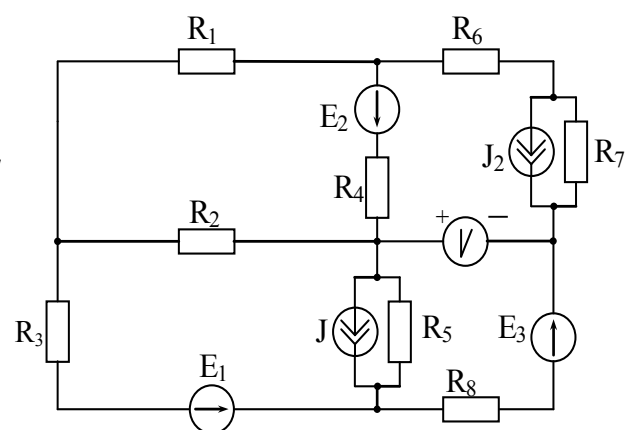


Схема 2

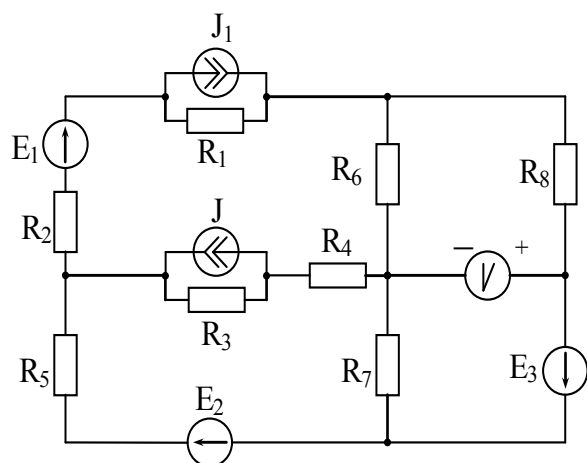


Схема 3

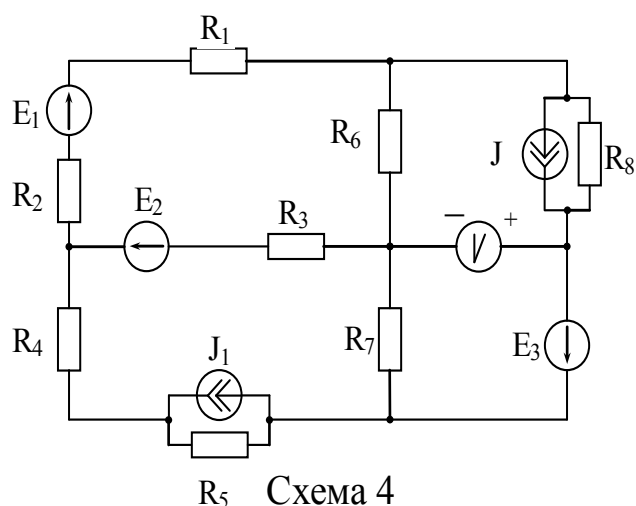
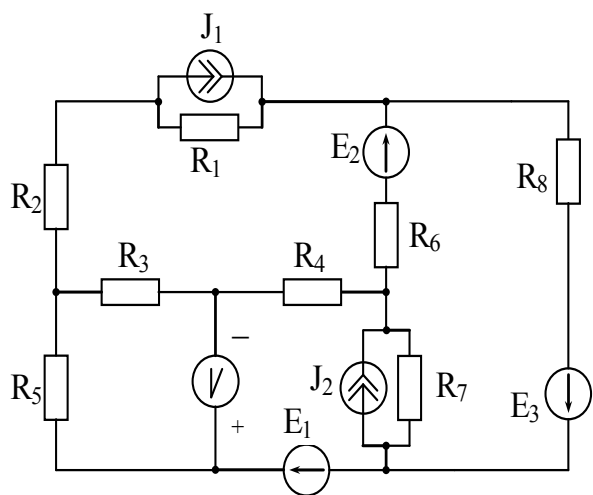
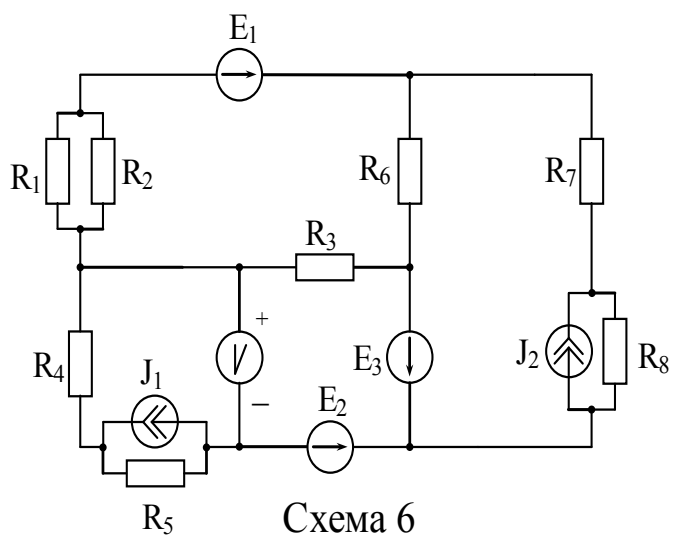


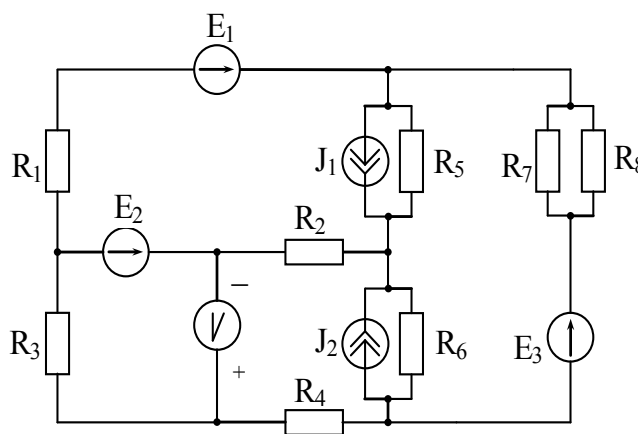
Схема 4



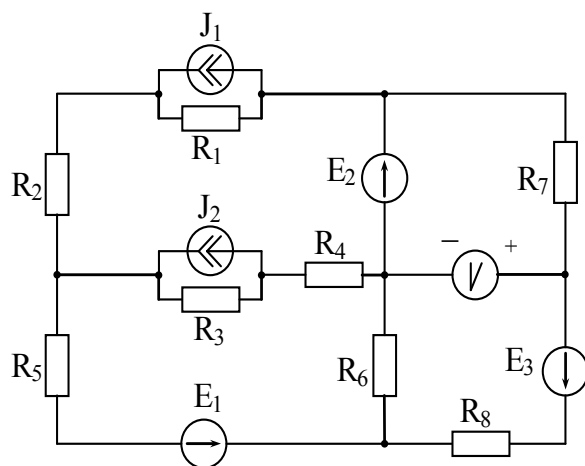
Cxema 5



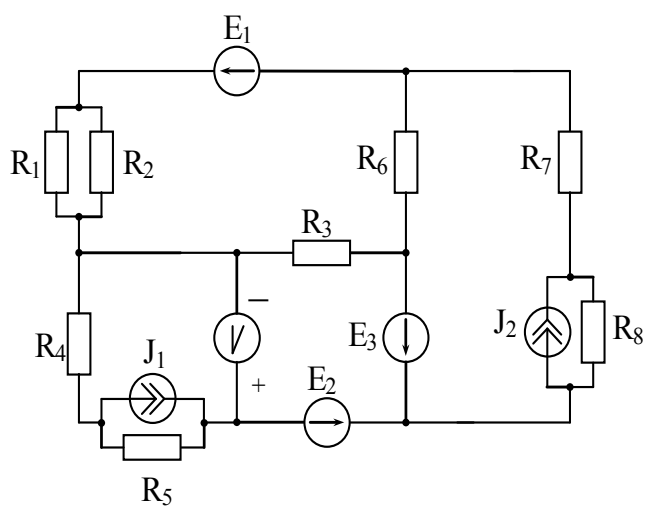
Cxema 6



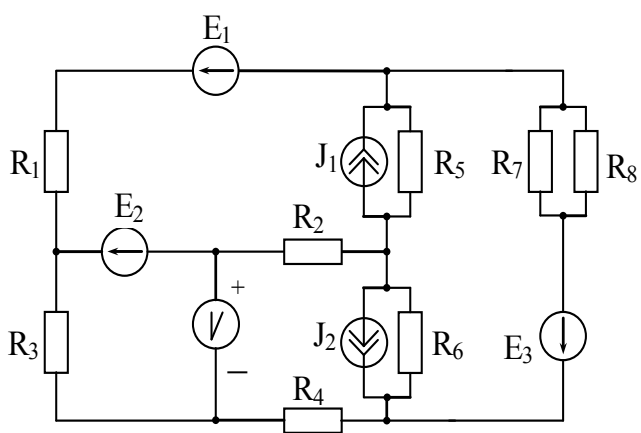
Cxema 7



Cxema 8



Cxema 9



Cxema 10

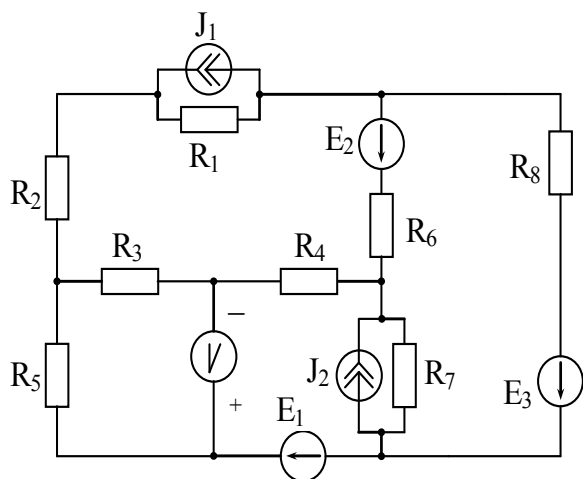


Схема 11

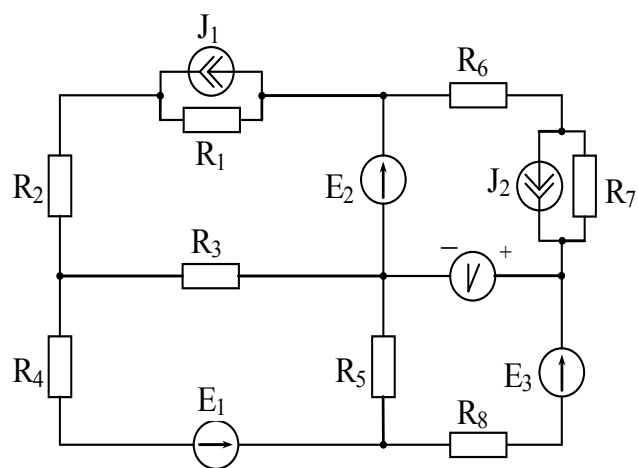


Схема 12

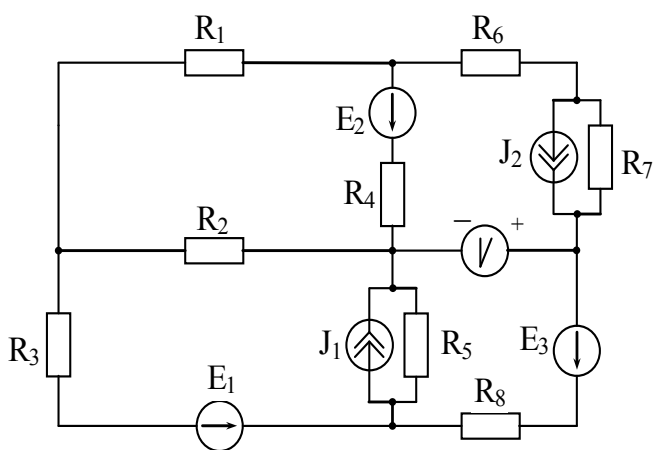


Схема 13

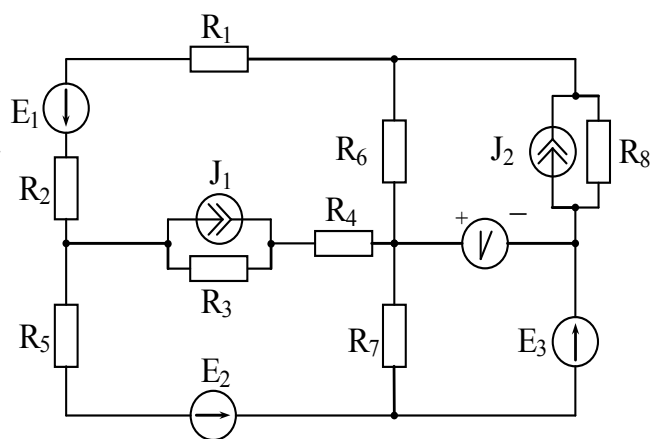


Схема 14

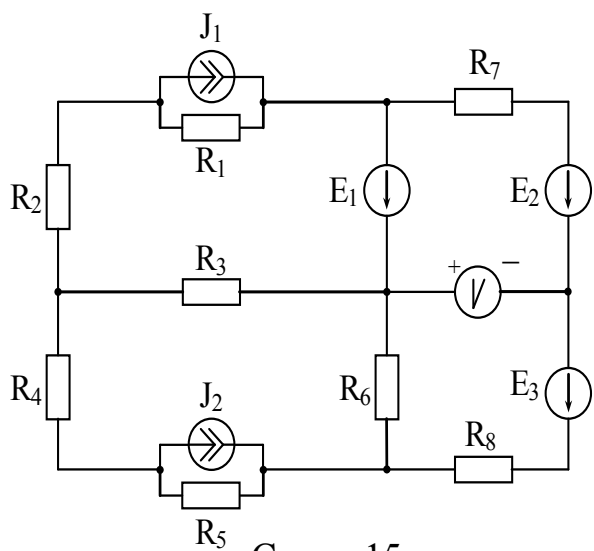


Схема 15

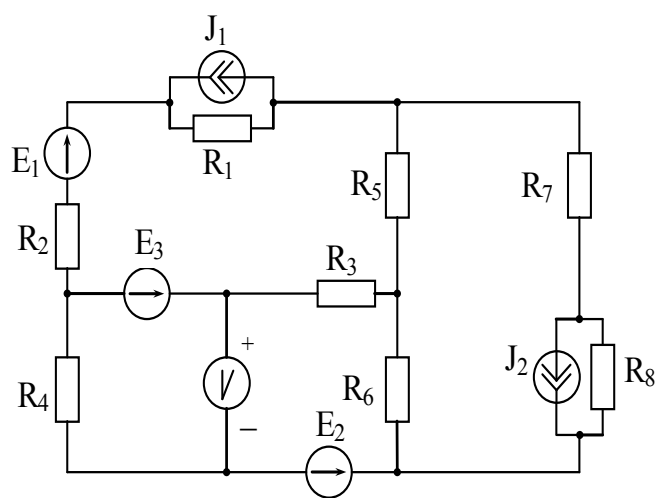


Схема 16

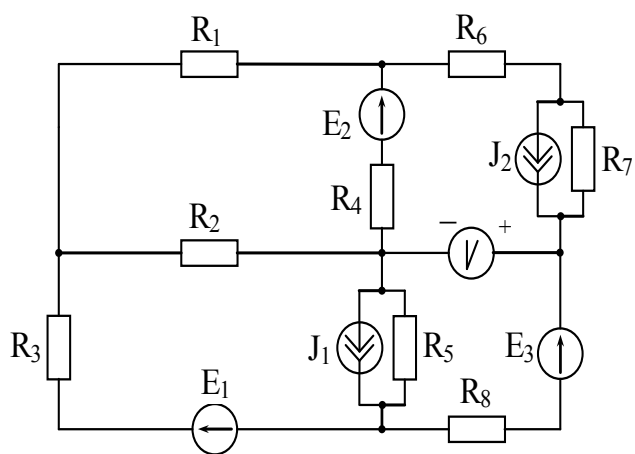


Схема 17

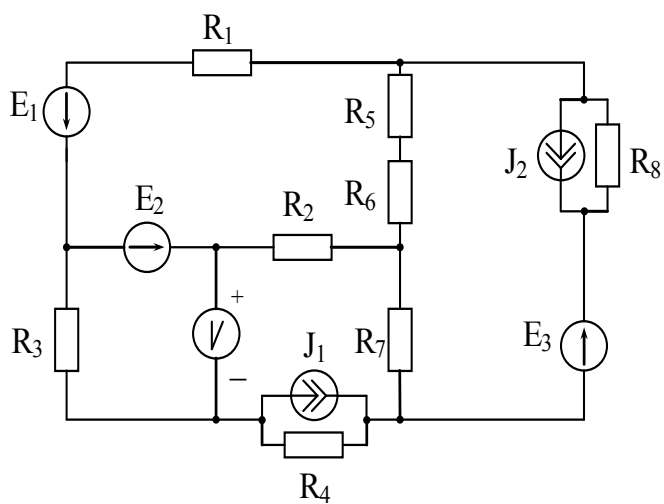


Схема 18

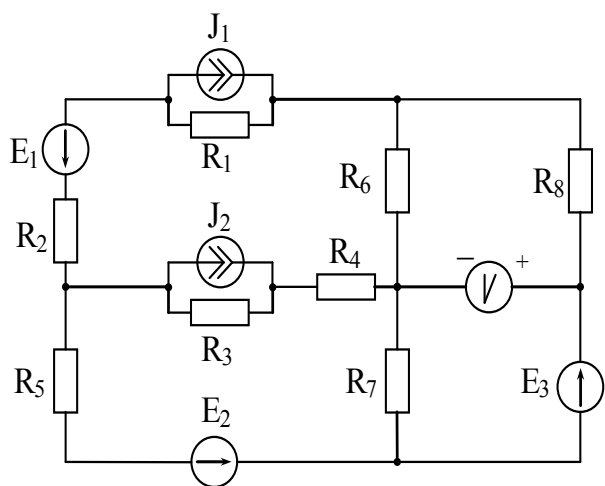


Схема 19

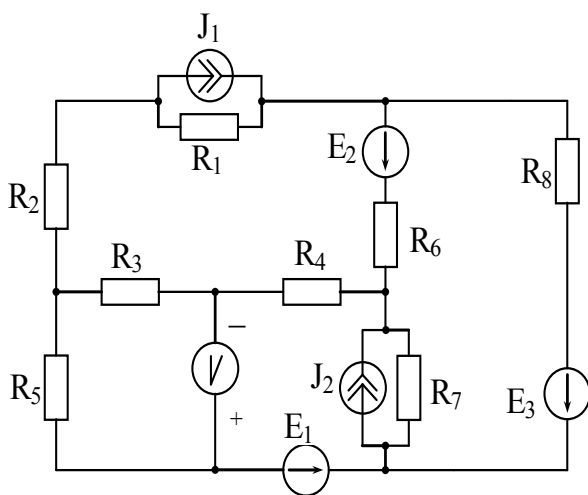


Схема 20

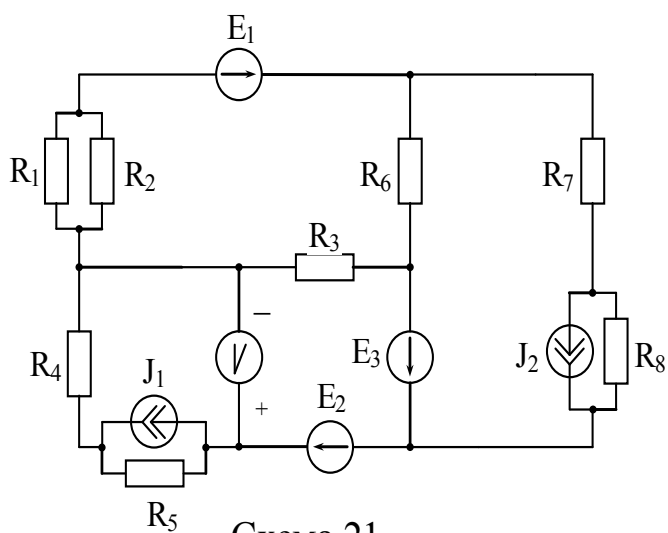


Схема 21

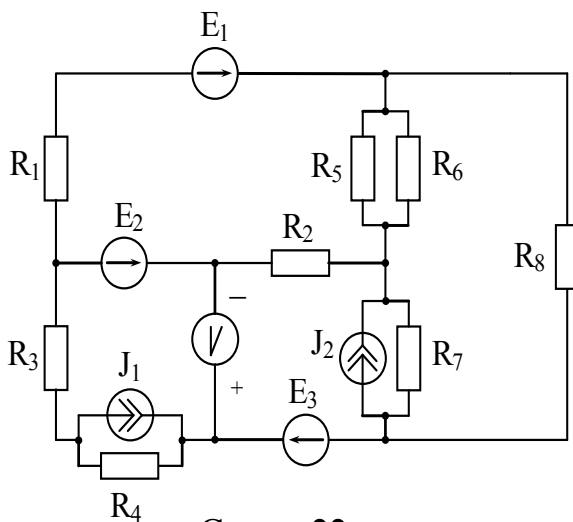


Схема 22

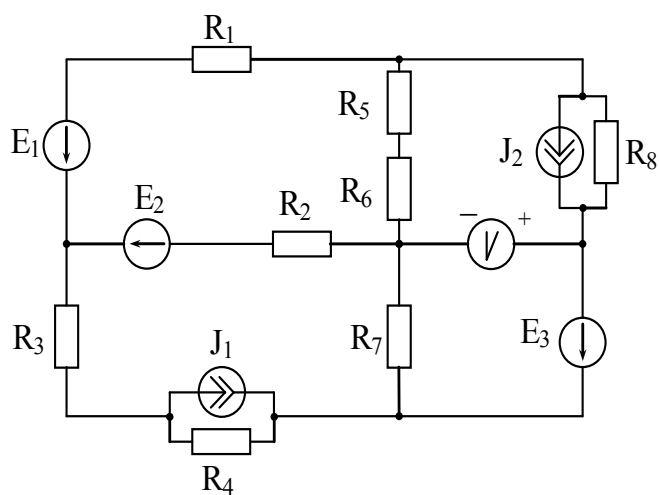


Схема 23

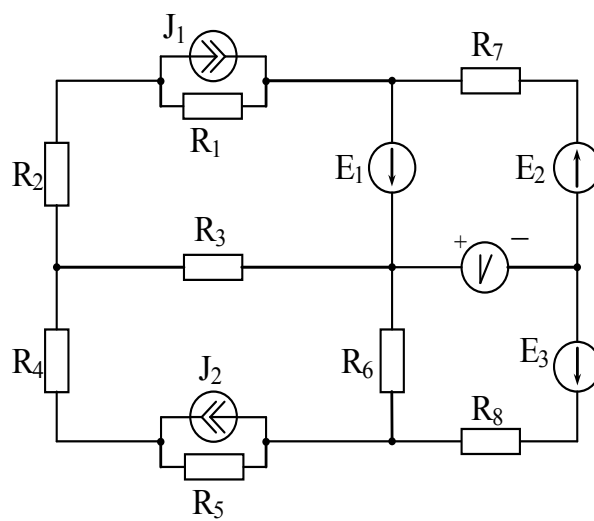


Схема 24

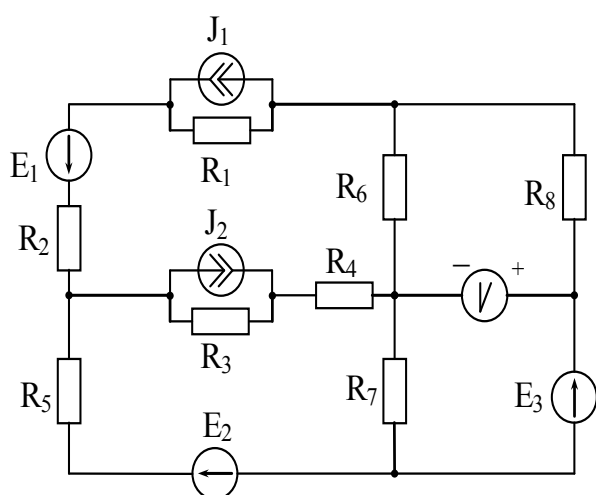


Схема 25

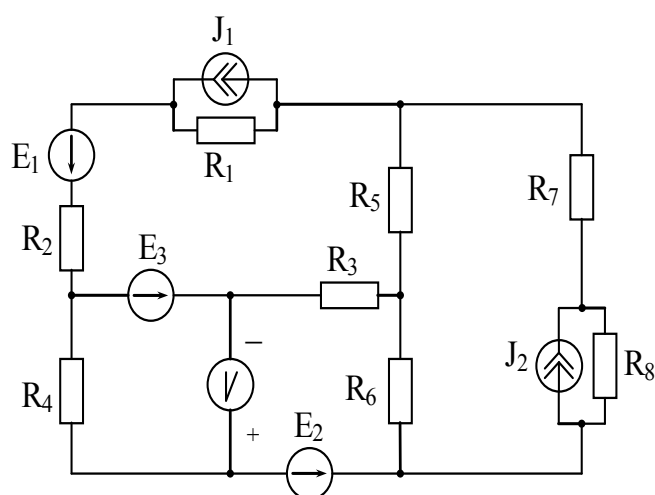


Схема 26

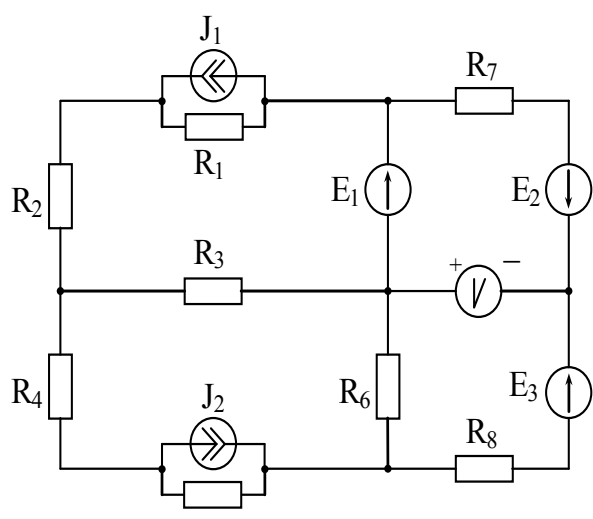


Схема 27

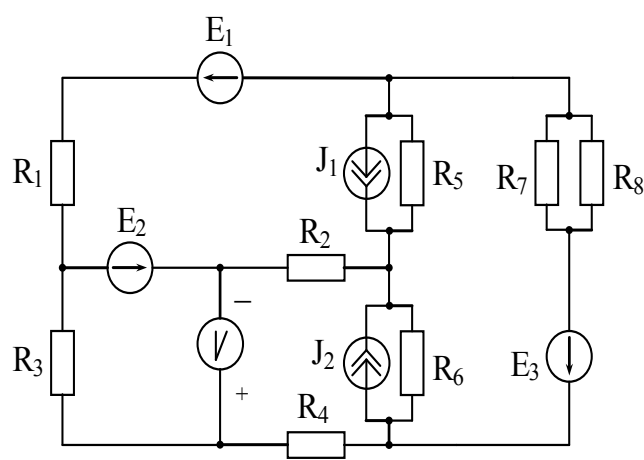
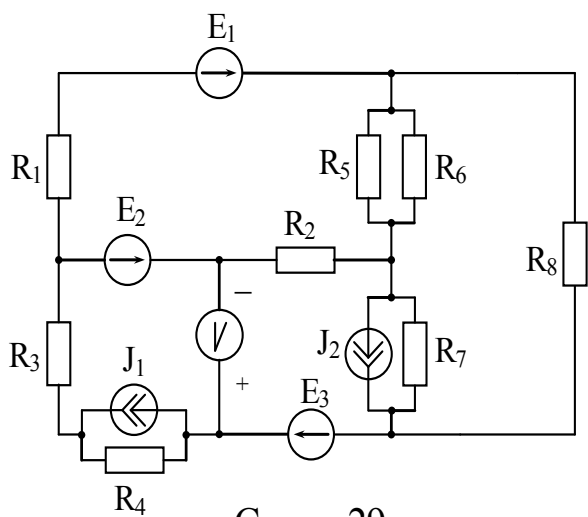
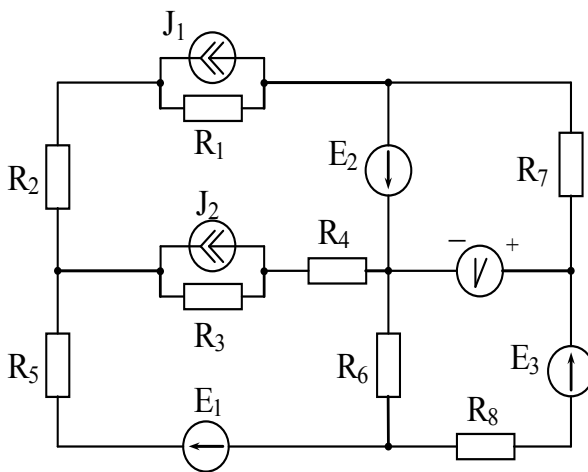


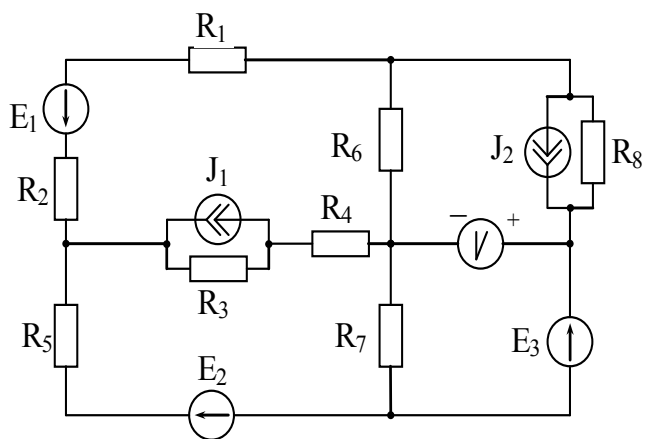
Схема 28



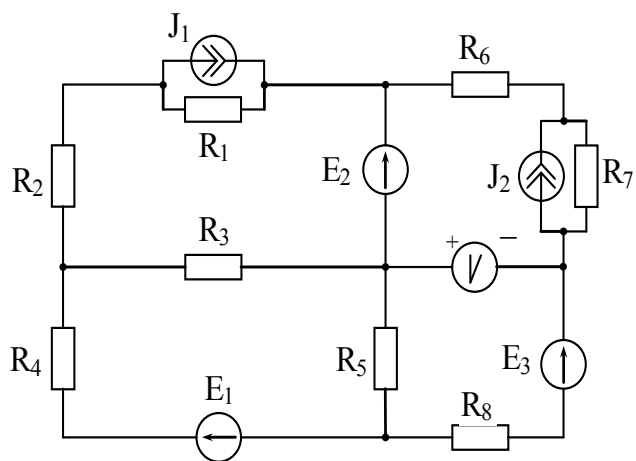
Cxema 29



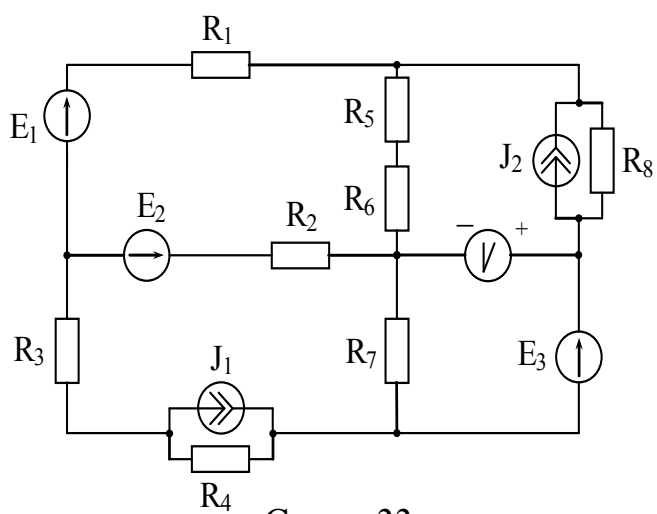
Cxema 30



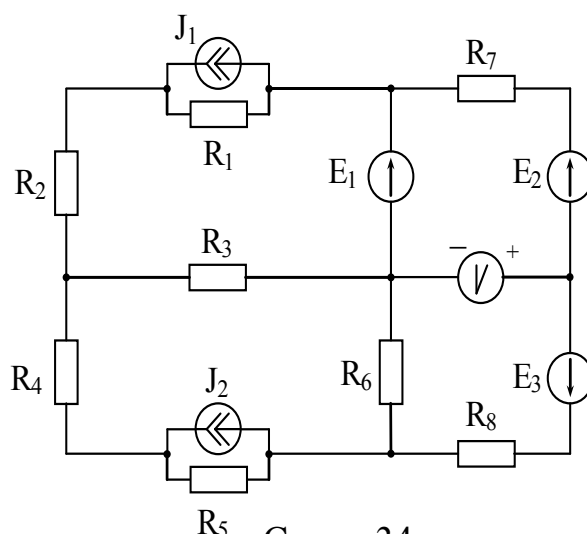
Cxema 31



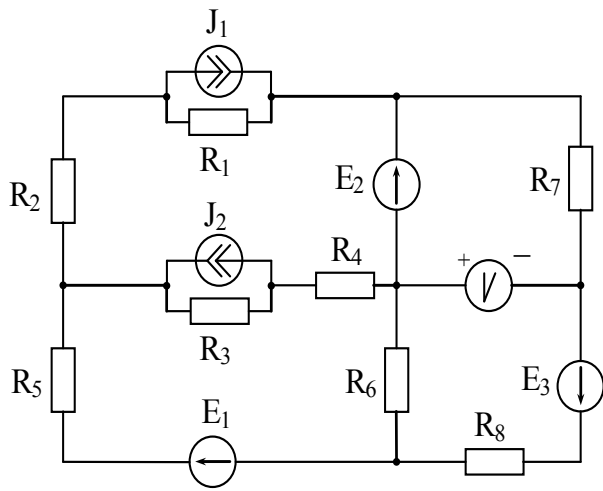
Cxema 32



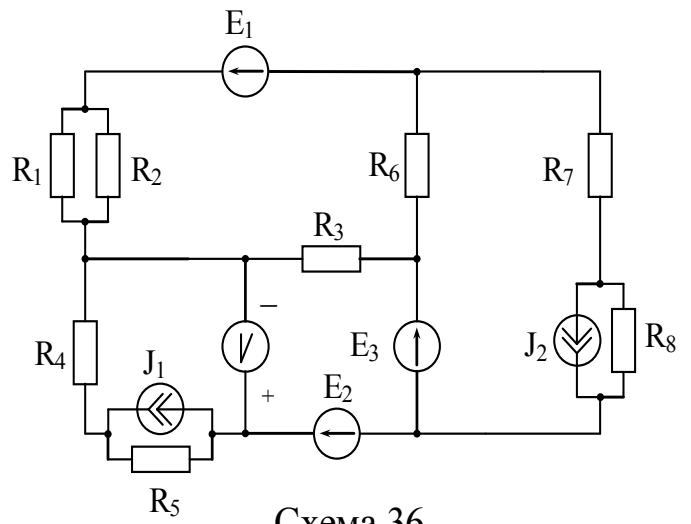
Cxema 33



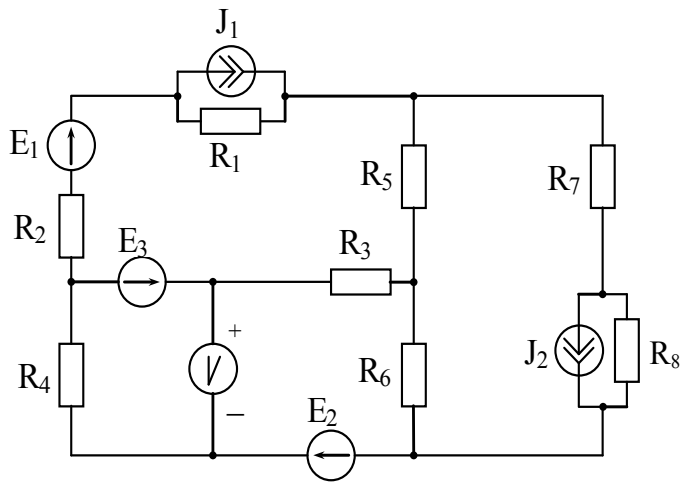
Cxema 34



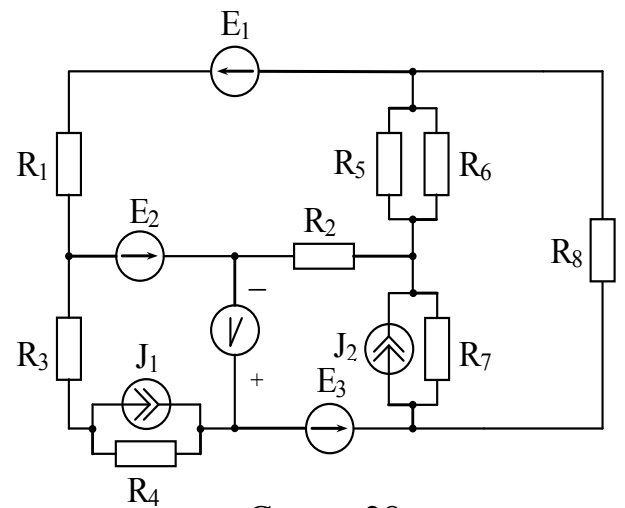
Cxema 35



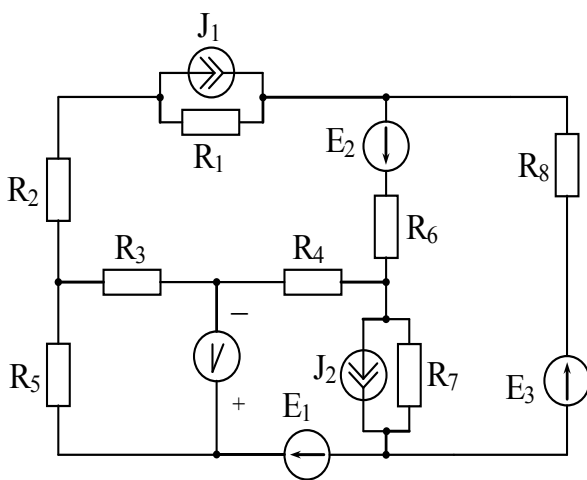
Cxema 36



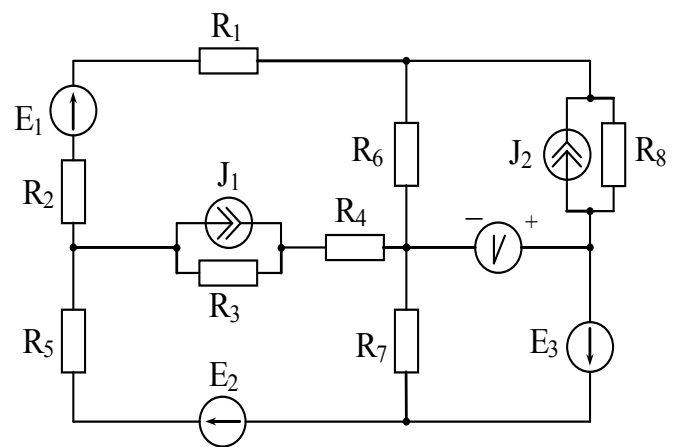
Cxema 37



Cxema 38



Cxema 39



Cxema 40

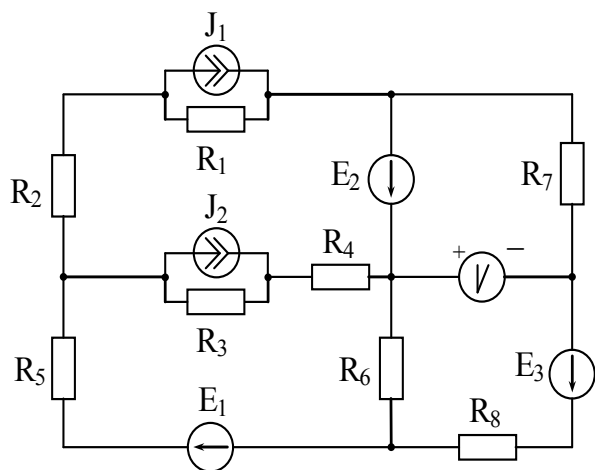


Схема 41

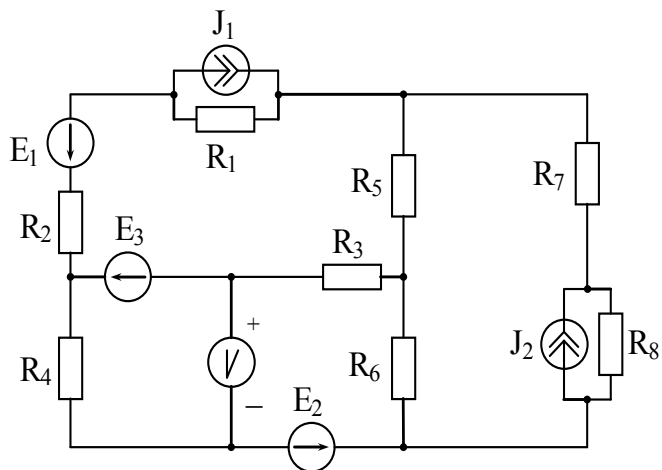


Схема 42

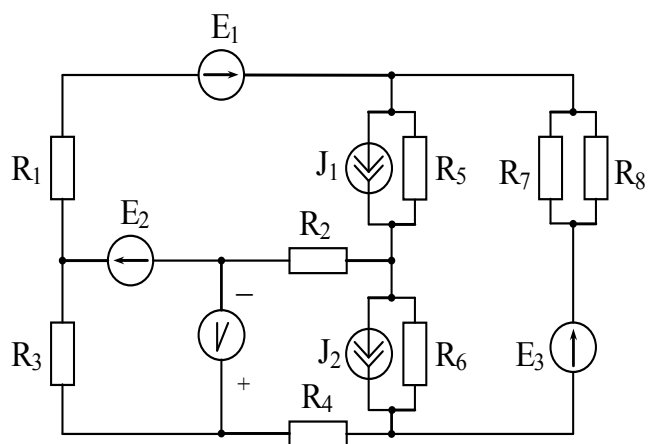


Схема 43

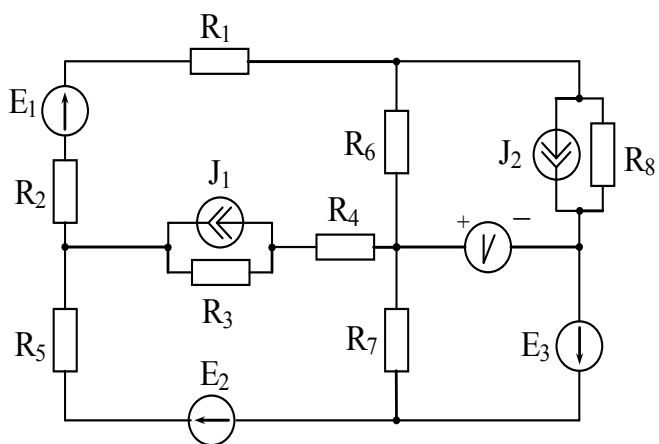


Схема 44

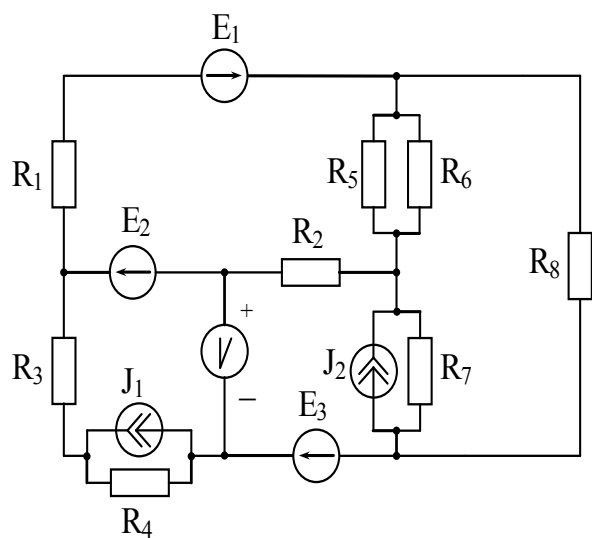


Схема 45

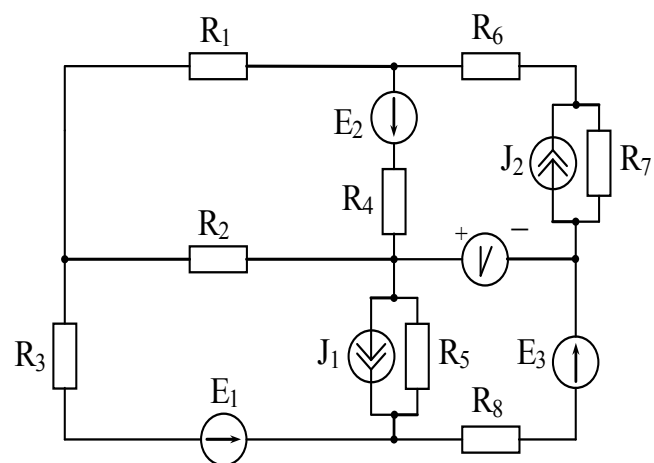


Схема 46

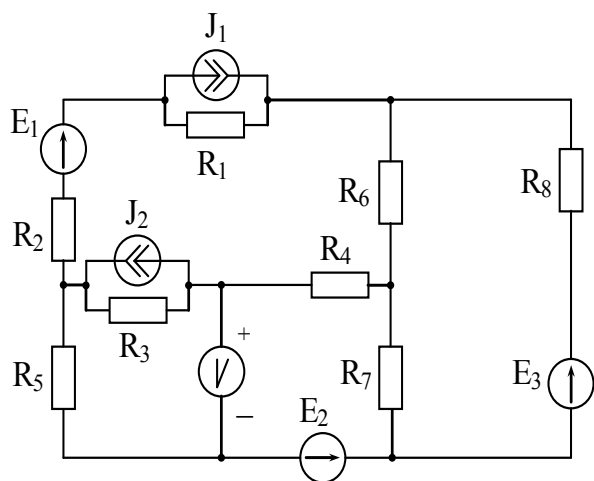


Схема 47

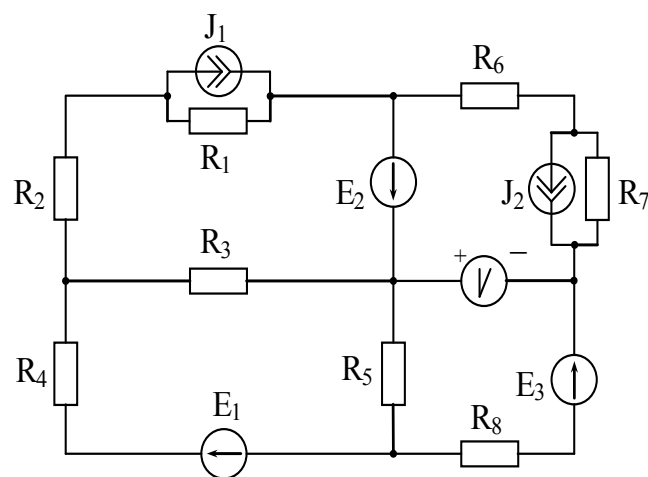


Схема 48

Литература

1. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники : учебник для учащихся учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», квалификация (степень) «бакалавр» / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2013. – 376 с.
2. Бессонов, Л. А. Электрические цепи : теоретические основы электротехники : учебник для бакалавров для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», «Электроэнергетика», «Приборостроение» / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2012. – 701 с.
3. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника : учебник для бакалавров : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки: «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Автоматизация технологических процессов и производств» / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – М. : Юрайт, 2013. – 430 с.
4. Лоторейчук, Е. А. Расчет электрических и магнитных цепей и полей: решение задач : учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по группе специальностей: «Энергетика», «Электротехника», «Приборостроение», «Электроника и микроэлектроника», «Радиотехника и телекоммуникации», «Автоматизация и управление», «Информатика и вычислительная техника» / Е. А. Лоторейчук. – М. : Форум : ИНФРА-М, 2012. – 271 с.
5. Немцов, М. В. Электротехника и электроника : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования по дисциплине «Электротехника и электроника» по техническим специальностям / М. В. Немцов, М. Л. Немцова. – 6-е изд., стер. – М. : Академия, 2013. – 478 с.
6. Попов, В. П. Основы теории цепей : учебник для бакалавров для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям и специальностям / В. П. Попов ; Южный федеральный ун-т. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2013 – 696 с.
7. Прошин, В. М. Сборник задач по электротехнике : учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы Федерального государственного образовательного стандарта начального профессионального образования / В. М. Прошин, Г. В. Ярочкина. – 4-е изд., стер. – М. : Академия, 2013.

В. П. Максимов, И. Г. Минервин, Е. Д. Уткин,
О. А. Федоров

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Практикум

ЧАСТЬ I ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под общей редакцией В. П. Максимова

Корректор В. А. Яковлева
Верстка Г. С. Лосева



Подписано в печать 11.09.2014. Бумага «PaperOne».
Гарнитура «Times New Roman». Формат 60х81 $\frac{1}{8}$.
Тираж 500 (1-й завод 1–200 экз.). Объем 5,5 усл. п. л. Заказ № 651-14.

Издательство Сахалинского государственного университета
693007, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.
Тел. (4242) 45-23-16, факс (4242) 45-23-17.
E-mail: polygraph@sakhgu.ru,
izdatelstvo@sakhgu.ru